

Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto



Autor (FIB/2002)

Arnold Van Acker

Tradução (ABCIC/2003)

Marcelo de Araújo Ferreira

Capítulo 1: Aspectos Gerais

1.1. Introdução

O uso de concreto pré-moldado em edificações está amplamente relacionado à uma forma de construir econômica, durável, estruturalmente segura e com versatilidade arquitetônica. A indústria de pré-fabricados está continuamente fazendo esforços para atender as demandas da sociedade, como por exemplo: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança, condições favoráveis de trabalho e de sustentabilidade.

A evolução construtiva das edificações e das atividades da engenharia civil nas próximas décadas será influenciada pelo desenvolvimento do processo de informação, pela comunicação global, pela industrialização e pela automação. Já existe bastante desta realidade sendo implementada na Europa. Entretanto, há muito mais para ser implementado, especialmente com respeito à eficiência dos processos construtivos atuais, desde o projeto da edificação até o seu acabamento. Para se mudar a base produtiva na construção civil, com uso intensivo da força de trabalho, para um modelo mais moderno como a pré-fabricação, envolveria a aplicação de uma filosofia industrial ao longo de todo o processo construtivo da edificação.

A pré-fabricação das estruturas de concreto é um processo industrializado com grande potencial para o futuro. Todavia, geralmente a pré-fabricação ainda é vista por projetistas inexperientes como se fosse apenas uma variante técnica das construções de concreto moldadas no local. Nesse caso, a prefabricação significa apenas que partes da edificação são pré-moldadas em usinas fora do canteiro, para serem montadas depois na obra, como se o conceito inicial de uma estrutura moldada no local fosse obtido novamente. Esse ponto de vista é completamente errôneo. Todo sistema construtivo tem suas próprias características, as quais para uma maior ou menor influência no *layout* da estrutura, largura do vão, sistemas de estabilidade, etc. Para conseguir melhores resultados o projeto deveria, desde o início, respeitar as demandas específicas e particulares estruturais dos sistemas construtivos pré-moldados.

1.2. Oportunidades

Comparado aos métodos de construção tradicionais e outros materiais de construção, os sistemas pré-fabricados, como método construtivo, e o concreto, como material, têm muitas características positivas. É uma forma industrializada de construção com muitas vantagens.

- Produtos feitos na fábrica

A forma mais efetiva de industrializar o setor da construção civil é transferir o trabalho realizado nos canteiros para fábricas permanentes e modernas. A produção numa fábrica possibilita processos de produção mais eficientes e racionais, trabalhadores especializados, repetição de tarefas, controle de qualidade, etc. A competitividade e a sociedade estão forçando a indústria da construção a se atualizar constantemente, melhorando a sua eficiência e as condições de trabalho através do desenvolvimento e inovação tecnológica, de novos sistemas e processos construtivos. Desta forma, a automação vem sendo gradativamente implementada. Existem exemplos bem sucedidos de automação no preparo de armadura, execução e montagem de formas, preparo e lançamento do concreto, acabamentos do concreto arquitetônico, entre outros. Outras operações na pré-fabricação também são passíveis da implementação da automação.

- Uso otimizado de materiais

A pré-fabricação possui um maior potencial econômico, desempenho estrutural e durabilidade do que as construções moldadas no local, por causa do uso altamente potencializado e otimizado dos materiais. Isso é obtido por meio do uso de equipamentos modernos e de procedimentos de fabricação cuidadosamente elaborados.

A pré-fabricação emprega equipamentos controlados por computador para o preparo do concreto. Aditivos e adições são empregados para conseguir os desempenhos mecânicos específicos, para cada classe de concreto. O lançamento e o adensamento do concreto são executados em locais fechados, com equipamentos otimizados. A relação água/cimento pode ser reduzida ao mínimo possível e o adensamento e cura são executadas em condições controladas. O resultado é que o concreto pode ser perfeitamente adaptado aos requerimentos de cada tipo de componente para otimizar o uso dos materiais mais caros e exaustivos. Além disso, a eficácia da mistura é melhor que o concreto moldado no local.

O concreto de alto desempenho CAD (com resistência superior a 50 MPa) é bem conhecido na indústria da pré-fabricação e muitas fábricas já estão empregando-o diariamente. Os maiores benefícios das estruturas pré-moldadas estão relacionados com a eficiência estrutural que permite elementos mais esbeltos e o uso otimizado de materiais. Outra característica positiva é o aumento da durabilidade contra congelamento e contra agentes químicos. As maiores vantagens são alcançadas dos elementos comprimidos, especialmente os pilares. A Figura 1 mostra a influência da resistência à compressão na capacidade de carga das seções transversais dos diferentes pilares. Isso demonstra que, a capacidade portante relativa está aumentando entre 100 e 150%, quando a resistência do concreto vai de 30 a 90 MPa.

Para vigas, a utilização de resistências mais altas para o concreto permite a utilização da protensão. Isso significa a possibilidade de se empregar um número maior de cabos de protensão e, conseqüentemente, uma maior capacidade última de flexão, maior momento de fissuração e maior carga de serviço.

O concreto auto-adensado (auto-adensável) é uma solução nova e bastante promissora para o processo de pré-fabricação. Enquanto que a alta resistência está enfocada na otimização do desempenho do produto (resistência e durabilidade), o concreto auto-adensado apresenta um impacto benéfico ao processo de produção, pois o mesmo não necessita de vibração e, por isso, apresenta muitas vantagens, tais como: menos barulho durante o processo de moldagem dos elementos pré-moldados; menor pressão nas formas; maior rapidez e facilidade no processo de moldagem, principalmente para seções delgadas e complicadas, gerando menos bolhas de ar na superfície da peça, sendo fácil de bombear. O desenvolvimento desta técnica e a sua aplicação vem crescendo rapidamente na indústria de pré-moldados na Europa e, se espera que em poucos anos, este procedimento seja empregado como uma técnica convencional no dia a dia.

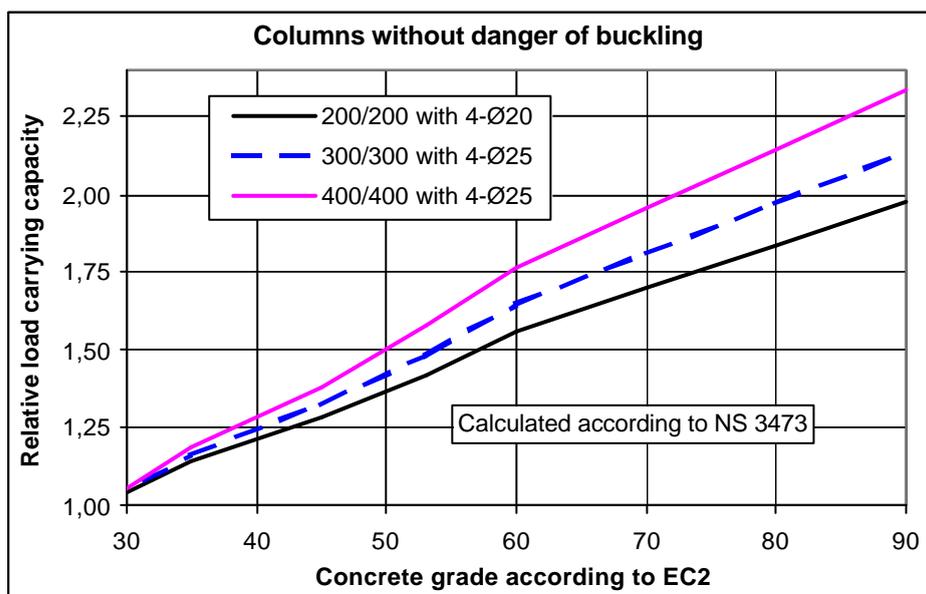


Figura 1.1 capacidade de carga relativa dos pilares em função da resistência do concreto

O concreto protendido é muito empregado na pré-fabricação, principalmente pela facilidade da utilização das pistas de protensão, mas também pelo uso da protensão por torquimetro em barras rosqueadas para ligações. Esta técnica não só apresenta todas as vantagens do concreto protendido, como também, proporciona economia por causa da ausência de equipamentos caros, como macacos hidráulicos, e maior facilidade de execução.

- Menor tempo de construção – menos da metade do tempo necessário para construção convencional moldada no local

Por causa da lentidão dos métodos tradicionais de estruturas de concreto moldadas no local, os longos atrasos na construção são geralmente aceitos. Entretanto, a demanda atual por um rápido retorno do investimento está se tornando mais e mais importante: a decisão de iniciar a construção pode ser adiada até o último momento, mas vez iniciada, o cronograma inicial da obra dever ser cumprido. Além disso, os projetos estão se tornando mais complexos, que não é favorável para construções em um curto espaço de tempo.

- A instalação pode continuar mesmo no inverno rigoroso, com temperatura de -20°C .

O trabalho no canteiro deve parar assim quando a temperatura atinge -5°C . O processo de pré-fabricação independe das condições adversas do clima e normalmente, a produção continua no inverno.

- Qualidade

O termo qualidade tem um significado amplo, o objetivo final é conseguir que os produtos e serviços respondam as expectativas do usuário. Isso se inicia no estudo preliminar do projeto, continuando com a produção de componentes e com o respeito ao cronograma de entrega e de montagem do sistema construtivo pré-fabricado.

A garantia da qualidade durante a fabricação se baseia em quatro pontos: 1) mão-de-obra; 2) instalações e equipamentos na fábrica; 3) matéria-prima e processos operacionais; 4) controle de qualidade na execução. Geralmente, a supervisão da qualidade é baseada num sistema de autocontrole, podendo haver ou não a supervisão de uma terceira parte. O sistema de controle de produção da fábrica consiste de procedimentos, instruções, inspeções regulares, testes e utilização dos resultados dos equipamentos de controle, matéria-prima, outros insumos, processos de produção e produtos. Os resultados da inspeção são registrados e ficam disponíveis aos clientes. Muitas empresas de pré-fabricação possuem certificação ISO 9000.

Isso oferece ao cliente enormes vantagens de acordo com as tendências atuais presentes na construção civil.

- Oportunidade para boa arquitetura

Dentro do contexto da pré-fabricação aberta, o projeto do edifício não está restrito aos elementos de concreto produzidos em série e quase todo tipo de edificação pode ser adaptada aos requisitos dos fabricantes ou do arquiteto. Não há contradição entre elegância arquitetônica, variedade e eficiência. Não se usa mais a industrialização em larga escala de unidades idênticas; pelo contrário, um processo de produção eficiente pode ser combinado com trabalho especializado que permite um projeto arquitetônico sem custos extras. Neste sentido, a padronização de soluções construtivas apresenta-se como uma ferramenta ainda mais importante do que a modulação dos elementos.

- Eficiência estrutural

O concreto pré-moldado oferece recursos consideráveis para melhorar a eficiência estrutural. Vãos grandes e redução da altura efetiva podem ser obtidos usando concreto protendido para elementos de vigas e de lajes. Para construções industriais e comerciais, os vãos do piso podem chegar a 40 m ou mais. Para estacionamentos, o concreto pré-fabricado permite que mais carros sejam colocados na mesma vaga, por causa dos grandes vãos e das seções de pilares mais esbeltas. Isso oferece não apenas flexibilidade na construção, como também maior vida útil da edificação, pois há maior adaptabilidade para novos usos. Dessa maneira, a construção retém seu valor comercial por mais tempo.

- Flexibilidade no Uso

Certos tipos de construções são freqüentemente devem ser adaptáveis para satisfazer as necessidades dos usuários, como é o caso de escritórios, onde a solução mais apropriada é criar um grande espaço interno livre sem nenhuma restrição para possibilitar a adaptação de possíveis subdivisões com divisórias.

- Adaptabilidade

Futuramente, haverá muito menos demolição de edificações inteiras e mais demandas para adaptar as construções existentes para as novas exigências do mercado. As razões principais para essa atitude serão os custos elevados para demolição devido a barulho, poeira, problemas com tráfego e muitas outras inconveniências. Por outro lado, depois de 30 ou 50 anos, um prédio comercial se torna menos atrativo para alugar, e o proprietário vai querer fazer algumas inovações, como por exemplo, uma fachada mais moderna. O conceito do projeto deveria facilitar tais renovações, sem necessidade de demolir o resto da estrutura. A concepção inicial da edificação por inteira terá que considerar a vida ao longo dos diferentes componentes da construção, como: estrutura portante acima de 100 anos ou mais; fachada de 30 a 60 anos; serviços 20 anos. Consequentemente, todos os subsistemas, a parte da estrutura principal, devem ser projetados para que possam ser trocados e renovados dentro da vida útil da construção, evitando assim, a demolição. Devem ser possíveis reformas periódicas, modificações maiores, substituição e melhorias durante a vida útil da construção.

- Material resistente ao fogo

Normalmente, as estruturas em concreto armado e protendido apresentam resistência ao fogo de 60 a 120 minutos ou mais. Para edificações comerciais, todos os tipos de componentes pré-moldados sem nenhuma medida especial de proteção atingem a exigência de resistência ao fogo de 60 minutos. Para outros tipos de edificações, a resistência ao fogo de 90 a 120 minutos é conseguida aumentando o cobrimento da armadura.

- Construção menos agressiva ao meio ambiente

A preservação do meio ambiente está se tornando um assunto globalmente importante. Desde que as necessidades mais básicas de qualquer geração são moradia e mobilidade, o setor da construção civil ocupa uma posição central nesse desenvolvimento. Mas, a maioria das atividades na área da construção civil ainda gera um impacto desfavorável sobre o meio ambiente em termos de consumo de energia, utilização não racional de recursos naturais, poluição, barulho e desperdício durante a produção.

No contexto de uma relação mais amigável ao meio ambiente, a indústria do concreto pré-moldado apresenta-se como uma alternativa viável: com uso reduzido de materiais até 45%; redução do consumo de energia de até 30%; diminuição do desperdício com demolição de até 40%. Muitas fábricas estão reciclando o desperdício do concreto, tanto o endurecido quanto o fresco, e futuramente as indústrias de pré-fabricados funcionarão como um sistema de produção fechado, onde todo material gasto é processado e utilizado novamente.

1.3. Adequação aos sistemas pré-moldados

Muitas tipologias de edificações são adequadas para a utilização da construção pré-moldada. Tipologias com planos ortogonais são ideais, pois apresentam um grau de regularidade e repetição em sua malha estrutural, nos vãos, no tamanho dos membros, facilitando a modulação. De qualquer modo, durante o projeto de uma edificação, seria sempre interessante conseguir padronização e repetição de soluções no sentido de se conseguir uma maior economia na construção, não apenas em relação ao concreto pré-moldado, mas em qualquer tipo de projeto.

Mesmo *"layouts"* irregulares de pavimentos podem vir a ser apropriados para pré-fabricação em várias ocasiões, se não totalmente ao menos parcialmente. É completamente errôneo pensar que o concreto pré-moldado não possui flexibilidade arquitetônica. Construções modernas de concreto pré-moldado podem ser projetadas de forma segura e econômica, com uma variedade de planos e com variações consideráveis em relação ao tratamento das elevações, para edifícios com vinte andares ou mais.

A pré-moldagem oferece recursos consideráveis para melhorar a sua eficiência estrutural. Vãos grandes e redução da altura efetiva podem ser obtidos usando concreto protendido para elementos de vigas e de lajes. Para construções industriais e comerciais, os vãos do piso podem chegar a 40 m ou mais. Para estacionamentos, o concreto pré-fabricado permite que mais carros sejam colocados na mesma vaga, por causa dos grandes vãos e das seções de pilares mais esbeltas. Isso oferece não apenas flexibilidade na construção, como também maior vida útil da estrutura, pois há maior adaptabilidade para novas utilizações. Dessa maneira, a edificação retém seu valor comercial por mais tempo.

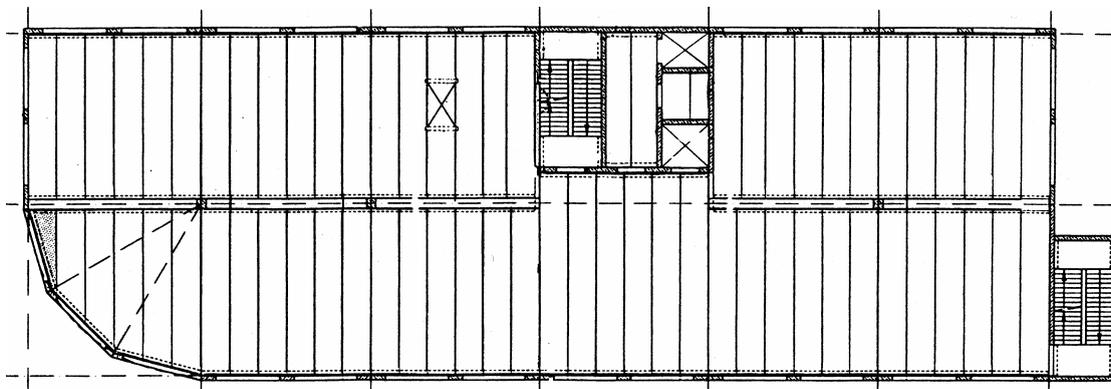


Figura 1.2 Pavimentos com *layouts* irregulares também são apropriados para a aplicação do concreto pré-moldado

1.4. Princípios básicos do projeto

Os projetistas devem considerar as possibilidades, as restrições e vantagens da utilização do concreto pré-moldado, seus detalhes, produção, transporte, montagem e estados de serviço antes de completar o projeto da estrutura pré-moldada. É muito importante a organização da equipe de projeto e a definição das rotinas de projeto. É recomendado que as empresas de pré-fabricados deixem informações referentes ao projeto e à produção disponíveis ao cliente, ao arquiteto, ao engenheiro responsável e a todos os demais projetistas e técnicos envolvidos, de modo a fornecer diretrizes unificadas para toda a equipe envolvida. Isto assegurará que todas as partes estão a par dos métodos adotados em todas as fases do projeto, levando ao máximo de eficiência e benefícios. Isso é muito importante nos estágios de produção e montagem, onde muitos engenheiros podem não estar familiarizados com alguns dos métodos usados.

É muito importante compreender que é possível se obter um melhor projeto para a estrutura pré-moldada, se a estrutura for concebida com a pré-moldagem desde o projeto preliminar e não meramente adaptada de um método tradicional de concreto moldado no local. As maiores vantagens em soluções pré-moldadas serão obtidas quando no estágio da concepção do projeto forem considerados os seguintes pontos:

a) Respeito à filosofia específica de projeto

Um dos objetivos mais importantes com este texto é explicar a filosofia específica de projeto de estruturas pré-moldadas, pois esta é a chave para se conseguir uma construção eficaz e econômica. As instruções básicas a serem seguidas são apresentadas no Capítulo 3:

- utilizar um sistema de contraventamento próprio;
- utilizar grandes vãos;
- assegurar a integridade estrutural.

b) Usar soluções padronizadas sempre que possível

A padronização é um fator importante no processo de prefabricação. Isso possibilita repetição e experiência portanto, custos mais baixos, melhor qualidade e confiabilidade, assim como uma execução mais rápida. A Padronização é aplicável nas seguintes áreas:

- modulação de projeto;
- padronização de produtos entre fabricantes;
- padronização interna para detalhes construtivos e padronização de procedimentos para produção e ou montagem.

c) Os detalhes devem ser simples

Um bom projeto em concreto pré-moldado deve envolver detalhes o mais simples possível. Devem ser evitados detalhes muito complicados ou vulneráveis.

d) Considerar as tolerâncias dimensionais

Produtos de concreto pré-moldados apresentam inevitavelmente diferenças entre as dimensões especificadas e as executadas. Essas variações devem ser admitidas e previstas no projeto desde o início, por exemplo:

- possibilidade de tolerâncias de absorção nas ligações (entre dois elementos pré-moldados, e entre os elementos pré-moldados e as partes moldadas no local)
- necessidade de almofadas (aparelhos) de apoio
- conseqüências causadas por curvaturas e diferenças em curvaturas
- tolerância de movimentação, causada por retração, expansão térmica, etc.

e). Obter vantagem do processo de industrialização

A produção de concreto pré-moldado deve se basear na industrialização. Isso é parcialmente influenciada pelo projeto, por exemplo:

- a pré-tração permite a produção de elementos em longas pistas de protensão;
- a padronização de componentes e de detalhes típicos garante a padronização do processo;
- a posição adequada dos detalhes, por exemplo: barras de espera etc., diminui o tempo dos serviços;
- simplicidade na descrição do projeto ajuda a evitar erros;
- modificações imprevistas no projeto prejudicam o planejamento da produção, etc.

1.5. Modulação

A modulação é um fator econômico muito importante no projeto e construção de edifícios, tanto para o trabalho estrutural como para o acabamento. Em pré-fabricação, isso é ainda mais marcante, especialmente em relação à padronização e economia na produção e execução. Modulação é geralmente bem estabelecida para componentes estruturais em construções pré-moldadas. Geralmente, o módulo básico é 3M (M= 100 mm), 12 M é uma medida muito usada. Os pilares internos são posicionados no centro do eixo modular. Os pilares de canto podem ser posicionados com a grade de eixo paralela à direção da face do pilar, mas essa solução é menos recomendada que a anterior. Na primeira solução, todas as vigas são do mesmo comprimento e a folga deixada no canto do elemento de piso pode ser facilmente preenchida com concreto moldado no local ou com placas de fechamento.

O comprimento dos elementos do piso é a princípio completamente livre. A modulação é certamente recomendada, mas terá pouco impacto no custo dos assoalhos. Contudo, possivelmente terá conseqüências na modulação das unidades da fachada. Núcleos centrais e poços de elevadores são posicionados de tal maneira que a modulação axial na direção do vão do piso coincida com a parte externa do núcleo. Na outra direção, a implantação deve, preferivelmente, ser semelhante a todos os elementos do assoalho do compartimento que têm o mesmo comprimento.

Para elementos da fachada, o ponto de vista é bem diferente. Indubitavelmente, a modulação é desejável, mas não deve constituir um obstáculo para o conceito da arquitetura do edifício. Cada projeto é desenhado individualmente e, sempre, novos moldes têm que ser feitos. A modulação em conexão com a produção industrial não é obrigatória, mas certamente influencia no custo dos elementos. A modulação deve ser considerada como uma ajuda, não como uma obrigação.

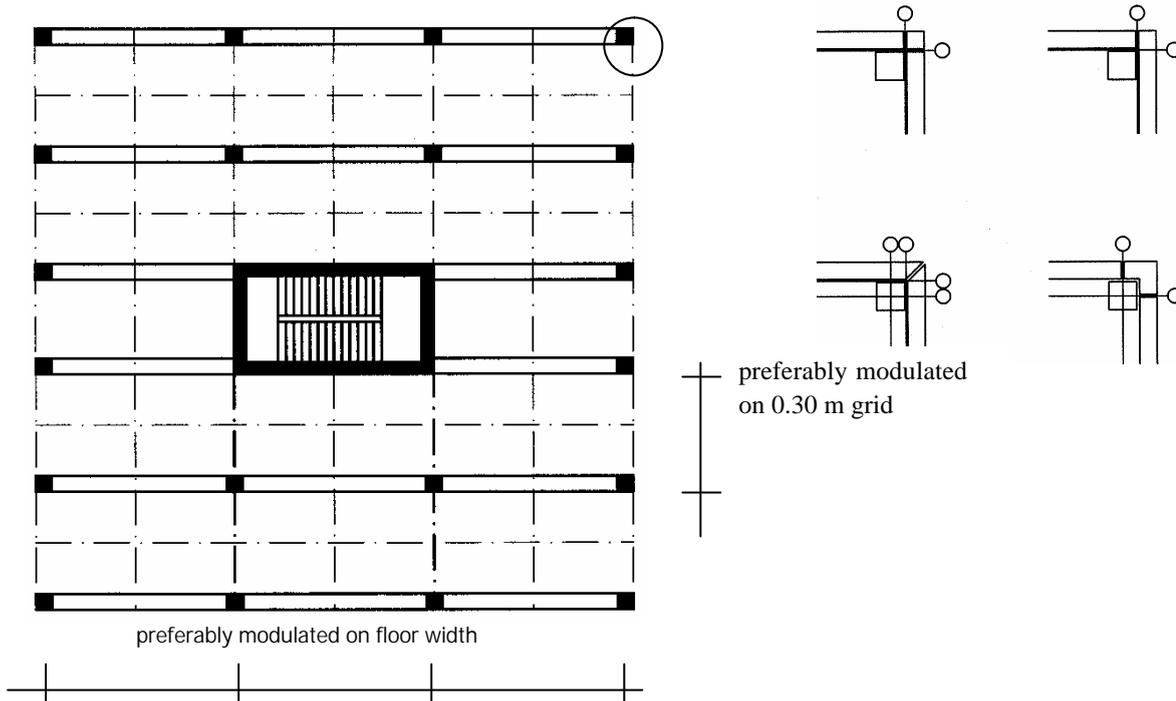


Figura 1.3 Exemplo de sistema modular para estruturas pré-moldadas

1.6. Padronização

A padronização de produtos e processos é amplamente difundida na pré-fabricação. Fabricantes de pré-moldados têm padronizado seus componentes adotando uma variação de sessões transversais apropriadas para cada tipo de componente. Geralmente, a padronização se limita a detalhes, dimensões e geometria das seções transversais, mas raramente ao comprimento das unidades. Produtos típicos padronizados são: pilares, vigas e lajes de piso.

Produtos padronizados são produzidos em formas preestabelecidas. O projetista pode selecionar o comprimento, dimensões e capacidade de carga dentro de certos limites. Essa informação pode ser encontrada em catálogos dos fabricantes.

Geralmente, os elementos de painéis têm espessura padronizada, mas a altura e largura são livres dentro de certos limites, é claro. As aberturas para as janelas e portas são, normalmente, livres. As fachadas são geralmente projetadas individualmente para cada projeto. Algumas vezes, os painéis de fechamento para edifícios de uso geral são disponíveis nas dimensões padronizadas.

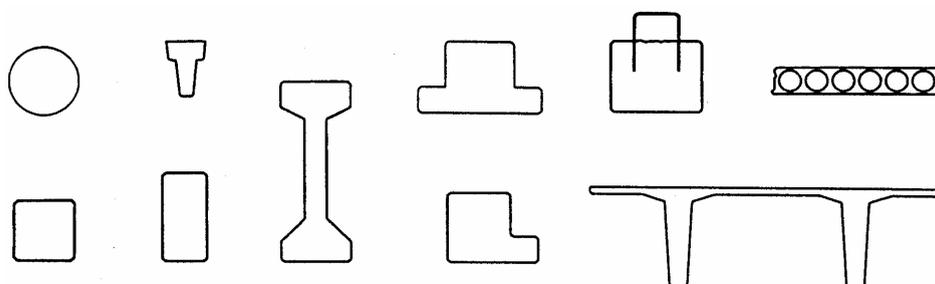


Figura 1.4 exemplos de padrões de seções transversais

A pré-fabricação também pode ser aplicada para componentes não padronizados. Além dos elementos da fachada já mencionados, elementos em concreto arquitetônico, a indústria de pré-moldados também

está produzindo componentes para outras finalidades, por exemplo: escadas, rampas; sacadas; elementos de formato especiais, etc.

A padronização constitui-se também num fator econômico importante no processo de pré-fabricação, por causa dos baixos custos das formas, industrialização do processo de produção com alta produtividade, larga experiência em execução, etc. A padronização tem também, um impacto benéfico em uma série de componentes idênticos, resultando em uma grande redução de trabalho por unidade produzida. Mas, os produtos não padronizados também têm papel importante no custo da produção.

Os fabricantes de pré-fabricados têm desenvolvido manuais com rotinas de projeto que auxiliam os projetistas a elaborarem e organizarem os projetos. A padronização de sistemas construtivos, componentes, ligações, etc., não significa apenas a industrialização da produção de componentes, mas a repetição de tarefas também significa evitar erros e experiências negativas.

1.6. Tolerâncias dimensionais

Sempre haverá diferenças inevitáveis entre as dimensões especificadas e as dimensões reais dos componentes e da construção final. Essas variações devem ser examinadas e permitidas. O concreto pré-moldado é geralmente fabricado com variações relativamente pequenas, mas os projetistas devem ter conhecimento da real variabilidade dimensional. É essencial considerar essa forma desde o início do projeto preliminar e discutir as tolerâncias o mais cedo possível com os fabricantes de pré-moldados.

As tolerâncias ocorrem na fábrica e no canteiro. As tolerâncias de produção na fábrica incluem variações dimensionais dos produtos, superfícies não lineares ou não planas, falta de ortogonalidade da seção transversal, variações na curvatura dos elementos pretendidos, posição de incertos, etc.

As tolerâncias no canteiro dizem respeito aos desvios dos eixos e dos níveis no início da construção. Além disto, os desvios de montagem durante o levantamento da estrutura ocorrerão com relação à posição e ao alinhamento entre os elementos.

Informações sobre as tolerâncias permitidas podem ser encontradas nos manuais das associações internacionais de pré-moldados, nas normas técnicas e em catálogos de fabricantes.

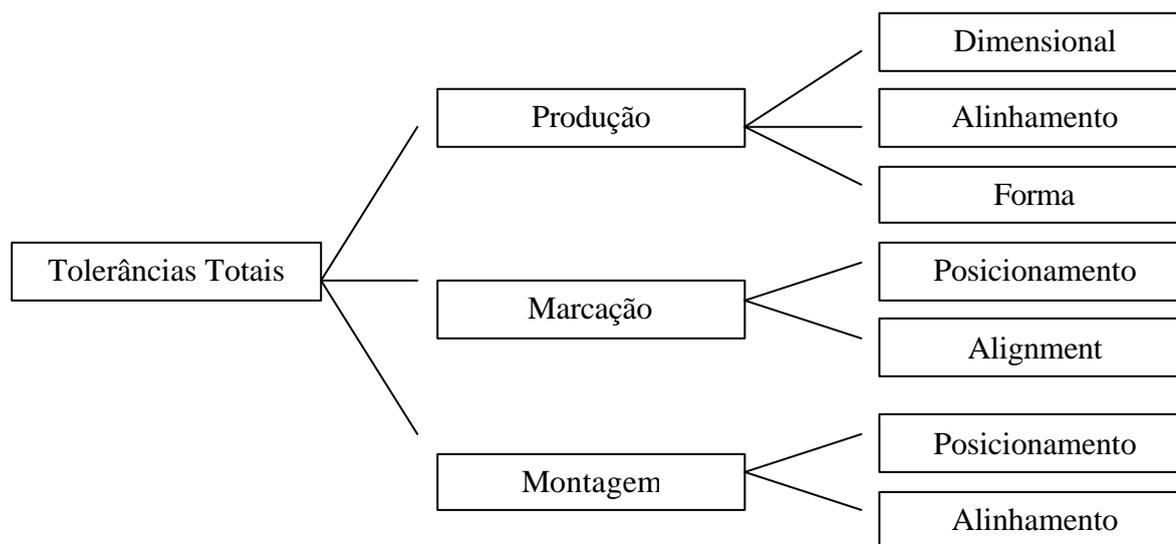


Figura 1.5 combinação das tolerâncias da construção

1.7. Instalações Prediais

As instalações podem ser parcialmente integradas nas unidades pré-moldadas. Por exemplos dutos, caixas ou aberturas para adaptação elétrica podem ser moldadas nos elementos de painéis. Outro exemplo são os tubos de água pluvial que são moldados dentro das colunas ou nos elementos de fachada. Grandes conduítes pré-fabricados para ventilação e outras tubulações podem ser instaladas dentro dos forros duplos ou ao longo de elementos em arco para fachada durante a montagem das unidades pré-moldadas.

Existem certas vantagens e também alguns problemas específicos. A maior vantagem é que a estrutura pré-moldada pode ser projetada de acordo com as necessidades específicas dos equipamentos de montagem. Os elementos podem ser fornecidos com uma variedade de nichos, as fixações podem ser moldadas nos componentes, e outras formas adicionais ainda estão disponíveis no canteiro depois da montagem da construção pré-moldada.

No caso da pré-moldagem todos os componentes e subsistemas que devem ser moldados dentro dos elementos pré-moldados devem ser planejados em estágios anteriores. Ambos, os serviços de engenharia e arquitetura devem estar prontos para definir os requisitos de projeto a fim de que os fabricantes possam preparar os seus projetos de produção. Daqui em diante, o estudo final das instalações precisam serem feitos antes do habitual, mas isso também pode ser visto como uma vantagem.

O processo de pré-moldagem também oferece certas vantagens em relação às técnicas de construção. Por exemplo: a massa térmica do concreto tem sido usada satisfatoriamente para armazenar energia térmica em pisos de laje alveolar, resultando em economia substancial em relação a equipamentos de aquecimento. Os alvéolos das placas de piso são utilizados para ventilação antes que o ar entre no ambiente. No inverno, o excesso de energia que vem das máquinas, da luz elétrica, da luz solar e dos usuários é estocada durante o dia e recuperada durante a noite. No verão, os pisos são resfriados durante a noite pelo ar de fora. Esse sistema permite uma economia de energia superior a 30 %. Esses alvéolos também podem ser utilizados para incorporar dutos e tubulações na parte interior dos pisos.

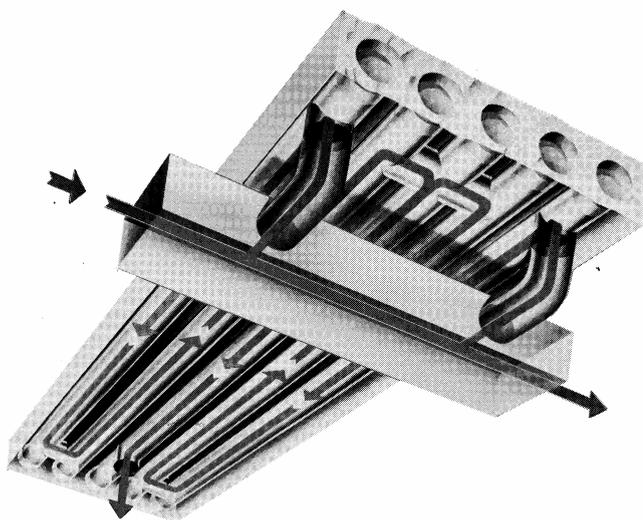


Figura 1.6 unidades de laje alveolar com labirinto interno para circular o ar.

Capítulo 2 - Sistemas Construtivos Pré-moldados

2.1. Considerações Gerais

Cada material ou sistema construtivo tem suas próprias características, as quais de forma maior ou menor influenciam a tipologia, o comprimento do vão, a altura da edificação, os sistemas de contraventamento, etc. Isso também ocorre no caso dos sistemas construtivos em concreto pré-moldado, não apenas em comparação com as estruturas de aço, de madeira e de alvenaria, mas também em relação ao concreto moldado no local. Teoricamente, todas as juntas e ligações entre os elementos pré-moldados deveriam ser executadas de modo que a estrutura pré-moldada tivesse novamente o mesmo conceito monolítico de uma estrutura moldada no local. Todavia, esta pode se tornar uma solução mais cara e trabalhosa, onde muitas das vantagens da pré-moldagem podem ser perdidas.

Para que todas as vantagens do concreto pré-moldado sejam potencializadas, a estrutura deve ser concebida de acordo com uma filosofia específica do projeto: grandes vãos, um conceito apropriado para estabilidade, detalhes simples, etc. Os projetistas devem, desde o início do projeto, considerar as possibilidades, as restrições e as vantagens do concreto pré-moldado, seu detalhamento, produção, transporte, montagem e os estados limites em serviço antes de finalizar um projeto de uma estrutura pré-moldada.

2.2. Sistemas estruturais

Considerando a indústria de pré-moldados, existe aparentemente um grande número de sistemas e soluções técnicas para as construções pré-moldadas. Entretanto, todos estes fazem parte de um número limitado de sistemas estruturais básicos, onde os princípios do projeto são semelhantes. Os tipos mais comuns de sistemas estruturais de concreto pré-moldados são:

- Estruturas aporricadas, consistindo de pilares e vigas de fechamento, que são utilizadas para construções industriais, armazéns, construções comerciais, etc.
- Estruturas em esqueleto, consistindo de pilares, vigas e lajes, para edificações de alturas médias e baixas, e com um número pequeno de paredes de contraventamento para estruturas altas. As estruturas em esqueletos são utilizadas principalmente para construções de escritórios, escolas, hospitais, estacionamentos, etc.
- Estruturas em painéis estruturais, consistindo de componentes de painéis portantes verticais e de painéis de lajes, as quais são usadas extensivamente para a construção de casas e apartamentos, hotéis, escolas, etc.
- Estruturas para pisos, consistindo de vários tipos de elementos de laje montados para formar uma estrutura do piso capaz de distribuir a carga concentrada e transferir as forças horizontais para os sistemas de contraventamento. Os pisos pré-moldados são muito usados em conjunto com todos os tipos de sistemas construtivos e materiais.
- Sistemas para fachadas, consistindo de painéis maciços ou painéis sanduíche, com ou sem função estrutural. Apresentam-se em todos os tipos de formato e execuções, desde o simples fechamento até os mais requintados painéis em concreto arquitetônico para escritórios e fachadas importantes.
- Sistemas celulares, consistindo de células de concreto pré-moldado e, algumas vezes, utilizados para blocos de banheiros, cozinhas, garagens, etc.

Muitos destes sistemas podem ser combinados numa mesma edificação. A seguir, serão apresentadas diretrizes gerais para escolha de sistemas estruturais.

2.2.1. Sistemas Estruturais em Esqueleto e Sistemas Aporticados

Sistemas aporticados e em esqueleto consistem de elementos lineares – vigas, pilares, de diferentes formatos e tamanhos combinados para formar o esqueleto da estrutura. Estes sistemas são apropriados para construções que precisam de alta flexibilidade na arquitetura. Isto ocorre pela possibilidade do uso de grandes vãos e para alcançar espaços abertos sem a interferência de paredes. Isto é muito importante para construções industriais, shopping centres, estacionamentos, centros esportivos e, também, para construções de escritórios grandes.

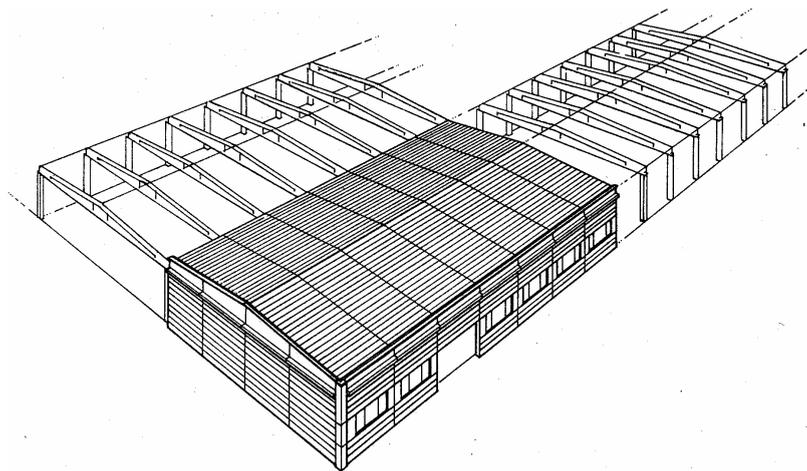


Figura 2.1 sistema de estrutura aporticada pré-moldada.

O conceito da estrutura em esqueleto oferece maior liberdade no planejamento e disposição das áreas do piso, sem obstrução de paredes portantes internas ou por um grande número de pilares internos.

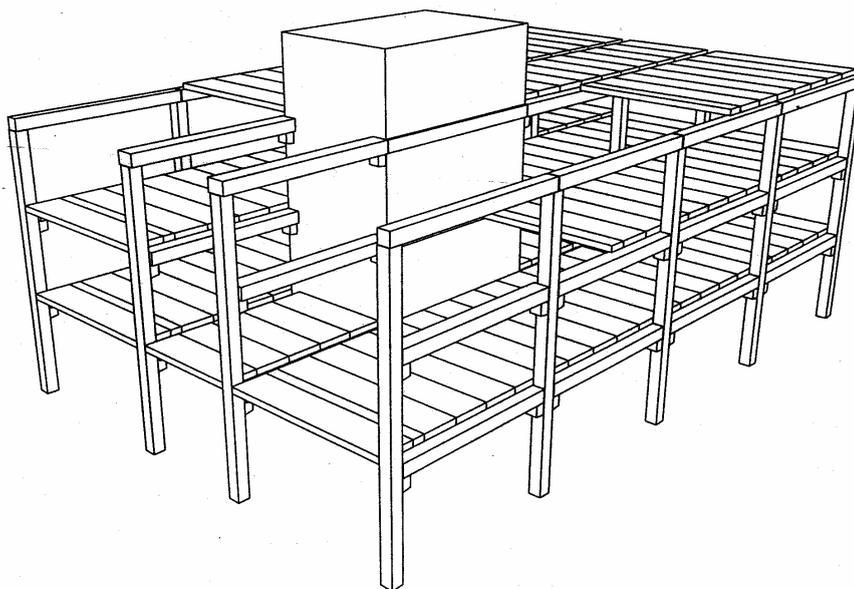


Figura 2.2 estrutura pré-moldada em esqueleto

Pelo fato de que nas estruturas em esqueleto o sistema portante ser normalmente independente dos subsistemas complementares da edificação, como os sistemas de fechamento, sistemas hidráulicos e elétricos, etc., é fácil adaptar as edificações para mudanças no seu uso, com novas funções e inovações técnicas.

O conceito de esqueleto também oferece uma grande liberdade para o arquiteto na escolha do sistema de fechamento. As elementos estruturais são bem adaptáveis para uma produção racional e processos de montagem.

2.2.2. Estruturas de painéis estruturais

Painéis pré-fabricados são utilizados para fechamentos internos e externos, para caixas de elevadores, núcleos centrais, etc. Os sistemas de painéis pré-fabricados são muito utilizados em construções residenciais, tanto para casas quanto para apartamentos. Essa solução pode ser considerada como uma forma industrializada de paredes moldadas no local, tijolos convencionais ou paredes de alvenaria. Os painéis pré-fabricados podem ser portantes ou de fechamento. A superfície dos elementos é lisa nos dois lados, e pronta para receber pintura ou papel de parede. Os sistemas de fechamento pré-fabricados oferecem as vantagens de rapidez na construção, de acabamento liso, de isolamento acústico e de resistência ao fogo. Sistemas modernos fazem parte das chamadas técnicas de construções abertas, os quais significam que a arquitetura é livre para criar o projeto de acordo com as exigências do cliente. A tendência é construir espaços abertos livres entre as paredes portantes e usar divisórias leves para definir o layout interno. Com essa técnica é possível mudar o projeto futuramente, sem maiores custos.

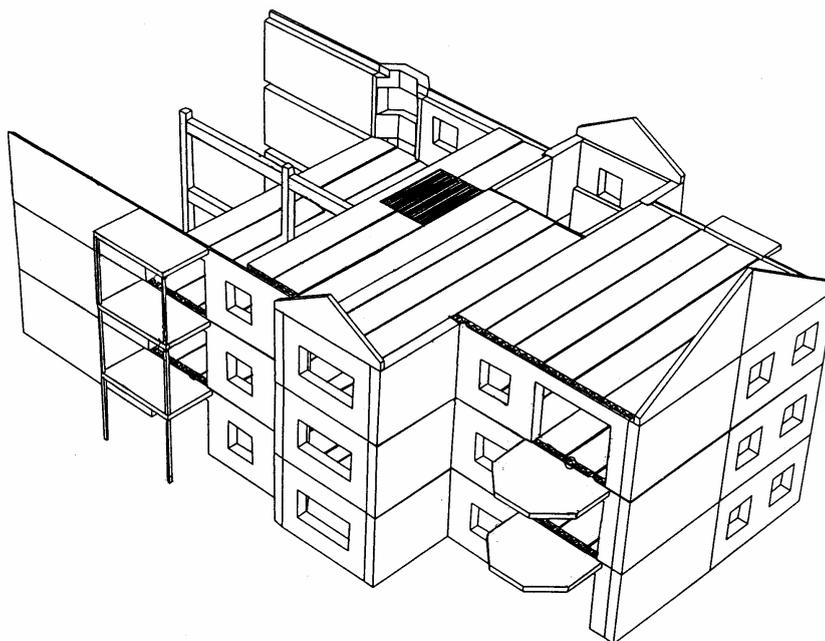


Figura 2.3 exemplo de estrutura de painéis combinada com estrutura em esqueleto.

2.2.3. Fachadas de concreto

Fachadas pré-fabricadas são adequadas para qualquer tipo de construção. Podem ser executadas em diversas cores, além do concreto cinza, e podem ser projetadas como elementos estruturais ou somente de fechamento. As fachadas que suportam carga têm função dupla, decorativa e estrutural. Estas suportam as cargas verticais dos pavimentos e dos painéis superiores. Os sistemas de fachadas com painéis estruturais constituem uma solução econômica, uma vez que isto dispensa o uso de pilares nas bordas e as vigas para apoio de pisos. Outra vantagem dos painéis estruturais o fato de que a construção fica protegida internamente num estágio bastante inicial da obra.

As fachadas arquitetônicas de concreto são geralmente empregadas em combinação com as estruturas de esqueleto, onde a estrutura interna é composta de pilares e vigas (figura 2.4). Uma tendência

moderna dos países Escandinavos é construir escritórios sem pilares internos, onde painéis alveolares protendidos para piso cobrem vãos de uma fachada para outra, acima de 16 a 18 m de comprimento.

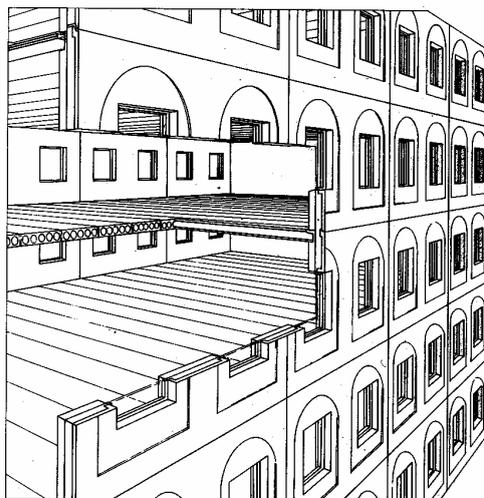


Figura 2.4 vista esquemática de um edifício com painéis estruturais de fachada e compridos painéis para piso

Os painéis não estruturais para fachadas possuem funções de fechamento e de acabamento. São fixados na estrutura, que pode ser de concreto pré-moldado, concreto moldado no local ou metálica. Informações detalhadas sobre as fachadas pré-fabricadas são apresentadas no Capítulo 8.

2.2.4. Sistemas pré-moldados para pisos

Os elementos pré-moldados para pisos são um dos produtos pré-moldados mais antigos. O mercado oferece uma variedade de sistemas para piso e cobertura pré-moldados, dos quais podemos distinguir cinco tipos principais: sistemas de painéis alveolares protendidos; sistemas de painéis com nervuras protendidas (seções T ou duplo T); sistemas de painéis maciços de concreto; sistemas de lajes mistas; sistemas de laje com vigotas pré-moldadas. As vantagens principais dos sistemas pré-moldados para pavimentos são a rapidez da construção, a ausência de escoramento, a diversidade de tipos, a alta capacidade de vencer vãos e a sua economia.

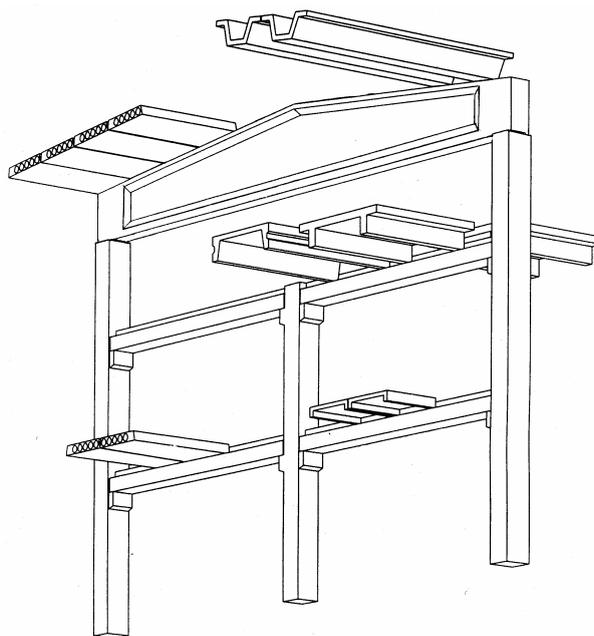


Figura 2.5 - Pisos pré-fabricados e coberturas de grande vãos para edifícios de uso geral.

Os pisos pré-moldados são utilizados extensivamente para todos os tipos de construção, não somente para estruturas pré-moldadas, mas também em combinação com outros materiais, por exemplo em estruturas metálicas, de concreto moldado no local, etc. A escolha do sistema de pavimentos varia para cada tipo de construção e de país para país, dependendo do transporte, das facilidades de montagem, disponibilidade no mercado, da cultura construtiva etc. A escolha do tipo mais apropriado dos elementos para pisos é definida por um número de fatores intervenientes: disponibilidade de mercado, disponibilidade de transporte, facilidade de montagem, custo de serviços, etc. Os critérios mais importantes são analisados a seguir:

a) capacidade portante para o vão

- Sistemas de lajes com nervuras protendidas são bastante apropriados para grandes vãos e cargas em construções industriais, armazéns, centros de distribuição, etc.;
- Sistemas de lajes alveolares protendidas são apropriadas para grandes vãos com cargas moderadas, para apartamentos, escritórios, estacionamentos etc.
- Sistemas de lajes com placas pré-moldadas são utilizadas para vãos menores com cargas moderadas, como por exemplo, residências, apartamentos, hotéis, etc.
- sistemas de lajes com vigotas pré-moldadas são principalmente utilizados para vãos e cargas menores, principalmente para residências.

b) Tipologias das faces inferiores dos elementos de laje

As faces inferiores dos elementos pré-fabricados para lajes de piso podem ser nervuradas ou planas, lisas ou rugosas para revestimento, com ou sem isolamento térmico. Os elementos com nervuras aparentes inferiores oferecem a possibilidade da embutimento de dutos e tubos entre essas nervuras. No caso das lajes alveolares protendidas, com faces planas, o uso combinado da protensão com as nervuras internas possibilita uma menor altura dos painéis. Entretanto, as juntas longitudinais aparentes entre os painéis alveolares nem sempre aceitável em construções residenciais. Sistemas de lajes com vigotas pré-moldadas necessitam de revestimento para acabamento. Finalmente, as lajes alveolares protendidas podem ter uma camada de isolamento térmico na face inferior. Essa solução é muito aplicada em regiões mais frias, onde se utiliza em residências com pisos elevados acima do solo sobre espaços abertos.

c) Peso Próprio

O peso próprio dos elementos para piso pode variar entre menos de 100 kg, como no caso das lajes com vigotas, para algumas toneladas, como no caso dos painéis em duplo T para grandes vãos. Assim, a escolha do sistema para piso depende das dimensões dos vãos no projeto e da capacidade dos equipamentos de montagem que estão disponíveis no mercado.

d) Isolamento acústico

A propriedade acústica é um critério muito importante na escolha do tipo de piso, especialmente em construções residenciais. A capacidade de isolamento de ruídos propagados no ar depende da massa dos painéis por m². Assim, os pisos de concreto podem facilmente atender aos requisitos mínimos de desempenho para isolamento de ruídos com propagação atmosférica. Entretanto, a situação é diferente da transmissão para ruídos causados por impactos, onde geralmente medidas adicionais devem ser consideradas, por exemplo no caso de mezaninos suspensos, etc.

e) Resistência ao fogo

Normalmente, os pisos pré-moldados de concreto armado ou protendido conseguem resistir ao fogo durante 60 a 120 minutos ou mais. Assim, todos os tipos de pavimentos de concreto podem resistir até 60 minutos, sem nenhuma medida especial. Para uma proteção de incêndio acima de 90 minutos é necessário aumentar o recobrimento de concreto das armaduras.

f) Custos com mão-de-obra

Nos países onde os custos da montagem são baixos, existe uma menor necessidade de se utilizar sistemas industrializados para pisos como são os casos dos painéis em duplo T ou dos painéis alveolares, comparados com sistemas mais tradicionais e com maior utilização de mão-de-obra, como os lajes com vigotas pré-moldadas. No mesmo contexto, também a rapidez na execução pode desempenhar um papel importante.

2.2.5. Sistemas celulares

As unidades celulares são algumas vezes utilizadas para algumas partes das construções, como por exemplo para os banheiros, cozinhas, garagens, etc. Esse sistema é vantajoso pois é rápido, a fabricação é industrializada até o término, e os equipamentos celulares podem ser montados completamente na fábrica. Entretanto, estes sistemas apresentam maiores dificuldades para transporte e menor flexibilidade arquitetônica.

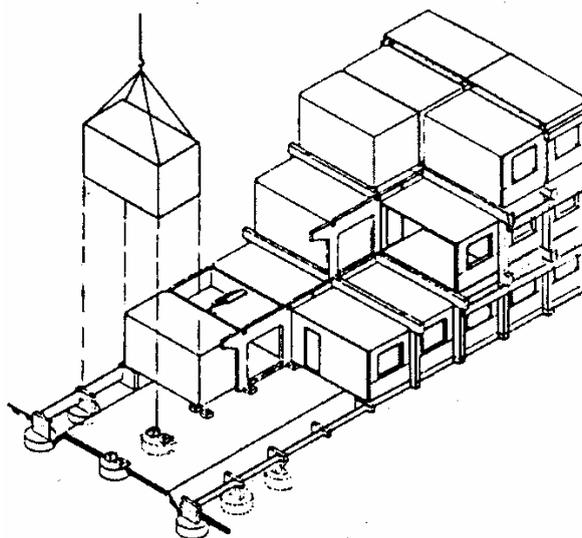


Figura 2.6 Esquema da construção com sistema celular.

2.3. Aplicação dos sistemas estruturais

A aplicação dos sistemas estruturais descritos acima em sistemas construtivos pré-moldados está intimamente ligada à tipologia da edificação, a qual depende muito da sua função: residências; escritórios; comércio; indústria, etc. A seguir são apresentados os critérios utilizados para escolha do sistema mais apropriado para tipologia de edificação.

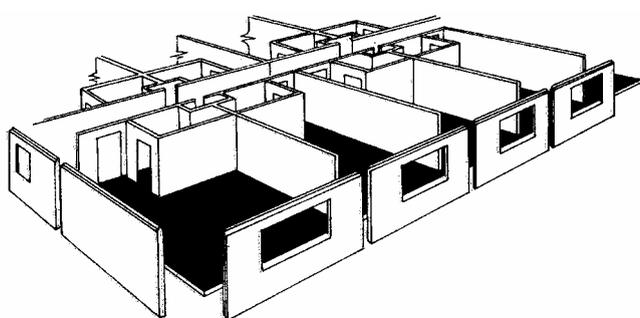
2.3.1. Residências e apartamentos

Residências e edifícios de apartamentos pré-fabricados são geralmente projetados com sistemas estruturais com painéis, onde uma parte dos painéis são estruturais e outra parte possui apenas função de fechamento. Esses sistemas são muito utilizados nos países do Norte Europeu. As fachadas são executadas com painéis sanduíches, com uma camada interna estrutural, com uma camada intermediária de isolamento entre 50 a 150 mm de espessura e com uma camada externa não portante de concreto arquitetônico.

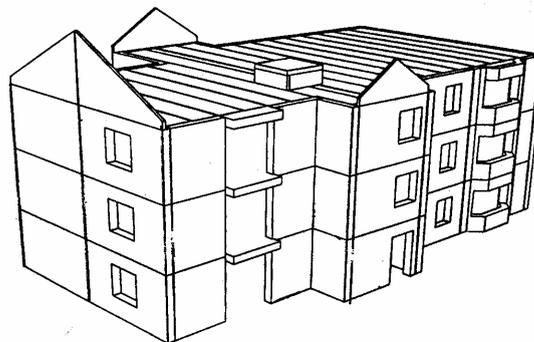
As vantagens do sistema são a rapidez de instalação, o bom isolamento acústico e resistência ao fogo, onde a superfície pode estar preparada para receber pintura. As inconveniências estão relacionadas com uma menor flexibilidade no projeto, onde é quase impossível fazer adaptações futuras.

Soluções mais racionalizadas utilizam painéis pré-fabricados só para os fechamentos externos entre apartamentos ou nas fachadas, assim como para os sistemas de lajes, cobrindo toda a largura da residência ou apartamento com vãos de até 11 m. Neste caso, as divisões internas podem ser feitas com materiais tradicionais, tais como blocos de gesso, blocos de alvenaria etc., ou com sistemas mais industrializados como as divisórias de gesso acartonado.

As estruturas de painéis podem ser projetadas com tipologias em paredes cruzadas (transversais) ou com paredes de contorno. No primeiro caso, as paredes que suportam carga pré-fabricadas são apenas fornecidas na direção perpendicular para a fachada frontal, e a blindagem exterior pode ser executada em concreto pré-fabricado, ou tijolos de alvenaria tradicionais, ou qualquer outro material da fachada. No segundo, as paredes pré-fabricadas só constituem o contorno total da construção, mais conhecidos como paredes para fachada frontal de apartamentos.



Sistema de paredes transversais com painéis de fachada



Sistema de painéis perimetrais

Figura 2.7 Edifícios de apartamentos com estruturas de paredes estruturais

Os sistemas de lajes para pisos normalmente se estendem na direção dos maiores vãos. Para os sistemas integrais de paredes, as lajes podem ser posicionadas em ambas as direções, mas a solução ideal é ter todos os elementos de laje em uma direção paralela.

Os seguintes tipos de elementos de piso são utilizados:

Em residências, os critérios de projeto são empregar vãos pequenos a moderados (4 a 11m), com sobrecarga leve ($\pm 2 \text{ kN/m}^2$), com sistemas de lajes com as faces inferiores planas e lisas, com elementos já acabados ou com revestimento, e resistência ao fogo de aproximadamente 60 min. Juntas longitudinais aparentes não são muito aceitas. Contudo, há técnicas de preenchimento das juntas, onde se consegue uma superfície final lisa. Outros critérios para a escolha dos tipos de sistemas para pisos são as séries de casas no mesmo contrato, o qual pode variar entre 1 até mais de 100 casas, o equipamento de montagem disponível, a presença de grandes aberturas nos pisos, tradição construtiva, etc.

A solução mais simples para pisos é utilizar as lajes com vigotas pré-moldadas. Os elementos são leves e fáceis de serem montados, a superfície inferior da laje é áspera e necessita de reboco. O escoramento durante a execução depende do tipo da vigota. Qualquer layout para o pavimento pode ser conseguido, onde a modulação não é sempre necessária, mas desejável. Esse tipo de piso é bastante empregado no Brasil e em outros países onde o custo da mão-de-obra é baixo na construção civil.

Pequenos elementos de lajes alveolares em concreto armado ou protendido são provavelmente os sistemas de piso mais utilizados para residências na Europa. Essa solução é mais industrializada que as lajes com vigota e pode ser montada com equipamentos leves, sendo frequentemente utilizado um caminhão com guindaste com braço mecânico. O *layout* do pavimento deve ser, preferencialmente, retangular e também há a necessidade de reboco. Não são necessários escoramentos intermediários durante a construção.

As placas grandes para pisos em concreto armado só são empregadas para importantes séries de casas porque é necessário o uso de equipamentos de suspensão de maior capacidade. As placas precisam de apoio temporário para o preenchimento no local de uma camada de concreto. a superfície inferior da laje é lisa, e o layout do pavimento não precisa ser totalmente retangular. Aberturas para tubulações, escadas, etc. podem ser planejados em qualquer local.

Os elementos do laje alveolar protendida de 1.20 m de largura são apenas empregados para casas em países industrializados, com uma grande tradição em pré-fabricados. As vantagens estão na montagem seca e rápida, mas também na capacidade de vencer maiores vãos. Nos países do Norte Europeu, a

presença da juntas longitudinais na superfície inferior da laje não significa problema algum. A superfície é sempre acabada com uma pintura granular (texturizada).

Em edifícios de apartamentos o volume do empreendimento é geralmente grande o suficiente para instalar uma grua (guindaste alto), e a tipo de piso escolhido será normalmente maior e mais pesado do que no caso de residências. O nível da carga é moderado. Além disso, a esbeltez do piso, o tipo da superfície inferior do elemento de laje e a rapidez da montagem são fatores com um papel importante na escolha do sistema de piso. No caso de edifícios de apartamentos, os sistemas mais apropriados serão as lajes alveolares protendidas e as estruturas mistas para pisos com painéis de concreto.

2.3.2 Edifícios para Escritórios

Normalmente, os modernos edifícios para escritórios requerem alto grau de flexibilidade e adaptabilidade, onde o espaço interior deve ser livre. Geralmente, os edifícios de escritório são concebidos como sistemas de estruturas com núcleos de contraventamento. As fachadas podem ser executadas em qualquer material. As fachadas pré-fabricadas em concreto arquitetônico podem ou não ser portadores de carga. No caso das paredes estruturais, a solução mais clássica é o uso de painéis sanduíche na fachada, enquanto no caso das paredes só para fechamento, emprega-se mais os painéis maciços de concreto.

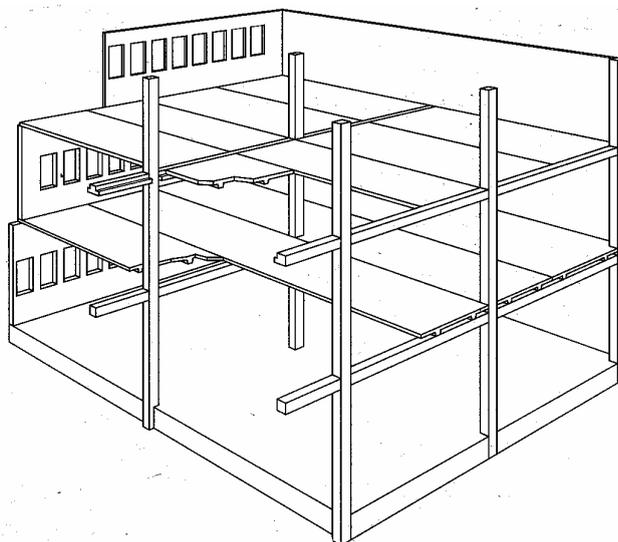


Figura 2.8 exemplo de um edifício para escritórios com estrutura em esqueleto e com fachadas em concreto arquitetônico.

A tendência atual para edifícios de escritórios é criar grandes espaços internos com os vãos dos pisos de até 18 a 20 m. Quando a largura total do edifício se encontra dentro dessas dimensões, a solução mais apropriada é utilizar paredes estruturais nas fachadas, onde os elementos de piso estão apoiados diretamente nos elementos de fachada. Para pavimentos muito largos, o mesmo sistema é completado por uma ou mais linhas de vigas e pilares internos. Os núcleos de contraventamento são executados com painéis pré-moldados.

As lajes alveolares protendidas compõe o sistema para piso mais apropriado para edifícios de escritório, devido à sua grande capacidade de alcançar grandes vãos e por permitir pisos com menores espessuras nos pavimentos. É uma prática comum empregar um elemento de laje alveolar com 400 mm de espessura para um vão de 17 m para uma sobrecarga de 5 kN/m². Elementos de laje com 500 mm de espessura permitem vãos de 21 m para a mesma sobrecarga, mas esse tipo de elemento ainda não está disponível no mercado em qualquer lugar. A redução da altura da construção é na verdade um parâmetro muito importante para edifícios de escritórios, especialmente em áreas urbanas.

Para vãos menores, com até 6 m, sistemas mistos com elementos de placa também são empregados. Todavia, eles precisam de escoramento durante a fase da construção.

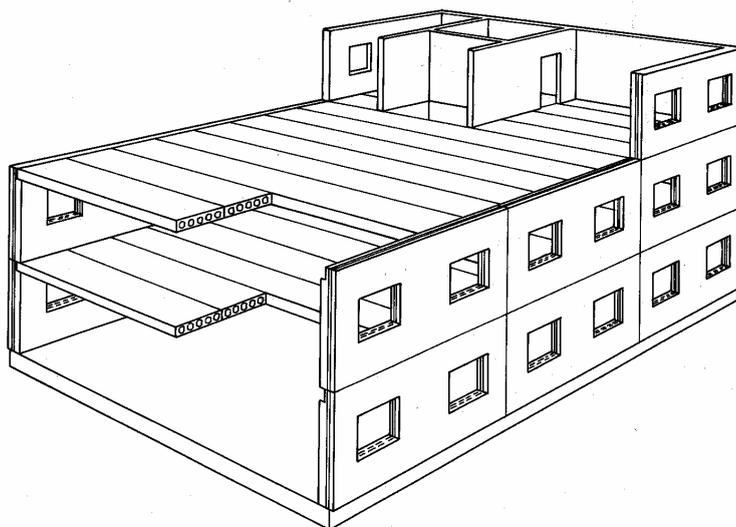


Figura 2.9 edifício de escritório com grandes vãos.

2.3.3. Hotéis e hospitais

As edificações para hotéis e hospitais possuem, geralmente, grandes dimensões em planta, podendo ter vários pavimentos. Por esta razão, permite-se a utilização de sistemas mais industrializados como sistemas estruturais com travess planas e sistemas estruturais em paredes portantes. Os vãos para os pisos são grandes e a sobrecarga é da ordem de 5 kN/m^2 . Neste caso, é indicado o uso de laje alveolar ou elementos de laje com nervuras. Os sistemas de fechamento para as fachadas são análogos aos utilizados nos edifícios para escritórios.

2.3.4. Prédios escolares

As construções escolares são caracterizadas com largas para vãos que variam de moderada para grande, que variam entre $\pm 8/12 \text{ m}$ para escolas para mais de 24 m para auditórios em universidades, onde a sobrecarga é de 3 a 4 kN/m^2 . As construções escolares são executadas tanto com estrutura em esqueleto quanto em sistemas em parede estrutural. As universidades são geralmente construídas com estrutura em esqueleto. As fachadas são caracterizadas por suas grandes aberturas para janelas, sem que os painéis podem ser ou não ser estruturais.

Nos sistemas para pisos são empregados elementos em concreto protendido, como as lajes alveolares e os painéis em duplo T. Esse últimos são indicados para vãos maiores. Os pisos para auditórios em universidades podem ser projetados com degraus (tipo arquibancada). Para apoio deste tipo de piso, existem soluções apropriadas em concreto pré-moldado, como por exemplo as vigas inclinadas com degraus na parte superior (também conhecida como "viga-jacaré").

2.3.5. Edifícios industriais e armazéns (galpões de uso múltiplo)

Normalmente, as construções industriais requerem vãos maiores e soluções simples para coberturas e fachadas. As construções são normalmente projetadas com sistemas com travess aporticadas, onde a estabilidade é conseguida pelo engastamento dos pilares nas fundações. Pisos intermediários (mezaninos) podem aparecer em toda a construção ou em partes da mesma. Neste caso, os vãos variam entre $8/12 \text{ m}$ e 15 m ou mais, onde a sobrecarga varia entre 5 kN/m^2 até $1.5/2 \text{ kN/m}^2$. Para a combinação para os maiores vãos e sobrecargas, os elementos de painéis nervurados protendidos em duplo T são a única solução. Para outros casos, também utiliza-se elementos de laje alveolar protendida.

Os sistemas para cobertura podem ser em concreto, concreto celular ou materiais leves como telhas corrugadas de cimento com fibras ou metálicas. A escolha para o tipo de cobertura depende basicamente das condições climáticas. Em regiões frias, predominam os painéis nervurados de concreto, principalmente devido à sobrecarga de neve, mas também por requisitos de durabilidade. Por outro lado, em países quentes a cobertura de concreto é mais interessante do que a metálica devido à sua capacidade térmica.

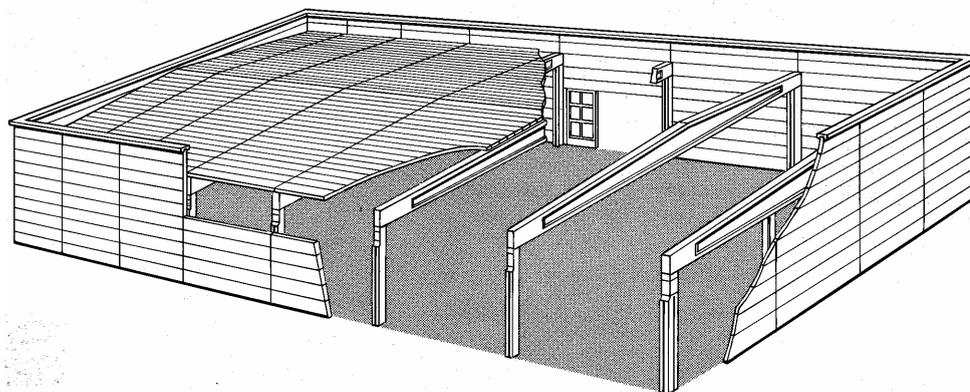


Figura 2.10 exemplo de construção industrial com traves aporticadas

Uma solução alternativa para o sistema de trave aporticada consiste em empregar um elemento de laje nervurada em duplo T com mesa em duplo caimento para telhado duas águas, sendo que este elemento apoiado diretamente em painéis estruturais na fachada (Figura 2.11). Essa solução oferece grandes espaços internos abertos, com vãos de até 32 m, com comprimento modulado em 2,4 m. O pé direito pode alcançar até 8 m. Os pisos intermediários podem ser utilizados em partes ou em toda a planta da construção. Os painéis nervurados protendidos em duplo T são caracterizados por sua leveza e por vencerem grandes vãos.

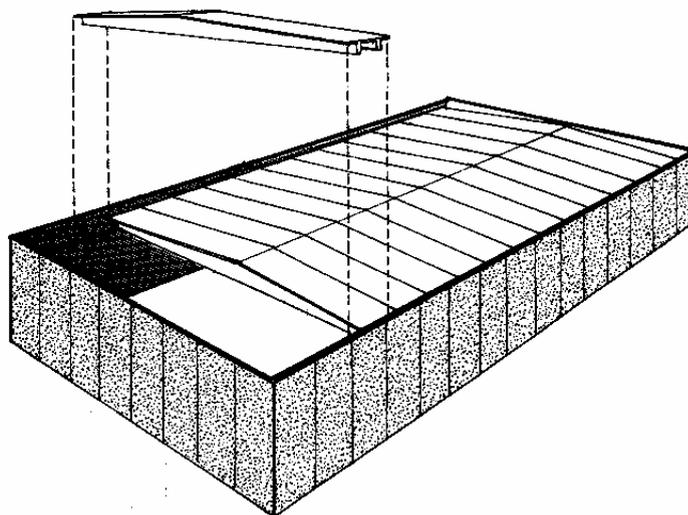


Figura 2.11 grande espaço aberto com paredes portantes e cobertura de laje com elemento em duplo caimento.

2.3.6. Edifícios comerciais

Em geral, as construções comerciais também requerem grandes áreas livres de pilares. Este tipo de construção emprega, normalmente, os sistemas estruturais aporticados.

2.3.7. Estacionamentos

Em edificações para estacionamentos, os requisitos de projeto são grandes vãos abertos com poucos pilares internos, redução da altura da construção total, estética, etc. Este tipo de construção emprega geralmente sistemas de estrutura em esqueleto. Existem soluções alternativas, como no caso do estacionamento dividido em níveis, com rampas retas entre os pisos intermediários, que constituem a área de estacionamento (Figura 2.12).

A estabilidade global é assegurada pela ação em balanço dos pilares engastados na base em conjunto com a ação enrijecedora dos núcleos de contraventamento formado pelas caixas de escada e elevadores. Os vãos para os sistemas de pisos variam entre 12 a 16 m, onde são utilizadas lajes alveolares e painéis em duplo T. As fachadas podem ser de qualquer material, como por exemplo com elementos pré-moldados formando arcos arquitetônicos.

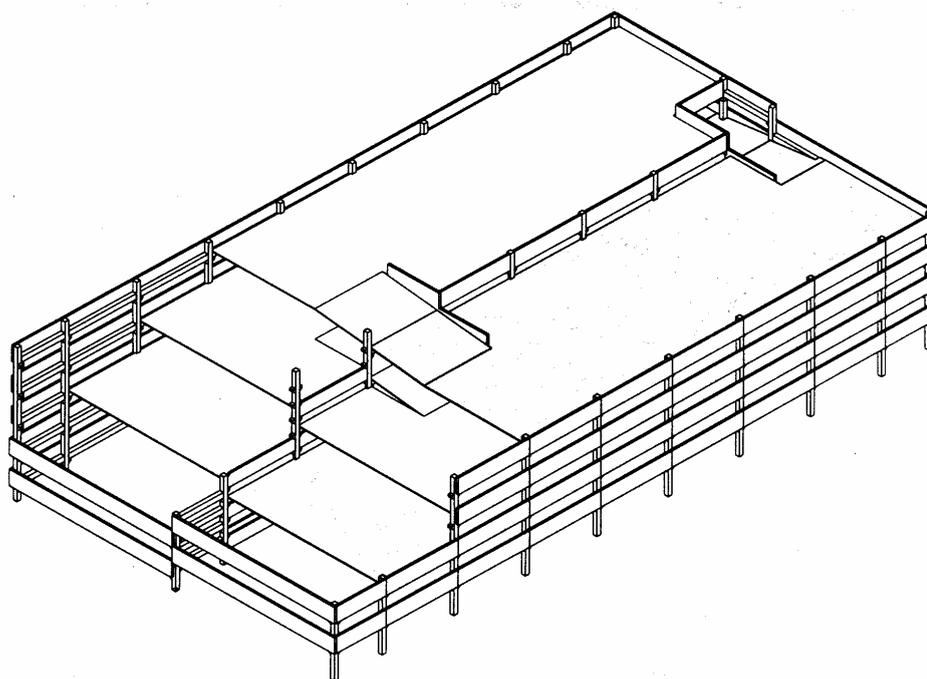


Figura 2.12 estacionamento dividido em níveis

2.3.8. Complexos esportivos

Existem diferentes tipologias para complexos esportivos, cada uma com suas próprias exigências de projeto. As seguintes soluções em concreto pré-moldado são empregadas em complexos esportivos:

- Saguões grandes são projetados com estruturas com traves aperticadas. A largura máxima destas traves é de aproximadamente 40 m.
- Arenas e arquibancadas são normalmente compostas por sistemas em esqueleto combinadas com paredes estruturais. Os sistemas de pisos são compostos por elementos protendidos de laje alveolar ou em duplo T.

As coberturas em balanço para arquibancadas podem ser compostas por vigas protendidas, fixadas no topo dos pilares por meio de chumbadores especiais parafusados (chumbadores rosqueados protendidos tipo *Dywidag* ou similares). As vigas para as arquibancadas possuem dentes sobre o seu topo para apoiar os elementos de piso. Os elementos de piso são geralmente projetados em elementos da laje alveolar com espessura reduzida.

Há exemplos para pista de esqui no gelo, em que a laje da fundação da pista é feita com elementos de laje alveolar na fundação das vigas.

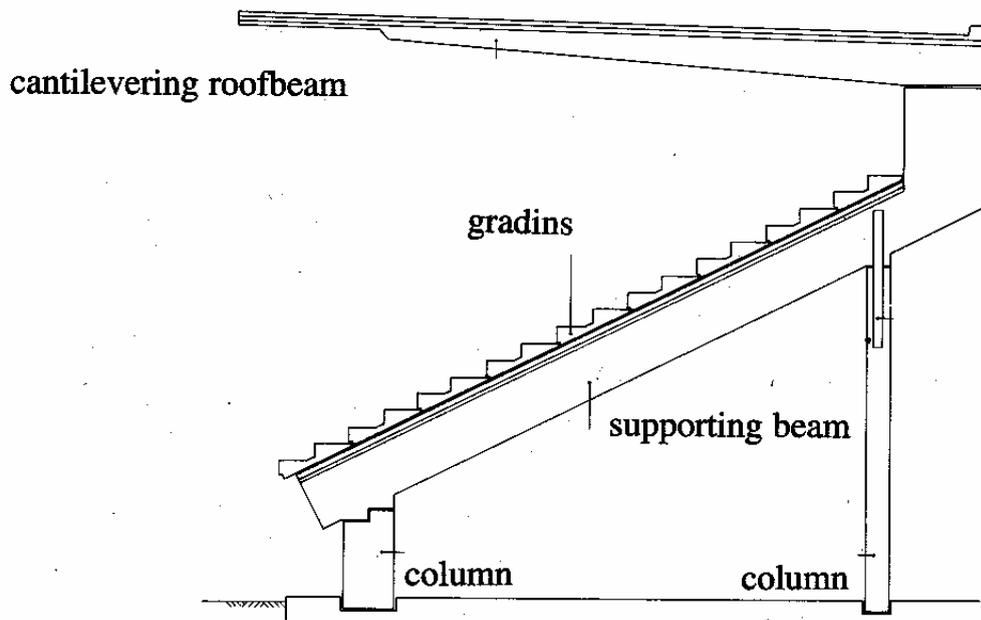


Figura 2.13 estrutura para arquibancada em concreto pré-moldado

Capítulo 3 - Estabilidade Estrutural

3.1. Introdução

No capítulo 2 foi destacada a importância de uma filosofia apropriada para o projeto das estruturas pré-moldadas, as quais possuem um comportamento diferente das estruturas moldadas no local, devido principalmente à presença das ligações, modificando o conceito da estabilidade da estrutura.

As estruturas de concreto moldadas no local se comportam como pórticos tridimensionais. A continuidade dos deslocamentos e o equilíbrio de momentos, forças cortante e normal, são conseguidas pela continuidade das armaduras através das juntas e ligações, onde estas possuem a mesma resistência dos elementos estruturais. Entretanto, no caso das estruturas em concreto pré-moldado, o conceito de pórticos tridimensionais não é aplicado, pois é difícil conseguir ligações resistentes à flexão com rigidez suficiente para promover um comportamento de pórtico. Neste caso, a estabilidade das estruturas pré-moldadas deve ser garantida por meio de sistemas apropriados de contraventamento, de fácil execução no canteiro: engastamento dos pilares nas fundações, rigidez horizontal das paredes de cisalhamento, diagonais de contraventamento, ação de pórticos planos, efeitos de diafragmas das lajes de piso e de cobertura, e combinações dos sistemas anteriores.

Os seguintes conceitos para estabilidade estrutural são principalmente usados em:

- estruturas não contraventadas (ou estruturas deslocáveis), onde a estabilidade é fornecida pela ação dos pilares engastados na base na estrutura em esqueleto, com possível combinação com diagonais de contraventamento ou com a utilização de pórticos 2-D;
- estruturas contraventadas, onde a resistência contra ações horizontais é conseguida pela ação de paredes transversais de cisalhamento (contraventamento), por caixas de elevadores e núcleos centrais. Outros elementos da estrutura pré-moldada são estabilizados (contraventados) na direção horizontal pelos componentes de estabilização (como pelo efeito de diafragma das lajes de piso). O conceito total para estabilidade horizontal assegura que as ações horizontais atuantes em qualquer ponto da estrutura seja transferida para os componentes de estabilização e, depois para as fundações.

Os pilares, que são engastados nas fundações por meio de ligações resistentes à flexão, irão atuar como uma haste em balanço quando submetida às ações horizontais. A ação de haste em balanço dos pilares engastados na base pode ser utilizada para estabilização de estruturas pré-moldadas de baixa altura. Um efeito de estabilização semelhante sobre a estrutura pode ser conseguido em caixas de escadas e em núcleos estruturais formados por painéis.

Quando a estrutura se comporta como um pórtico, a estabilidade é então obtida pela continuidade da flexão e do cisalhamento entre os pilares e vigas. Este sistema é normalmente empregado em estruturas com pórticos bidirecionais, para fornecer rigidez complementar para uma estrutura esbelta não contraventada ou em esqueleto, ou no caso de ações horizontais intensas, como por exemplo em zonas sísmicas.

No caso de panos de paredes estruturais, é fácil de se conseguir o modo de flexão no plano destas paredes, bem como a mobilização aos esforços de cisalhamento nas juntas entre painéis e na base da parede, promovendo uma alta rigidez no plano da parede, sendo isto conhecido como "ação da parede de cisalhamento" (ou paredes de enrigecimento ou paredes de contraventamento).

Para transferir as ações horizontais sobre fachadas para componentes de contraventamento verticais, utiliza-se a rigidez no plano horizontal das lajes de piso e de cobertura. Essa ação é conhecida como "ação diafragma". Estes diafragmas deveriam ser considerados como partes essenciais do sistema de contraventamento. Pela ação de diafragma, a força horizontal será distribuída entre os componentes de contraventamento verticais.

Quando um componente de contraventamento, como uma parede, um pórtico plano ou uma laje de piso, é composto de muitos elementos pré-moldados, a interação entre os elementos deve ser assegurada por meio de um projeto apropriado das ligações entre estes elementos. O conceito dos componentes de contraventamento será apresentado com maiores detalhes nas sessões seguintes.

3.2. Estruturas Pré-Moldadas não Contraventadas (Estruturas de Nós Móveis)

3.2.1. Pilares agindo como vigas em balanço

Os pilares e painéis de paredes pré-moldados podem ser engastados nas fundações. Isso é facilmente conseguido em solos resistentes ou com a utilização de estacas de fundação. As soluções básicas para se conseguir ligações resistentes à flexão entre as bases dos pilares e as fundações são apresentadas na figura 3.1. No caso de cálices de fundação, a solidarização entre o pilar e a fundação é conseguida por meio de preenchimento com graute ou concreto nos vazios entre o pilar e as faces internas do cálice. Em uma outra solução, armaduras longitudinais são deixadas como esperas da fundação para serem encaixadas em nichos (ou bainhas) no do pilar, os quais serão posteriormente preenchidos com graute. No caso de ligações pilar-fundação parafusadas, são utilizadas chapas de base ou cantoneiras, as quais são soldadas à armadura longitudinal do pilar, anterior à pré-moldagem, as quais serão parafusadas nos chumbadores deixados nas bases das fundações.

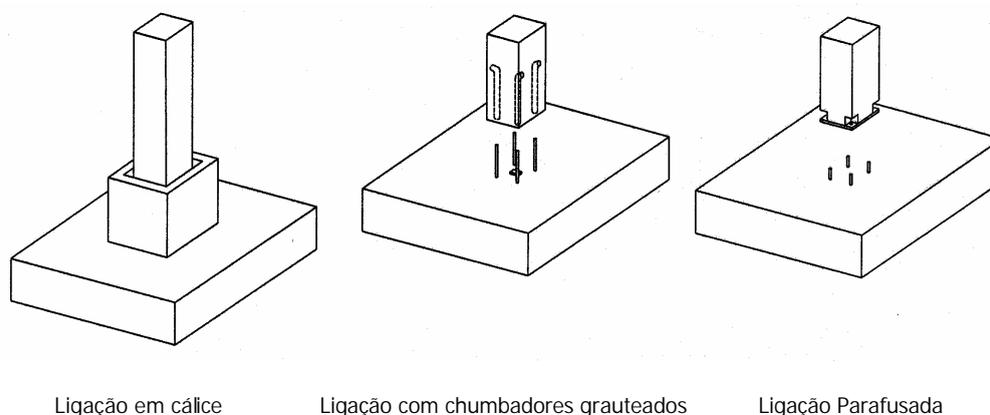


Figura 3.1. ligações engastadas entre as pilares pré-moldados e fundações

A ligação viga-pilar é geralmente executada com chumbadores verticais e almofada de elastômero agindo como uma rótula. A figura 3.2 mostra a deformada aproximada de uma estrutura com três pavimentos com pilares contínuos engastados na base e ligações viga-pilar articuladas. Na realidade, ligações viga-pilar com chumbadores não são completamente rotuladas, mas semi-rígidas, por causa da capacidade de rotação limitada no estado limite último. Contudo, os métodos de cálculo para estruturas pré-moldadas no regime pós elástico ainda não são inteiramente compreendidos para serem considerados nos projetos estrutura.

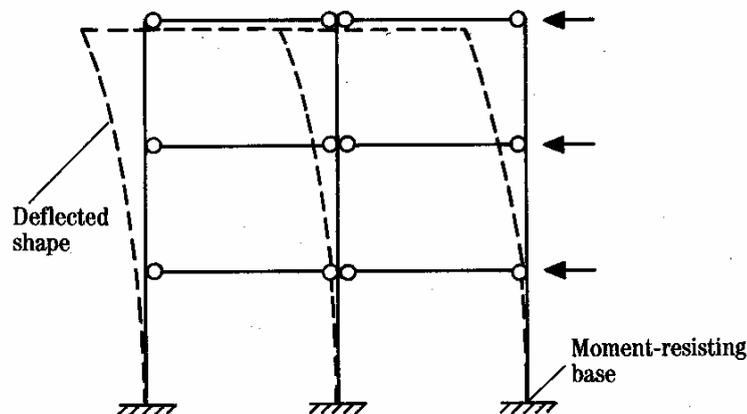


Figura 3.2 configuração deformada da estrutura não contraventada.

3.2.2. Efeito de pórtico

Quando o engastamento dos pilares nas fundações não fornecem a rigidez necessária para a estrutura, como por exemplo no caso de estruturas esbeltas em esqueleto ou em traves planas, ou para efeitos horizontais excessivos em terremotos, a rigidez horizontal adicional pode ser obtida por meio de ligações viga-pilar rígidas. Essas ligações não precisam ser posicionadas sistematicamente em todas as interseções viga-pilar, mas devem ser colocadas em locais adequadamente escolhidos. Outra solução seria utilizar diagonais metálicas de contraventamento em um número limitado de aberturas na fachada da estrutura. Maiores detalhes sobre possíveis soluções serão fornecidas no capítulo 5.

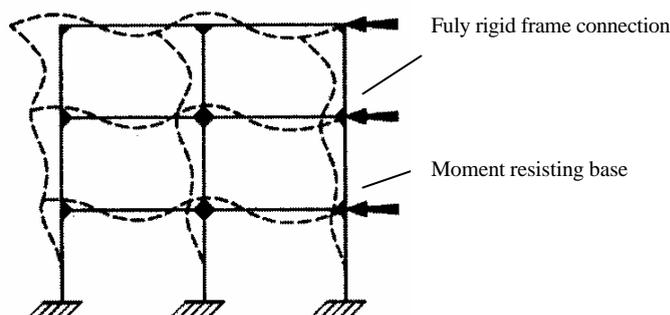


Figura 3.3 Configuração deformada de uma estrutura com ligações rígidas.

3.3. Estruturas Pré-Moldadas Contraventadas

Em construções com mais de três pavimentos, os deslocamentos horizontais podem ser excessivos, sendo necessário empregar sistemas adicionais de contraventamento. Assim, paredes de contraventamento, núcleos centrais ou outras formas de enrijecimento são empregados. A prática usual é conferir a função de estabilidade para os poços de elevadores, caixas de escada ou paredes internas de cisalhamento, e interligar o resto da estrutura através da ação de diafragma das lajes de piso e cobertura. Neste caso, a estrutura pode ser classificada como contraventada (com nós fixos) (fig. 3.4), e as fundações podem ser articuladas. Os elementos de contraventamento são tão robustos que a rigidez dos elementos do pórtico e as ligações não são importantes. Assim, os momentos fletores devidos aos deslocamentos são pequenos e os pilares podem apenas fletir entre os pavimentos, como barras bi-rotuladas.

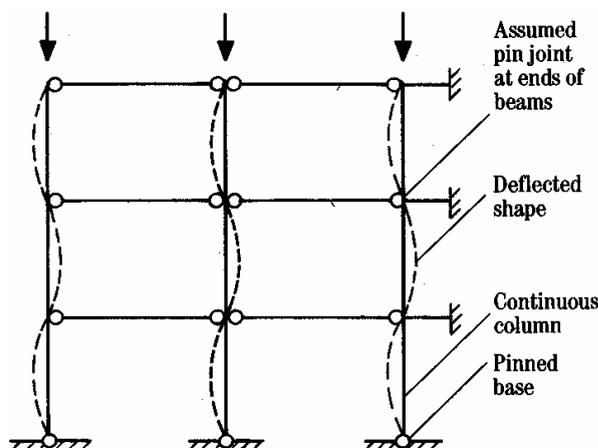


Figura 3.4 Deformada principal da estrutura contraventada

3.3.1 Ação de parede de cisalhamento (contraventamento)

As paredes de concreto são muito rígidas no seu plano. Por esta razão, elas são muito empregadas tanto para estruturas pré-moldadas como para estruturas de concreto moldadas no local, para enrigecer a estrutura contra as ações horizontais.

Paredes de contraventamento para edifícios com múltiplos pavimentos são formadas por painéis que são conectados de forma que a parede toda atue como uma única viga rígida em balanço. A interação entre os painéis é assegurada pelas ligações e sistemas de tirantes que transferem as forças de cisalhamento, de tração e de compressão. Se necessário, armaduras longitudinais de tração são utilizadas para fixar as unidades de parede junto a fundação e para fornecer continuidade entre sucessivas unidades de painéis altos, se não existe suficiente carregamento vertical para estabilizar estes elementos de painéis.

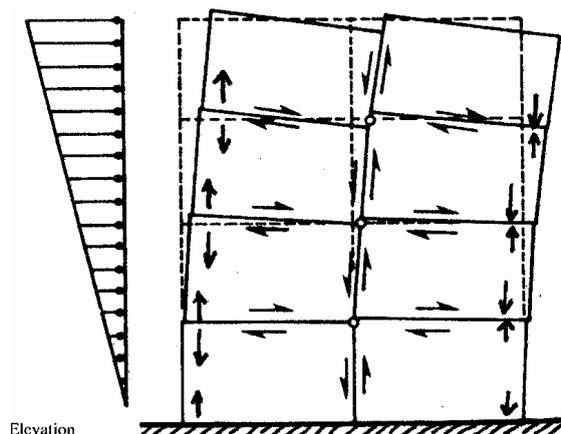


Figura 3.5 Ação nos planos das paredes pré-moldadas

3.3.2 Núcleos centrais e Poços de Elevadores

Os núcleos centrais freqüentemente promovem a estabilidade lateral para estruturas com múltiplos pavimentos, podendo ser combinados com as paredes de cisalhamento. Os núcleos centrais podem ser moldados no local ou pré-moldados. A solução pré-moldada mais comum é compor o núcleo com quatro ou mais elementos de painéis (fig. 3.6) conectados entre si por meio de juntas verticais capazes de resistir as forças de cisalhamento.

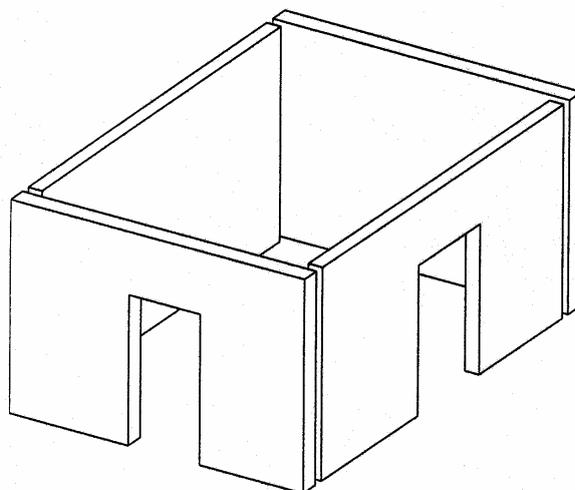


Figura 3.6 exemplo de núcleo central pré-moldado

3.4 Ação de diafragma das lajes de piso

Nas construções pré-moldadas, as forças horizontais de vento ou decorrentes de outras ações são geralmente transmitidas para os elementos de contraventamento por meio do efeito de diafragma das lajes de piso e de cobertura. Por definição, diafragmas são estruturas horizontais planas, onde uma das funções principais é transferir as forças horizontais atuantes em diferentes pontos da estrutura para os elementos de contraventamento vertical.

Os sistemas pré-moldados para lajes de pisos ou cobertura são projetados para funcionar como uma viga parede horizontal. O núcleo central e as paredes de contraventamento ou outros componentes de estabilização atuam como apoios para uma analogia de viga parede com as ações laterais sendo transmitidas para estes apoios (fig. 3.7). Para resistir a essas forças, a ação de diafragma para o sistema de laje de piso é conseguida através de ligações adequadas entre os elementos de laje, ou com o auxílio de uma armadura de tirante perimetral com preenchimento de concreto no local.

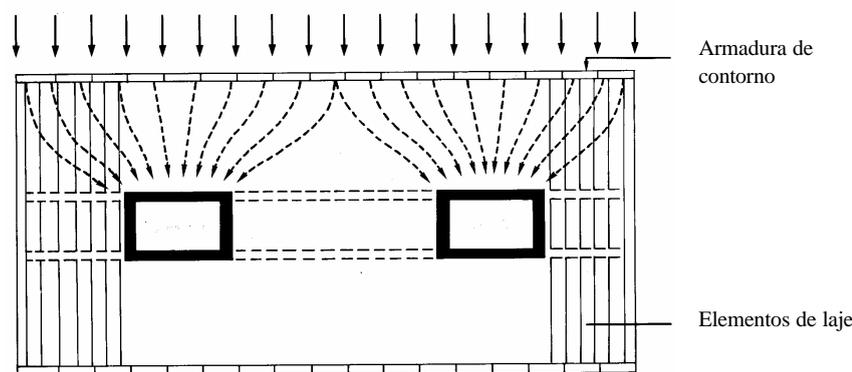


Figura 3.7 Princípio da ação de diafragma nos pisos pré-moldados

O modelo para uma viga parede é geralmente composto por uma estrutura com bielas em arco e tirante (fig. 3.8). O braço da alavanca interno utilizado para o cálculo da força de tração no tirante deve ser considerado com base nas normas de concreto para vigas parede.

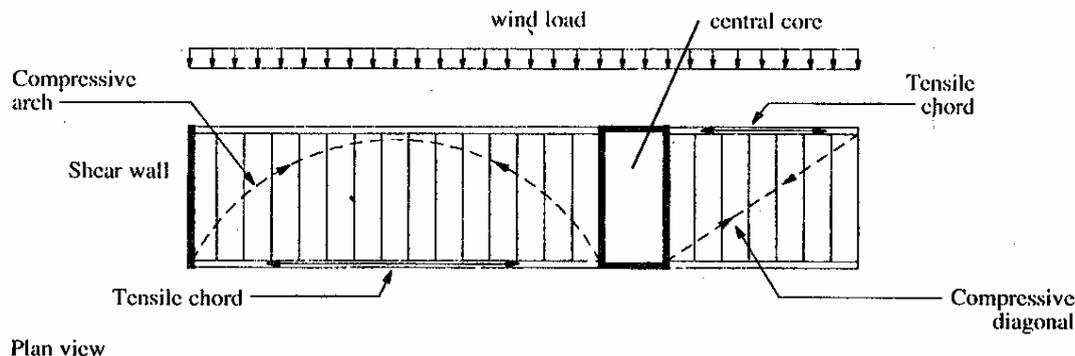


Figura 3.8 Sistema de contraventamento no plano horizontal

As forças de tração, de compressão e de cisalhamento atuantes no diafragma podem ser calculadas em conformidade com os métodos clássicos. As forças de tração são resistidas pelas armaduras de tirante no perímetro das lajes dos pisos. As juntas longitudinais entre os elementos de laje são importantes para transferir as forças de cisalhamento, as quais podem ser transferidas por meio do efeito de atrito entre os painéis, pelo efeito de agregado de travamento e por meio do efeito de pinos embutidos no concreto. Para resistir a essas forças, é necessário que os elementos de laje estejam interligados entre si, de modo que as forças de cisalhamento possam ser transferidas através das juntas, mesmo quando elas estão

fissuradas (efeito de intertravamento). As seções mais críticas são as juntas entre o piso e as paredes de cisalhamento, pois as forças de cisalhamento atingem o seu máximo.

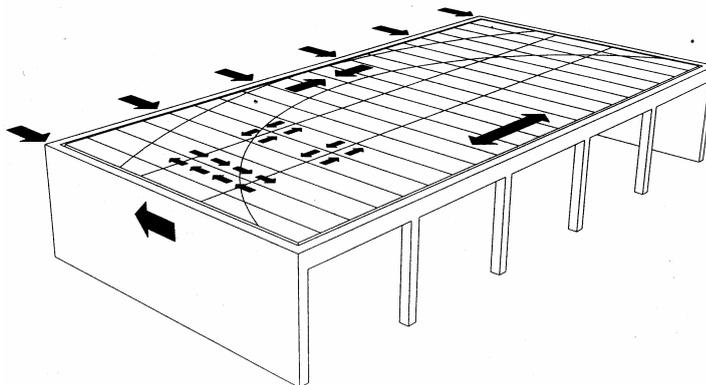


Figura 3.9 distribuição das forças no diafragma do piso

Os pisos formados por elementos de lajes alveolares são apropriados para atuarem como diafragma, por causa da seção transversal nas suas bordas e pelo “grauteamento” das juntas longitudinais entre os elementos adjacentes. É aconselhável limitar o valor de cálculo no ELU para a tensão média de cisalhamento horizontal nas juntas longitudinais entre as unidades das lajes alveolares para 0.1 N/mm^2 . A tensão de cisalhamento, calculada na altura efetiva da junta é raramente crítica, de modo que as lajes alveolares de piso normalmente fornecem efeitos de diafragma suficientes sem a última capa de preenchimento de concreto, mas as unidades devem ser restringidas aos movimentos relativos. Informações complementares sobre este assunto são fornecidas no Capítulo 6.

Nas lajes pré-moldadas em seções com duplo T sem a capa de concreto moldada no local, o cisalhamento é transmitido entre os elementos por meio de barras soldadas em chapas inseridas e ancoradas nas mesas dos elementos de laje.

Os elementos de piso com capa de concreto estrutural são geralmente projetados considerando que os elementos de laje pré-moldados são responsáveis por resistir às forças de compressão e por prevenir a flambagem da capa de concreto que é relativamente fina. Neste caso, considera-se que o cisalhamento através das juntas seja transferido totalmente por meio da capa de concreto.

Para produzir continuidade, a armadura colocada na capa de concreto deve ser estendida para dentro das paredes de cisalhamento (contraventamento). Não é provável que a resistência ao cisalhamento da capa de concreto seja o fator que governe o projeto estrutural. Todavia, é preciso cuidado no projeto das lajes de piso, particularmente onde existem aberturas adjacentes para as paredes de cisalhamento externas, ou para outros elementos que fornecem estabilidade.

3.5 Arranjos para o sistema de estabilização

Nas estruturas pré-moldadas, os componentes de estabilização estão combinados e conectados para formar um sistema de estabilização global. Os arranjos do sistema de estabilização variam em função do tipo de edificação e do sistema estrutural.

Efeito de viga em balanço dos pilares engastados na base pode ser utilizado para estabilizar edificações de baixa altura com sistema em esqueleto com cerca de três pavimentos. Os pilares são normalmente contínuos para a altura completa da estrutura. As forças horizontais paralelas às vigas podem ser distribuídas pelas vigas de modo que os pilares no mesmo plano da estrutura interajam na flexão (H1 na figura 3.10). Forças horizontais na direção transversal (H2 na figura 3.10), são resistidas primeiramente pelos pilares extremos. Todavia, por razões econômicas, é aconselhável fazer com que os pilares internos participem. Isso pode ser feito em duas maneiras, através do efeito do diafragma na cobertura ou dos pisos intermediários, ou com a ajuda de diagonais de contraventamento.

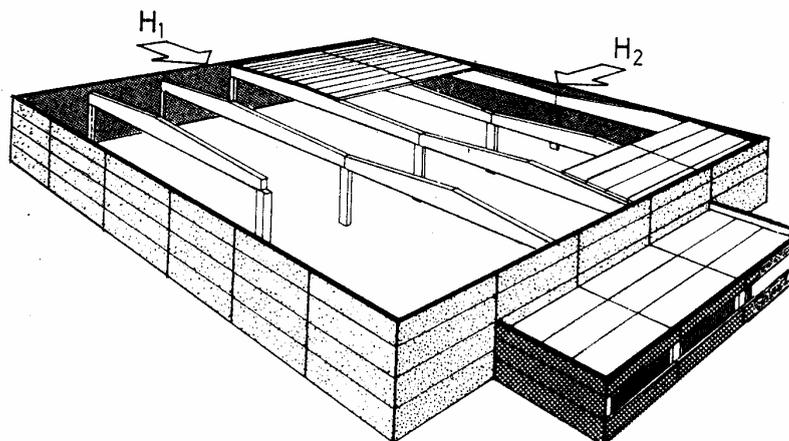


Figura 3.10 Para estabilidade horizontal, a interação entre os pilares pode ser conseguida pelo efeito de diafragma dos elementos de cobertura.

O efeito do diafragma nas lajes de cobertura é conseguido apenas com elementos de cobertura de concreto ou de concreto celular. As ligações entre os elementos e os sistemas de tirantes são projetados para resistirem a todas as forças no plano da cobertura (figura 3.11). Dessa maneira, a força horizontal total atuando na edificação é distribuído sob todos os pilares de acordo com a sua rigidez.

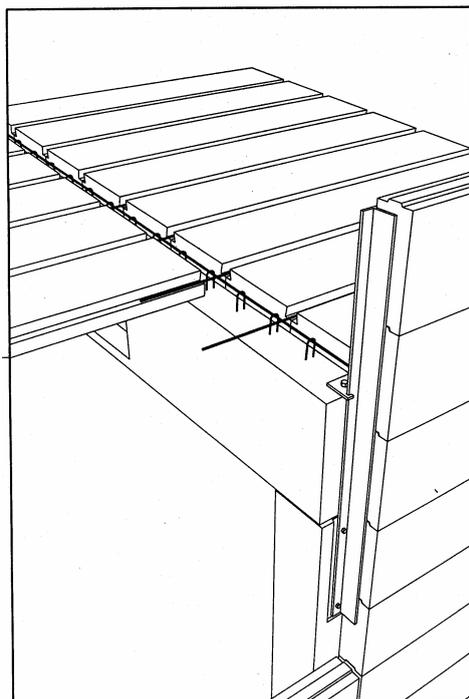


Figura 3.11 exemplo de um diafragma de cobertura com lajes de concreto ou elementos de concreto celular. A armadura de tirante nas juntas é interligada com as barras projetadas (barras de espera) das vigas de cobertura.

Para as estruturas leves de cobertura onde o efeito do diafragma não pode ser conseguido pela própria estrutura do cobertura, a distribuição das forças horizontais nas arestas das paredes, acima dos pilares externos e internos, pode ser assegurada por diagonais de contraventamento entre as vigas das aberturas externas, com ajuda barras e cantoneiras metálicas (fig. 3.12).

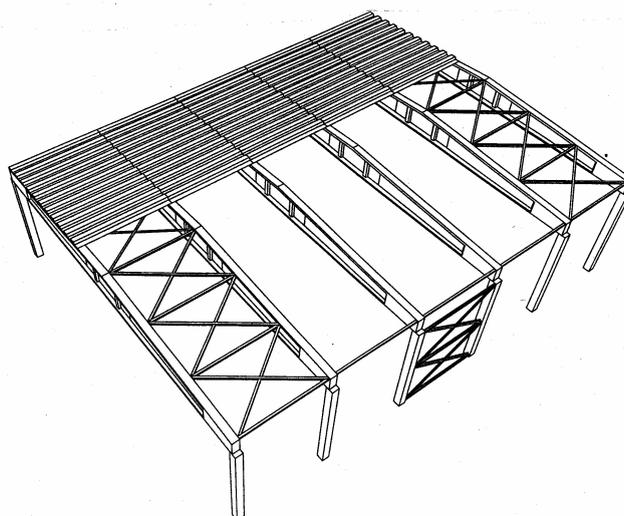


Figura 3.12 Diagonais de aço para contraventamento da cobertura ou de estruturas da fachada.

Os sistemas de contraventamento são a solução mais eficaz para estruturas de esqueleto em edifícios com múltiplos pavimentos, devido ao fato de que as caixas de escada e de elevadores já estarem presentes por razões funcionais, de modo que os custos adicionais com elementos de estabilização são desprezíveis. A concentração de todas as ações horizontais em apenas alguns componentes selecionados permite o uso de pilares de menor seção e ligações mais simples. Neste caso, os detalhes das ligações, o projeto e a construção das fundações são bastante simplificados. As paredes de cisalhamento de concreto pré-moldado possuem um custo reduzido, rigidez e resistência elevadas, são fáceis de serem montadas e podem ser integradas com o sistema viga-coluna quer como paredes embutidas ou como paredes em balanço ou formando núcleos de contraventamento. Paredes de alvenaria de preenchimento e diagonais metálicas de contraventamento também podem ser empregadas.

As paredes de cisalhamento (contraventamento) também são frequentemente empregadas para complementar a ação enrijecedora dos núcleos de contraventamento, por exemplo em ambas as extremidades de construções pré-moldadas com plantas longas e estreitas com núcleos centrais, ou onde os núcleos são colocados numa posição excêntrica (figura 3.13).

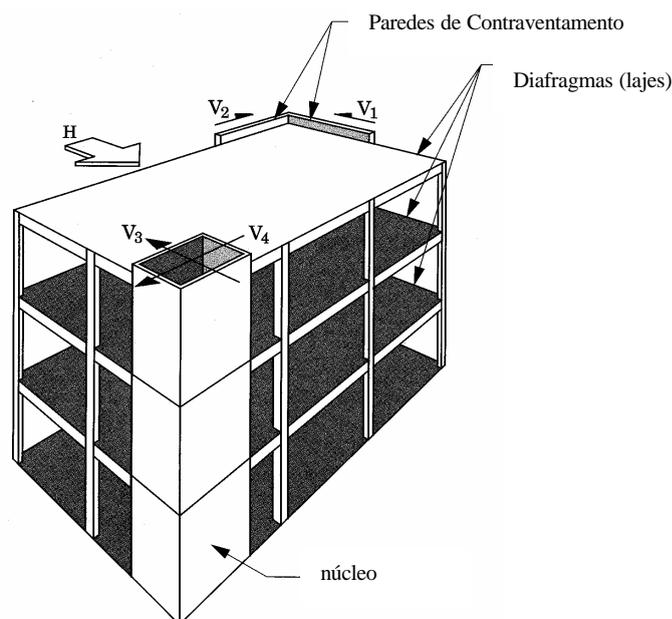


Figura 3.13 As paredes de contraventamento são necessárias para equilibrar a torção induzida pela posição excêntrica do núcleo.

Quando as paredes possuem grandes aberturas, por exemplo para portas, é necessário checar se a parte da parede acima da abertura da porta pode contribuir. Se isto não acontecer, apenas a parte da parede que está sem abertura deve ser considerada.

É interessante, tanto por razões econômicas quanto estruturais, conseguir a maior regularidade possível no layout da estrutura, horizontalmente e verticalmente.

As distribuições das ações horizontais entre as paredes e/ ou dos núcleos de contraventamento dependem de um número de fatores:

- rigidez dos componentes de estabilização;
- deslocamentos horizontais no plano dos componentes de estabilização. Como as flechas por flexão nas paredes em balanço, as flechas por cisalhamento nas paredes de embutimento internas e os deslocamentos dos nós das diagonais de contraventamento;
- posição dos componentes de estabilização. Idealmente, a estrutura deveria ser equilibrada pelo posicionamento dos componentes de estabilização de acordo com a sua rigidez para evitar os efeitos de torção na estrutura;
- juntas de expansão nas lajes em diafragma. As juntas de expansão são geralmente providas com intervalos de aproximadamente 80 m entre os diafragmas do sistema de piso, se a estrutura for retangular no plano, ou de aproximadamente 60 m de intervalo se o plano não for retangular, dependendo das condições climáticas, tipo de estrutura, tipo de fundação etc.

Finalmente, com relação ao posicionamento dos elementos de estabilização, devidas considerações devem ser feitas com relação às mudanças dimensionais. É necessário tomar cuidado para que as deformações ocorram sem (ou quase sem) o surgimento de grandes fissuras.

3.6 Integridade estrutural

O propósito essencial do projeto de estruturas pré-moldadas é conceber uma estrutura onde os componentes pré-moldados individuais estejam logicamente ligados entre si. Alguns elementos ou partes da estrutura possuem apenas uma função de suporte de carga ou uma função de separação, outros também desempenham funções de estabilidade horizontal.

A ligação lógica entre todas essas partes do sistema estrutural é obtida por meio de um conjunto de ligações adequadas. No projeto destes detalhes, não se deveria apenas considerar transferência de forças entre os elementos locais, mas também a necessidade de continuidade através das ligações e a ductilidade das ligações, para conseguir integridade estrutural global.

Isso pode ser obtido por meio de uma rede tridimensional de tirantes (fig. 3.14). Os tirantes são elementos tracionados que consistem em armaduras contínuas ou por barras rosqueadas, posicionadas dentro de faixas com concreto de preenchimento, bainhas ou juntas entre os elementos pré-moldados, nas direções longitudinal, transversal e vertical. A função destes tirantes não é apenas transferir as forças normais entre os elementos, originadas das forças de vento ou outras ações, mas também dar resistência adicional e segurança para que a estrutura resista, a uma certa extensão, às ações excepcionais: como recalques, explosões de gás, colisões de veículos ou aeronaves, tornados, bombas, etc.

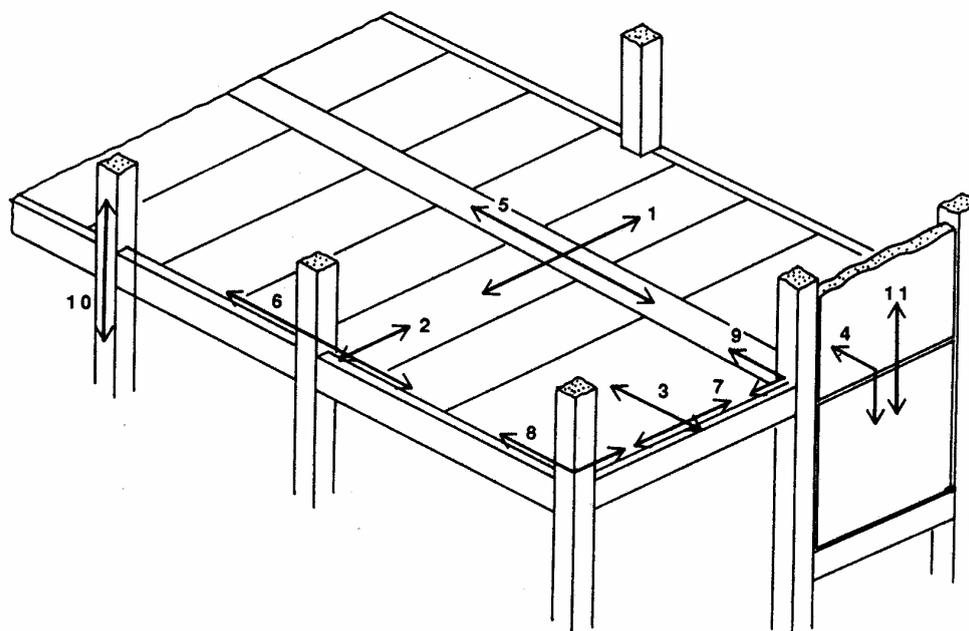
As estruturas pré-moldadas são mais suscetíveis aos efeitos das ações excepcionais do que outras formas tradicionais de construção por causa da presença de juntas e ligações entre os elementos estruturais. Contudo, experiências mostram que, é perfeitamente possível enfrentar estas dificuldades por meio de um sistema de tirantes efetivo "amarrando" os vários componentes da estrutura.

As considerações seguintes são recomendadas pelo código Europeu 2 para ligações por tirantes (valores do cálculo no ELU):

- Tirantes periféricos : $F_{tie} = \ell \cdot 10 \text{ kN/m}$, mas não menos que 70 kN, onde ℓ é o comprimento do vão do piso.

- tirantes internos : $F_{tie} = (\ell_1 + \ell_2) \cdot 20$ kN/m, mas não menos que 70 kN onde ℓ_1, ℓ_2 são os comprimentos do vão (em m) das lajes de pisos nos dois lados da viga.
- Tirantes para ligações verticais: o Eurocode 2 não fornece nenhuma especificação para as ligações verticais. Os seguintes requerimentos seguem a norma inglesa BS-8110: cada pilar e cada parede suportando cargas verticais devem ser ligados continuamente desde a fundação até a cobertura. O tirante de continuidade deve ser capaz de resistir as forças de tração relativo à máxima combinação de projeto para o peso próprio e sobrecargas recebidas pelos pilares ou paredes de todos os pavimentos e cobertura.

Correntemente no meio profissional, com relação à consideração das ações excepcionais, permite-se possa ocorrer a falha de elementos estruturais individuais, ou colapso de uma parte restrita da estrutura, devido a uma ação excepcional, embora o colapso progressivo de uma parte significativa da estrutura como um resultado da falha local é considerada como inaceitável.



1. tirantes centrais para pisos; 2. tirantes de extremidade para pisos; 3. tirantes nas arestas frontais; 4. tirantes entre elementos de piso e de parede; 5. tirantes de continuidade para vigas internas; 6. tirantes periféricos; 7. tirantes periféricos; 8. tirantes periféricos em pilares de canto; 9. tirantes para continuidade entre pilares e vigas; 10. tirantes para continuidade vertical entre elementos de pilares; 11. tirantes para continuidade vertical entre elementos de parede.

Figura 3.14 tipos de tirantes (armadura de continuidade) em estruturas do esqueleto

Capítulo 4 - Ligações entre Elementos Pré-Moldados

4.1 Introdução

O assunto de ligações constitui-se em um dos tópicos mais importantes com relação às estruturas pré-moldadas. O papel das ligações é fazer uma interligação racional entre os elementos pré-moldados para compor um sistema estrutural capaz de resistir a todas as forças atuantes, incluindo ações indiretas provenientes da retração, fluência, movimentos térmicos, fogo, etc. Para desenvolver adequadamente o projeto estrutural, os projetistas devem conhecer o fluxo de forças ao longo da estrutura quando submetida à ações verticais e horizontais, bem como compreender como as ligações interagem com os elementos dentro do sistema estrutural como um todo.

As ligações em estruturas pré-moldadas devem atender a diferentes critérios de projeto e de desempenho. A sua função principal das ligações é a transferência das forças entre as interfaces dos elementos pré-moldados, de forma que os elementos pré-moldados interajam entre si como um único sistema estrutural. Tal interação pode ter diferentes propósitos:

- Conectar elementos à estrutura de apoio;
- Garantir o comportamento global pretendido para os subsistemas pré-moldados, como a ação de diafragma nos subsistemas de pisos, ação de contraventamento em paredes compostas por elementos de painéis, etc.
- Transferir forças do seu ponto de aplicação para um subsistema de estabilização, como um núcleo ou parede de contraventamento.

Outros aspectos relativos à função e à aparência das ligações podem resultar em requisitos específicos para projeto ou produção, como por exemplo com relação à durabilidade ou quanto aos aspectos estéticos. O detalhamento das ligações também deveria atender a requisitos de produção, de transporte e montagem dos elementos pré-moldados.

O projeto de ligações não se limita a uma questão de escolher um dispositivo de ligação apropriado, mas engloba a consideração da ligação como um todo, incluindo as juntas, os materiais para preenchimento de nichos e juntas, detalhamento das superfícies das interfaces e das zonas nas extremidades dos elementos pré-moldados, em regiões próximas às ligações. Estas zonas nas extremidades dos elementos promovem a transferência das forças dos dispositivos de ligação para dentro dos elementos e devem ser detalhadas e armadas considerando as forças internas e as possíveis deformações.

Ligações típicas e padronizadas para estruturas pré-moldadas são apresentadas em manuais de projeto ou em catálogos de fabricantes. Todavia, o projeto de ligações estruturais não é apenas uma questão de selecionar uma solução apropriada a partir de uma lista de soluções padronizadas.

Neste capítulo, são apresentados os princípios básicos e critérios de projeto, os quais possibilitam ao projetista o entendimento da filosofia de projeto de ligações em estruturas pré-moldadas em geral. Nos capítulos 5 ao 8 são fornecidos exemplos práticos de ligações entre elementos pré-moldados.

4.2 Critério Básico de Projeto

O projeto de ligações estruturais em construções pré-moldadas deve considerar uma variedade de critérios relacionados com o comportamento estrutural, tolerâncias dimensionais, resistência ao fogo, durabilidade e manutenção, facilidade de manuseio e montagem. Os principais critérios de projeto são apresentados a seguir:

4.2.1 Comportamento Estrutural

Resistência

Uma ligação deveria ser projetada para resistir às forças para as quais elas serão submetidas durante a vida útil da estrutura. Algumas destas forças são causadas por ações diretas, como peso próprio e

sobrecargas, ações de vento, ações sísmicas, ações devidas ao solo e à pressão da água. Outras ações indiretas são causadas pela restrição à mudanças de volume dos elementos, ou forças adicionais que podem aparecer devido à inclinações não intencionais em pilares e paredes portantes ou excentricidades nesses elementos. Em zonas sísmicas, as ligações devem ser capazes de garantir a integridade do sistema estrutural.

No projeto de ligações também deve ser considerada a possibilidade de ocorrência de ações excepcionais (acidentais), como explosões, colisões etc. Forças adicionais podem surgir nas ligações em decorrência do efeito dessas ações. Todavia, nos casos onde as ações excepcionais causam danos severos na estrutura haverá a necessidade no projeto em se prever a redistribuição das forças e a formação de sistemas alternativos para apoio das cargas, de forma a isolar a parte danificada da estrutura. As ligações, como partes essenciais do sistema estrutural, deveriam facilitar tais transformações. Dentro do projeto para tais situações, não se está interessado apenas na capacidade de transferência das forças, mas também nas qualidades da ligação como deformabilidade e ductilidade ou até mesmo no conhecimento do relacionamento força-deslocamento das ligações.

Influência Decorrente de Mudanças de Volume

O efeito combinado da deformação por encurtamento devido a fluência, retração e redução de temperatura pode causar tensões de tração nos elementos de concreto pré-moldado e nas ligações. Existem duas filosofias de projeto que podem ser adotadas, ou se permitindo que os deslocamentos relativos ocorram nas ligações, ou fornecendo às ligações a restrição necessária para evitar os deslocamentos relativos. Neste último caso, as ligações devem ser projetadas para absorver forças consideráveis de restrição. Na prática, o que ocorre é adotar situações intermediárias, onde as ligações apresentam deformabilidade na direção do eixo dos elementos de viga. Se algum deslocamento relativo é possível, por exemplo devido às deformações elásticas de elementos estruturais ou das ligações, as tensões de restrição serão aliviadas. A liberdade parcial aos movimentos terão o mesmo efeito. Neste contexto, não é apenas a capacidade de transferência de força da ligação que é interessante para ser considerada no projeto, mas também a relação força-deslocamento e a deformabilidade da ligação.

Movimentos

Ligações não devem absorver necessariamente todos os movimentos na estrutura. Os movimentos necessários serão, na maior parte dos casos, devidos à deformações nas vigas e lajes devido ao carregamento e/ou forças de protensão. Geralmente, este problema aumenta quando um painel de fachada é conectado a uma viga ou laje em algum lugar ao longo do vão, distante do apoio. Se o detalhe para a ligação não permite o movimento vertical da viga ou da laje, isto pode causar dano na própria ligação, bem como nos elementos. Mesmo que não ocorra o dano, poderão surgir forças nos elementos que não foram intencionadas no projeto, ocasionando deformações indesejadas. A solução para isto é prever algum tipo de detalhamento na ligação que permita algum deslizamento na direção daquele movimento ou fazer com que a ligação funcione como uma rótula.

Ductilidade

É sempre aconselhável projetar e detalhar as ligações de modo a evitar rupturas frágeis no caso da ligação ser submetida com forças acima daquelas que foram previstas no projeto, sendo desejável um comportamento dúctil para as mesmas. A ductilidade é a capacidade de uma ligação sofrer deformações plásticas sem ocorrer uma redução significativa na sua capacidade de transmitir esforços. A ductilidade é geralmente quantificada por um fator de ductilidade, o qual relaciona a deformação última com a deformação ao final do limite elástico (início do escoamento).

A ductilidade não deve ser confundida com a deformabilidade da ligação e também não deve estar associada apenas com a flexão. No caso de carregamentos excessivos, uma ligação dúctil irá atingir o escoamento e começar a se deformar de forma plástico. O deslocamento plástico gerará o alívio necessário da força de restrição e um novo estado de equilíbrio será formado. Neste caso, mesmo para grandes deslocamentos uma certa capacidade de transferência das forças ainda permanece, evitando assim a

ocorrência de ruptura abrupta bem como a ocorrência de danos localizados na região da ligação. Por outro lado, a ocorrência de grandes deformações serve como aviso de anormalidades na estrutura.

Com o propósito de assegurar um comportamento dúctil para as ligações, pode-se aplicar o princípio do projeto “equilibrado” (achar um melhor substituto para esse termo) por ductilidade, o qual está ilustrado na Figura 4.1 para uma ligação transferindo basicamente forças de tração através de uma junta, onde essa ligação consiste de vários componentes, os quais podem ser considerados como vínculos de uma força. As barras de ancoragem são identificadas como vínculos dúcteis e presumidos como tendo a contribuição mais importante para o deslocamento plástico total da ligação. O objetivo com o projeto “equilibrado” é assegurar que a deformabilidade plástica completa dos vínculos dúcteis possa ser alcançada antes que ocorra a ruptura da ligação. Falhas abruptas prematuras em outros componentes também devem ser evitados. Isto significa que todos os outros componentes, isto é, a ancoragem das barras dentro do elemento de concreto, as cantoneiras metálicas e a barra metálica soldada às cantoneiras deveriam ser projetadas para resistir não apenas ao escoamento mas também para resistir à capacidade última das barras de ancoragem.

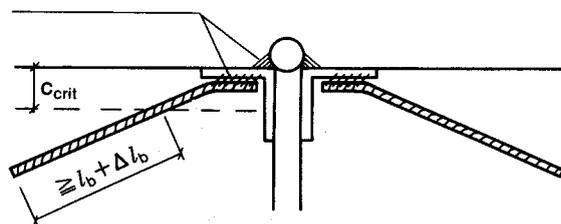


Figura 4.1 Princípio de Projeto “Equilibrado” (arranjar um nome melhor)

Durabilidade

Com relação à durabilidade, é necessário considerar o risco da corrosão no aço e da fissuração e/ou lascamento no concreto com a devida atenção para as condições reais do meio ambiente onde a estrutura estará exposta. Componentes metálicos expostos a meios agressivos devem possuir uma proteção permanente, o que pode ser conseguido por meio de uma camada de pintura epoxy ou anti-ferrugem, bem como por uma camada de proteção com preenchimento de concreto ou argamassa moldado no local. Em muitos casos, as ligações não podem ser inspecionadas ou ter manutenção adequada após a construção ter sido concluída. Nestes casos, as ligações sem possibilidade de manutenção deveriam ter uma vida útil superior à vida útil da estrutura. Se a manutenção dos componentes metálicos das ligações não é possível, recomenda-se a utilização de aço inoxidável. No caso da presença de metais heterogêneos, deve-se considerar o risco da corrosão galvânica. A corrosão galvânica ocorre quando metais de diferentes níveis catódicos estão em contato elétrico e são ionizados por um eletrólito como a água.

4.2.2 Tolerâncias dimensionais

As tolerâncias dimensionais estão inevitavelmente aparecendo na estrutura de um edifício e na fabricação dos elementos pré-moldados. Essas tolerâncias devem ser consideradas no projeto das ligações, pois caso contrário poderão ocorrer sérios problemas durante a montagem da estrutura. Um exemplo típico é quanto ao comprimento dos apoios de um elemento pré-moldado. Tanto o comprimento do elemento que está sendo apoiado como a posição da estrutura de apoio podem divergir dos valores originais de projeto. Estes desvios irão se concentrar normalmente nas ligações. No exemplo acima as tolerâncias dimensionais deveriam ser levadas em conta pelo comprimento do apoio (não está falando mas poderia ser referente ao comprimento do consolo) e as almofadas de elastômero.

Outro princípio importante relacionado com as tolerâncias dimensionais é que as ligações deveriam possuir dispositivos para ajustes nas três direções para possibilitar que os elementos possam ser alinhados e nivelados durante a montagem.

No exemplo da figura 4.2 o ajuste na direção z é feito por meio do trilho de apoio, na direção x por meio dos calços metálicos entre a cantoneira e o trilho, e na direção y por meio do orifício oval na cantoneira metálica.

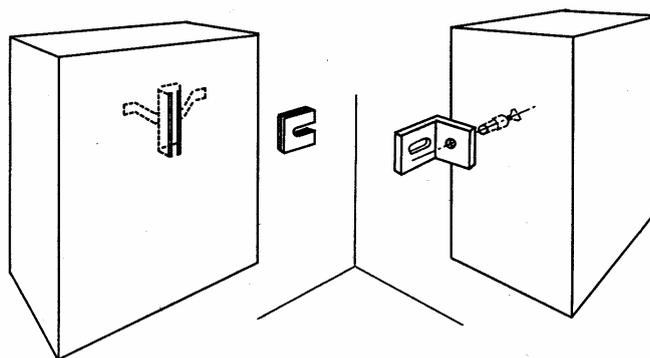


Fig. 4.2 As ligações deveriam possuir dispositivos que permitam ajustes nas três direções.

4.2.3 Resistência ao Fogo

Existem basicamente dois aspectos que deveriam ser considerados dentro do projeto de ligações com relação à possibilidade de exposição dessas ligações ao fogo. Por um lado está o efeito do fogo sobre a capacidade de transferência dos esforços na ligação e por outro lado está a função de separação das ligações. Quando os componentes de uma ligação estão diretamente expostos ao fogo, a capacidade de transferir forças por meio da ligação pode ser reduzida como resultado da alta temperatura. Portanto, os componentes das ligações, os quais são partes vitais do sistema estrutural pré-moldado, deveriam possuir o mesmo grau de proteção ao fogo que os demais elementos estruturais. A proteção ao fogo para ligações pode ser conseguida por meio do revestimento da ligação com uma cobertura de concreto moldado no local ou com materiais especiais para isolamento ao fogo. Todavia, componentes metálicos das ligações que estão parcialmente inseridos nos elementos de concreto terão uma temperatura inferior que as partes não inseridas por causa da condutividade térmica do concreto envolvente.

Muitas ligações pré-moldadas não são vulneráveis ao efeito do fogo e não requerem tratamento especial no projeto. Por exemplo, os apoios entre as lajes e vigas ou entre vigas e pilares geralmente não necessitam de cuidados especiais contra o fogo. Se as lajes ou vigas são apoiadas sobre almofadas de elastômero ou outros materiais combustíveis, a proteção das almofadas geralmente não é necessária pois a deterioração destas não provocará o colapso da estrutura.

No caso de incêndio, paredes e pisos tem uma função importante de separação com relação ao isolamento térmico e à penetração do fogo. As ligações nas juntas em paredes e pisos deveriam ser projetadas de modo a prevenir a passagem de chamas e de gases quentes.

4.3 Mecanismos Básicos para Transferência de Forças

Ligações estruturais são geralmente compostas por um número de componentes que garante a transferência de forças através da ligação como: juntas de preenchimento, tirantes de barras e outros dispositivos de acoplamento, barras ancoradas e zonas de ligação dos elementos pré-moldados interligados. A transferência de forças de um elemento pré-moldado para o outro, ou dentro da ligação global como um todo, está baseado num número de princípios, os quais são apresentados nesta sessão.

4.3.1 Encaixes

Uma ligação pode ser concebida por deslizando um componente dentro do outro em preenchendo o espaço vazio com graute ou concreto especial, ou ainda com adesivos. As soluções com adesivos não são normalmente empregadas em estruturas pré-moldadas. Um exemplo clássico de ligação por encaixe é a ligação pilar-fundação por meio de cálice de fundação. Um outro exemplo é o emprego de detalhes para ligações viga-pilar que utilizam de consolos metálicos inseridos no pilar que ficam encaixados nas

partes inferiores das extremidades das vigas, escondendo assim o consolo. Nesse caso, o espaço vazio entre a abertura e o consolo metálico é normalmente preenchido com adesivo epoxy.

(inserto metálico / adesivo para preenchimento da interface)

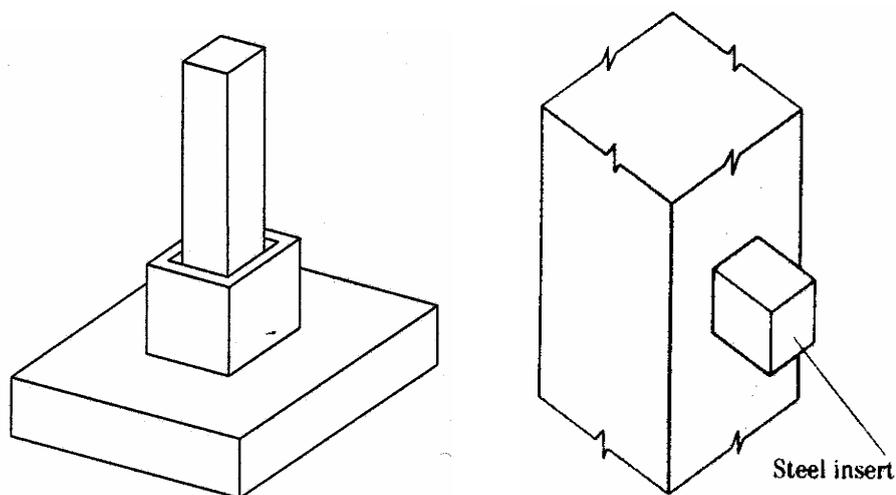


Fig. 4.3 Exemplo de ligações por encaixe

4.3.2 Barras Dobradas

Duas ou mais barras adjacentes podem ser acopladas longitudinalmente dentro de um elemento prismático de concreto confinado por estribos. A transmissão das forças de uma barra para a outra é garantida quando o comprimento da dobra é suficiente e o distanciamento entre as barras não é superior a um certo limite.

A ancoragem por dobra é freqüentemente empregada para conectar elementos pré-moldados. Os elementos pré-moldados são dotados de barras salientes, as quais são preenchidas com concreto moldado no local após a montagem. As ancoragens das extremidades pode se apresentar em forma de laços, dobras, ganchos e similares.

Quando o comprimento de dobra requerido não é disponível, a transferência da força entre as barras das armaduras pode ser conseguida inserindo uma barra transversal entre dois ganchos ou entre duas barras em laço. A transferência da força neste caso estará baseada numa combinação de ação de laço e ação de pino.

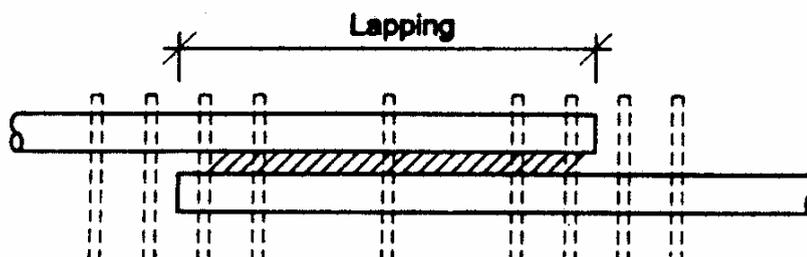


Fig. 4.4 Princípio de ancoragem por transpasse de barras dobradas

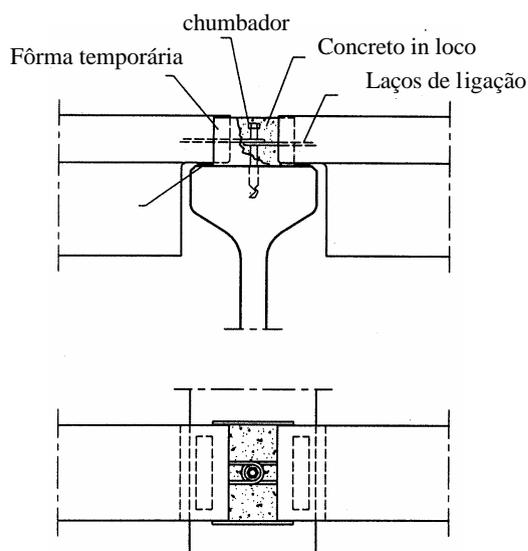


Fig. 4.5 Barra transversal conectando barras em laço

4.3.3 Ação de Pino (ou Efeito de Pino)

A transferência de ações horizontais de um elemento para o outro em estruturas pré-moldadas é geralmente feita por meio de ligações que se utilizam de chumbadores, nos quais tem-se uma ação de pino conforme apresentada na Figura 4.4.

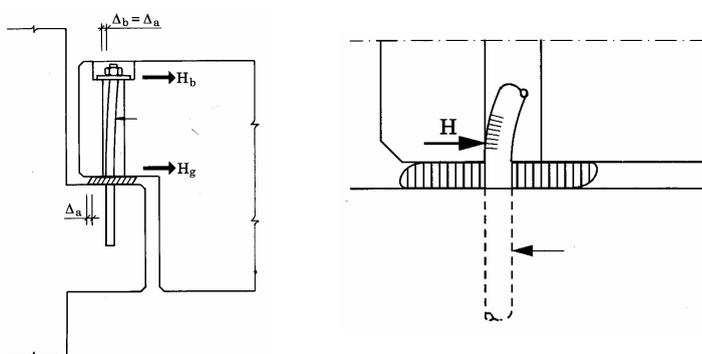


Fig. 4.6 Princípio de transferência de força cortante por ação do chumbador (efeito de pino)

Neste caso, o chumbador é solicitado por cisalhamento na junta de interface, sendo apoiado por tensões de contato ao longo do trecho do chumbador que está inserido no concreto, sendo que este estado de solicitações gera deformações por flexão no chumbador. No ELU o concreto é esmagado numa região do concreto próxima á interface e aparecem rótulas plásticas no chumbador próximo à interface da ligação. Neste caso, a resistência ao cisalhamento depende basicamente do diâmetro do chumbador e da resistência do concreto. A resistência ao cisalhamento diminui consideravelmente quando a distância de separação entre os dois elementos de concreto conectados é muito grande. De fato, quanto maior for esta distância, maior será a deformabilidade por cisalhamento da barra do chumbador, diminuindo-se a capacidade da ligação de restrição aos movimentos. Por esta razão, deve-se evitar almofadas de apoio muito altas tanto quanto possível. Dependendo das dimensões do elemento de concreto e das distâncias das bordas, pode ser necessário a utilização de uma armadura de fendilhamento (confinamento) ao redor do chumbador. Quando o chumbador é ancorado por aderência ou por ganchos de ancoragem é possível haver um comportamento combinado com ação de pino e efeito de atrito-cisalhamento.

A ação de pino é utilizado em ligações com chumbadores. Os chumbadores somente transferem tensões de tração sem introduzir momentos fletores nas ligações.

4.3.4 Aderência

A ligação por aderência entre o concreto pré-moldado e o concreto moldado no local somente é considerada para baixas tensões nas interfaces, como por exemplo em ação composta entre as capas de concreto e as lajes de piso. Os fatores que afetam a aderência e a transferência de cisalhamento na superfície da interface são: a rugosidade da superfície; a resistência na superfície e a limpeza na superfície.

Resultados de ensaios indicam que o tratamento da superfície do concreto pré-moldado é ao menos tão importante quanto o grau de rugosidade [1]. Fatores como limpeza, adensamento, cura e os cuidados em se molhar bem a superfície do concreto possuem maior influência na resistência ao cisalhamento da interface. Na verdade, através de uma combinação ótima desses fatores, em conjunto com um estudo adequado de traço é possível desenvolver uma boa resistência com uma superfície lisa como por exemplo no caso de extrusão, de formas deslizantes ou apenas por adensamento, o qual é igual ou mesmo maior que aquele obtido para uma superfície rugosa, onde se tem uma menor preocupação com o tratamento da superfície.

4.3.5 Atrito

Em uma junta de interface com alguma rugosidade, as forças de cisalhamento são basicamente transferidas por atrito. Todavia, tensões de compressão são necessárias na interface para criar a resistência ao atrito (fig. 4.7 a). Uma força de compressão permanente pode ser obtida pelas força de gravidade que é transferida através da junta ou por meio de protensão. Para muitas aplicações não é possível obter uma força de compressão nesta direção. Todavia, é possível induzir forças de compressão por meio de barras de armaduras, as quais são colocadas através da junta e deformada quando a ligação é solicitada por cisalhamento (Fig. 4.7 b). Por causa da rugosidade na interface, uma pequena junta de separação terá lugar quando a junta é solicitada por cisalhamento e ocorre um deslizamento ao longo da interface. A junta de separação gera tensões nas barras das armaduras e a força de tração é equilibrada por uma força de compressão através da interface. A força de compressão induzida torna possível a transferência de cisalhamento por ação do atrito, o tão conhecido efeito atrito-cisalhamento (fig. 4.7 c). A resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da armadura transversal e do coeficiente de atrito.

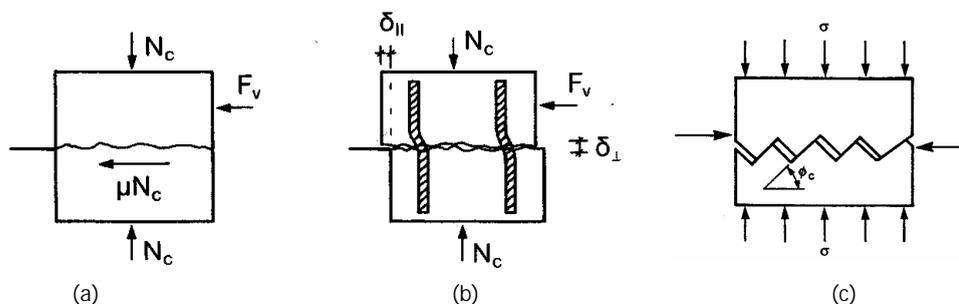


Fig. 4.7 Transferência da Força de Cisalhamento por Atrito

O princípio de transferência de forças por aderência e fricção é aplicada em juntas longitudinais grauteadas entre os elementos de piso e de parede.

4.3.6 Chaves de Cisalhamento

Forças de cisalhamento podem ser transmitidas através de juntas com faces dentadas (Fig. 4.8.a). As chaves de cisalhamento trabalham como barreiras mecânicas que previnem qualquer deslizamento significativo ao longo da junta. O pré-requisito para o funcionamento do sistema é que os elementos são prevenidos contra movimentação sob solicitações de cisalhamento. Isto é feito usualmente por meio de armaduras de tirantes no topo e na base da junta (Fig. 4.8.b). Uma outra solução é colocar armadura em laços transversais ao longo do comprimento da junta (Fig.4.8.c).

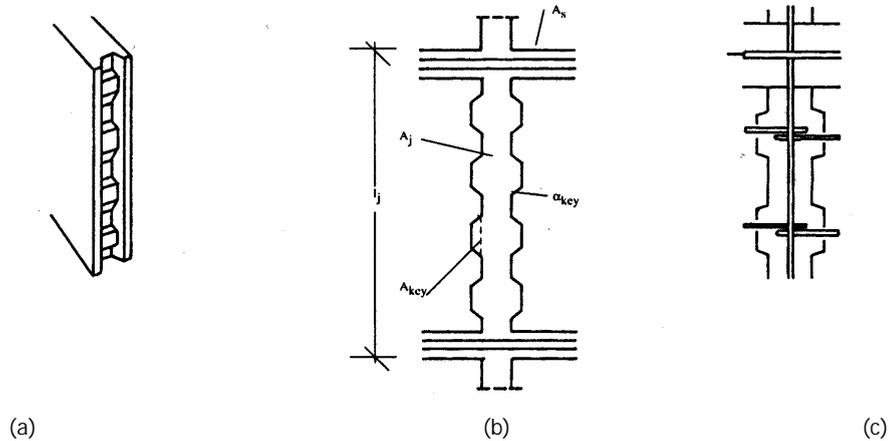


Fig. 4.8 Transferência de Forças em Chaves de Cisalhamento

4.3.7 Chumbadores (ou pinos)

Chumbadores (ou pinos) são empregados extensivamente para transferir forças de tração e de cisalhamento. As ancoragens como chumbadores, luvas rosqueadas, trilhos ou dispositivos fixados em chapas ancoradas nos elementos de concreto (ver Figura 4.9). As tolerâncias são garantidas por meio de orifícios maiores no elemento a ser conectado.

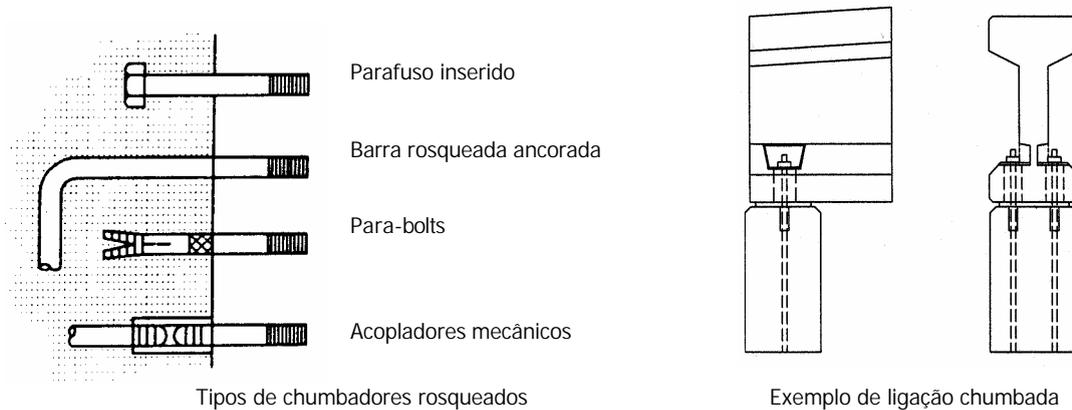


Figure 4.9 Ligação resistente à tração por chumbadores

4.3.8 Ligações Soldadas

As ligações por soldas podem ser empregadas para conectar diretamente os insertos e barras metálicas que estão salientes nos elementos de concreto, como por exemplo as barras de armadura que estão traspassando (Fig.4.10.a). Uma alternativa é empregar uma peça metálica intermediária, a qual é utilizada como elo de ligação entre os elementos de concreto. Esta peça intermediária pode ser soldada diretamente nas barras salientes (de espera) (Fig.4.10.b) ou em chapas ou cantoneiras de ancoragem embutidas nas

extremidades dos elementos (Fig.4.10.c). Essas chapas e cantoneiras estão soldadas junto à outras barras no interior dos elementos de concreto as quais estão fixadas no concreto por meio de ancoragem por aderência ou por meio de ancoragem mecânica.

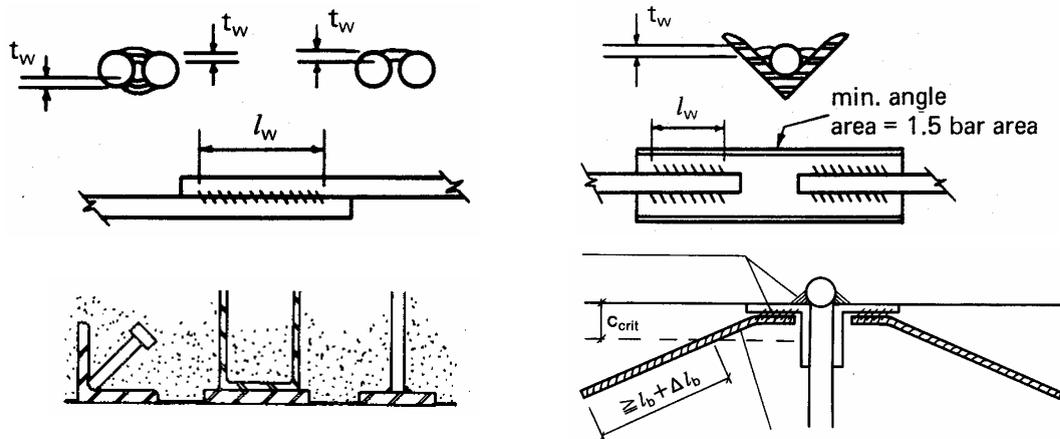


Fig. 4.10 – Ligações soldadas

4.3.9 Ligações protentidas (pós-tensão)

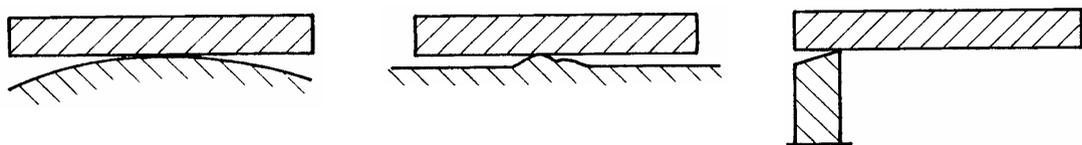
A técnica da pós-tensão é empregada em construções segmentadas e em paredes de edifícios altos. Bainhas são instaladas dentro dos elementos pré-moldados e, após a montagem, os cabos de protensão são colocados nas bainhas e pós-tensionados. As ligações entre os elementos são dimensionadas para resistir às forças de tração e de cisalhamento.

4.4 Tipos de Ligações Estruturais

4.4.1 Ligações para Transferência de Forças de Compressão

As forças de compressão entre elementos de concreto adjacentes podem ser transferidas por meio de contato direto, por meio de juntas com argamassas ou por meio de almofadas (aparelhos) de apoio.

É importante considerar a possibilidade da ocorrência de superfícies irregulares que dificultem a eficiência do contato entre os elementos, pois isto pode resultar em concentrações de tensões nas áreas de contato efetivo, na aplicação excêntrica de forças ou mesmo em efeitos de torção (Fig.4.11). Assim, o contato direto entre os elementos sem a utilização de nenhum material intermediário para almofadas de apoio na interface de contato pode ser realizado somente quando se consegue uma grande exatidão na fabricação dos elementos e/ou quando as tensões de contato são pequenas ($= 0.3 f_{cd}$ de acordo com o Eurocode 2, EN 1992-1-1 [2]).



Superfícies de contato irregulares b) Concentração localizada de tensões c) Superfícies de contato não paralelas

Fig.4.11 Exemplos de superfícies de contato irregulares nos apoios

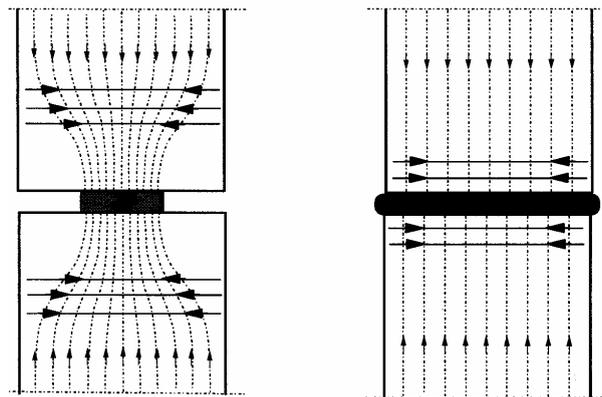
Argamassa ou microconcretos podem ser empregados para nivelar (compensar) as irregularidades entre as superfícies na interface entre os elementos. Estes materiais são frequentemente utilizados em juntas horizontais de compressão entre elementos portantes, assim como no caso de pilares e paredes, algumas vezes entre as lajes e suas vigas de apoio, mas raramente para apoiar vigas. A espessura normal para juntas é de 10 a 30 mm para juntas de argamassa e de 30 a 50 mm para juntas de concreto.

Materiais deformáveis para apoios como as almofadas de apoio com neoprene também são empregadas para compensar as irregularidades e distribuir melhor as tensões sobre a área de contato. Este tipo de almofada é utilizado geralmente para apoios de vigas e lajes de pisos. A espessura das almofadas varia em torno de 2 a 20 mm. As espessuras maiores são utilizadas para liberar deslocamentos e rotações com o propósito de reduzir as forças induzidas nas ligações. Acima de certas espessuras e carregamentos, as almofadas de apoio podem ser feitas com neoprene fretado com chapas metálicas de reforço intermediário que produzem um confinamento às deformações transversais na almofada, aumentando a sua resistência e diminuindo a sua deformabilidade.

As almofadas de apoio devem ser posicionadas não faceando as bordas dos elementos para evitar a transferência de forças de contato nessas bordas, o que poderia resultar em danos localizados. A almofada também deve dar liberdade para a viga fletir livremente de modo a evitar o contato entre a parte inferior da viga e a borda do elemento de apoio.

Materiais duros para apoios, como as placas metálicas, são empregados nos casos quando se necessita transferir forças com alta intensidade ou pela ocorrência de ligações soldadas entre os elementos.

As juntas de compressão podem levar à tensões de tração significantes nos elementos adjacentes. Quando o módulo de elasticidade do material da junta for pelo menos da ordem de 70% do módulo dos elementos de concreto, grandes forças irão ocorrer nos elementos adjacentes (Fig.4.13.a). Quando o módulo de elasticidade do material da junta é muito inferior ao dos elementos adjacentes, tensões de fendilhamento irão se desenvolver devido à deformação transversal no material da junta (Fig.4.13.b). As tensões transversais de tração nas juntas deveriam ser resistidas por uma armadura apropriada de fretagem nos elementos adjacentes.



a) Apoio concentrado b) Expansão da almofada deformável

Fig. 4.13 Tensões transversais de tração nas juntas de compressão

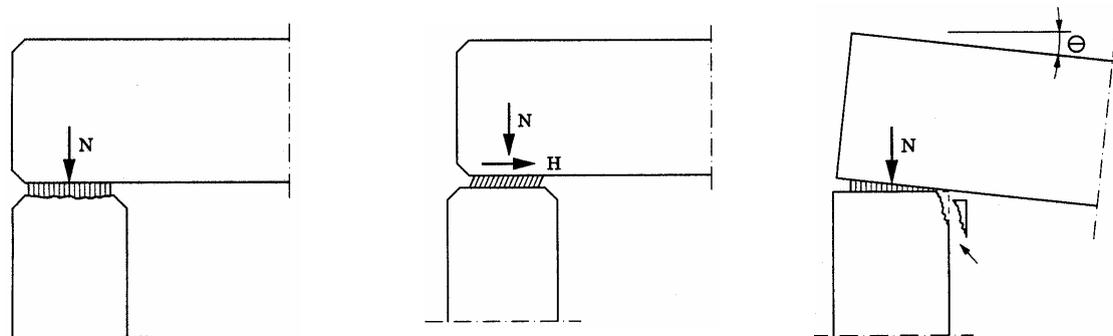


Fig.4.12 Condições de carregamentos em almofadas de elastômero

Argamassas e microconcretos em juntas de compressão entre elementos de pilar e de parede são considerados como materiais não deformáveis (materiais duros). A capacidade de apoio deveria em princípio ser governada pela resistência dos elementos adjacentes e não pela resistência da junta. De acordo com a norma alemã DIN 1045, esta condição é satisfeita quando os seguintes requerimentos são atendidos:

$$r_c = 0.5$$

$$r_{th} = 0.7$$

onde

r_c = relação entre a resistência de compressão da argamassa utilizada na junta e a menor resistência de compressão entre os elementos adjacentes de concreto.

r_{th} = relação entre a espessura e a largura da junta. É geralmente aceito que aquela condição é sempre satisfeita para juntas, as quais são confinadas por concreto estrutural, como por exemplo uma capa de concreto estrutural.

4.4.2 Ligações para Transferência de Forças de Tração

As forças de tração são normalmente transferidas entre os elementos de concreto por meio de diversos tipos de conectores metálicos: esperas de armaduras salientes, ação de pino, chumbadores, conectores soldados, conectores mecânicos, etc.

A resistência de tração de uma ligação pode ser determinada pela resistência e pela seção transversal (ou pela área) dos componentes metálicos tracionados e/ou pela capacidade de ancoragem dos mesmos nos elementos de concreto, a qual pode ser obtida pela aderência ao longo de barras corrugadas ou por meio de vários tipos de ganchos e outras ancoragens mecânicas.

A ancoragem por traspasse (*lapping* » dobra ou sobreposição) é freqüentemente utilizada em elementos de concreto pré-moldado. Os elementos pré-moldados possuem barras salientes para serem embutidas (inseridas ou preenchidas) em concreto moldado no local após a montagem (Fig.4.14). As ancoragens nas extremidades podem ser em formato de laços, dobras, ganchos ou similares. A transferência de força é conseguida através da sobreposição (traspasse) das armaduras salientes dos elementos, mas algumas vezes isto também pode ser feito em combinação com uma ação de pino (Fig.4.15), ou por outros meios.

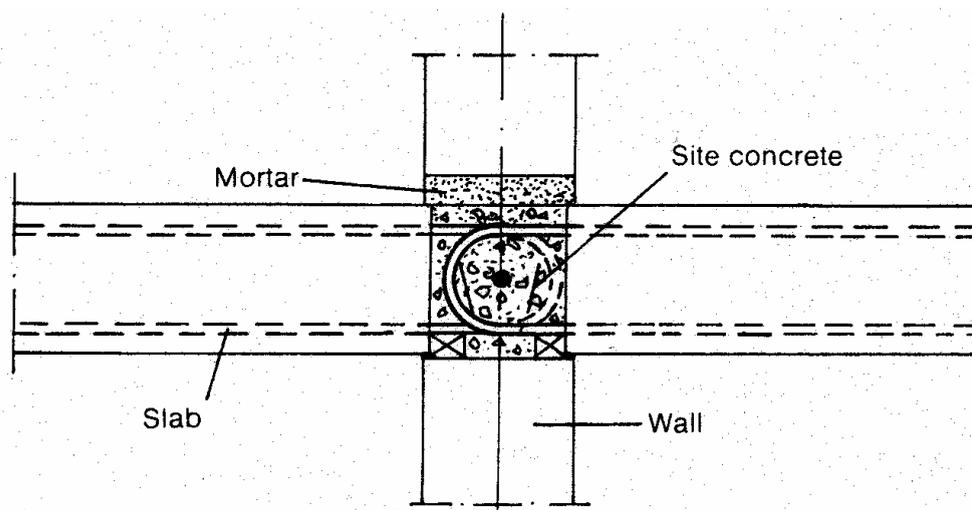


Fig. 4.14 - Ligação de tração com armadura de espera em nichos preenchidos com concreto

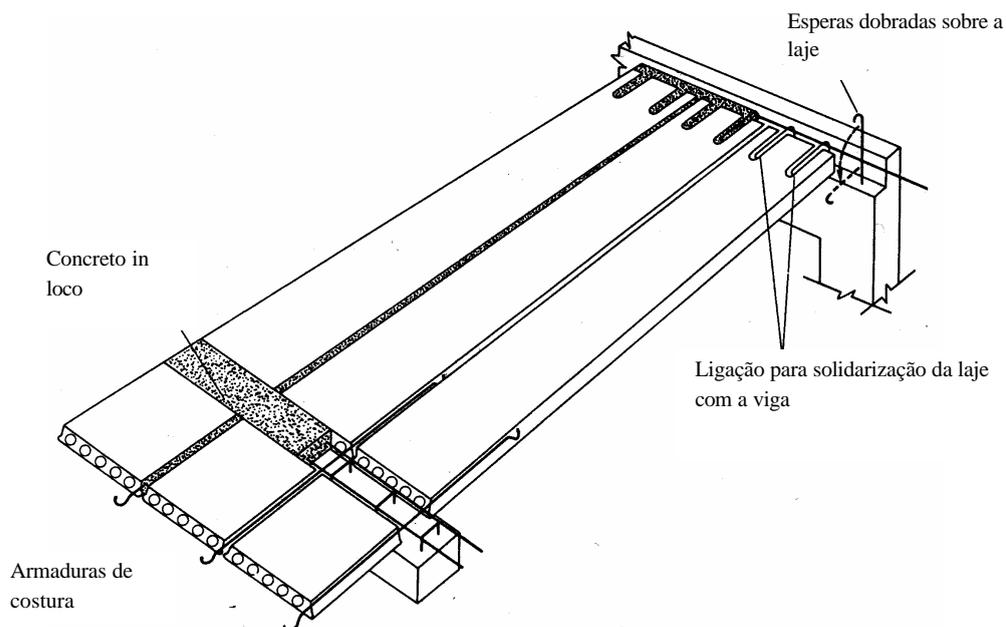


Fig. 4.15 - Ligação de tração por meio de sobreposição de armaduras em laço combinada com ação de pino

Na Figura 4.16 é apresentado um exemplo de painel de fachada fixado à uma laje de piso por meio de chumbadores. As tolerâncias dimensionais são garantidas por meio de trilhos verticais, orifícios ovais nas cantoneiras metálicas e calços metálicos entre os elementos conectados.

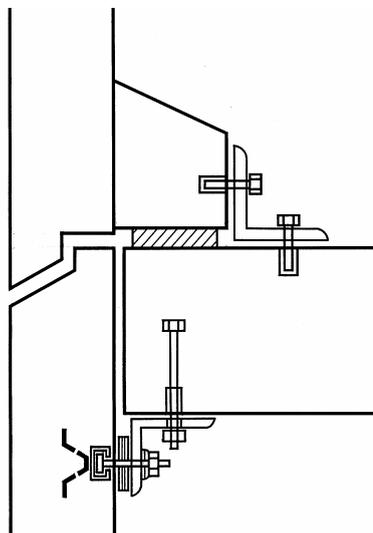


Figura 4.16 Ligações de tração por meio de chumbadores para painéis de fachada

Na Figura 4.17 é apresentado um exemplo semelhante ao da Figura 4.16, mas com conectores soldados. Uma cantoneira é soldada entre uma chapa metálica inserida em um painel de fachada e uma outra cantoneira inserida na borda de um elemento de piso. Recomenda-se deixar uma pequena folga ao redor destas chapas inseridas no concreto (2 mm) para evitar o lascamento do concreto devido à dilatação térmica dessas chapas durante a soldagem na obra.

Os elementos pré-moldados para fachadas são freqüentemente fixados junto à estrutura por meio de fixadores de suspensão, através dos quais se intenciona transferir o peso dos painéis para a estrutura bem como resistir as forças positivas e negativas devidas ao vento (Fig.4.18).

As vigas pré-moldadas são projetadas correntemente como sendo simplesmente apoiadas, onde as ligações viga-pilar apenas necessitam transferir as forças horizontais devido ao vento, decorrentes de movimentos térmicos, etc. As ligações por meio de chumbadores verticais são apropriadas para estes casos (Fig.4.19) e também possuem uma execução e montagem bastante simples. Neste caso, as forças horizontais são transferidas por ação de pino do chumbador inserido nos elementos de concreto, quando o nicho para o chumbador na extremidade da viga é grauteado. Quando se intenciona permitir movimentos horizontais na ligação, este nicho não é preenchido com graute mas com material betuminoso e utiliza-se um chumbador rosqueado parafusado no topo da viga para fornecer estabilidade à ligação.

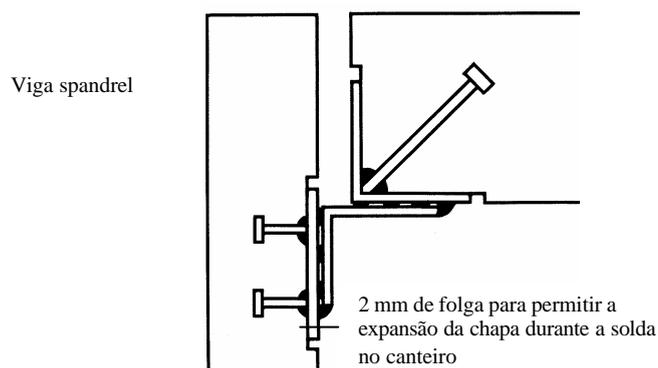


Figura 4.17 Exemplo de ligação de tração por meio de soldagem

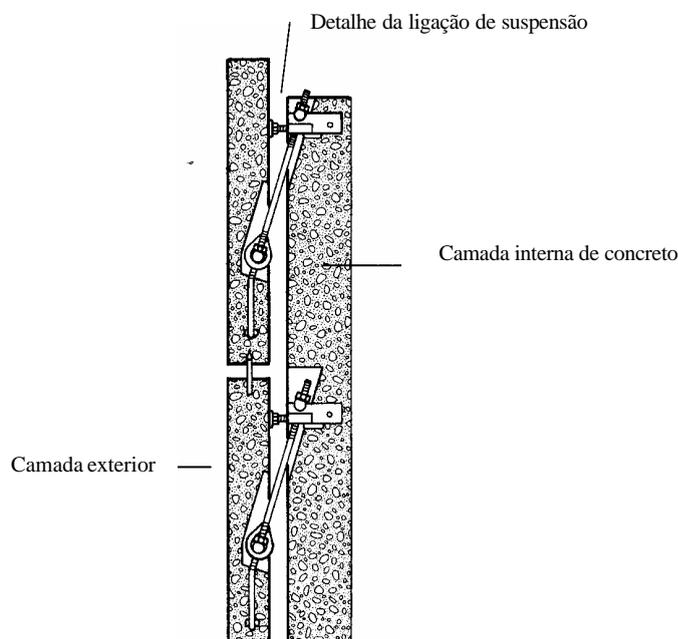


Figura 4.18 Exemplo de painéis fixados com conectores de suspensão

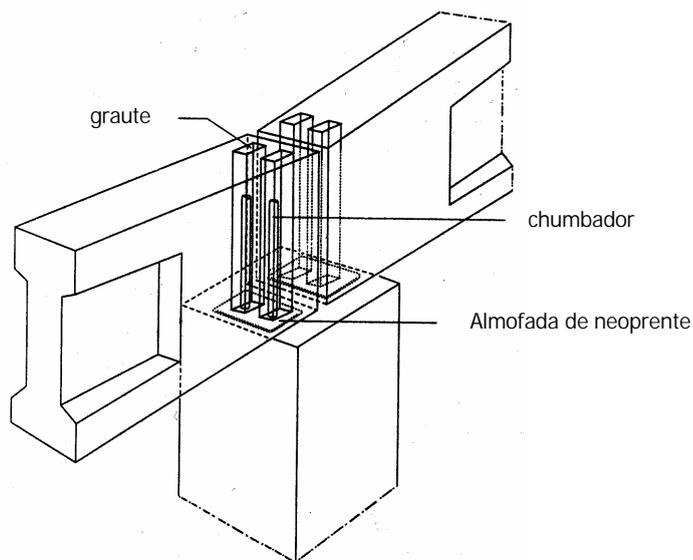


Figura 4.19 – Ilustração de uma ligação por meio de chumbadores

4.4.3 Ligações para Transferência de Forças de Cisalhamento

As forças de cisalhamento entre elementos adjacentes de concreto podem ser transferidas por meio de aderência, por meio do atrito na interface das juntas, por meio de intertravamento das chaves de cisalhamento, por meio da ação de pino em barras ou chumbadores transversais, ou por meio de dispositivos mecânicos. Exemplos de ligações para cisalhamento são apresentados nas figuras 4.20 a 4.22.

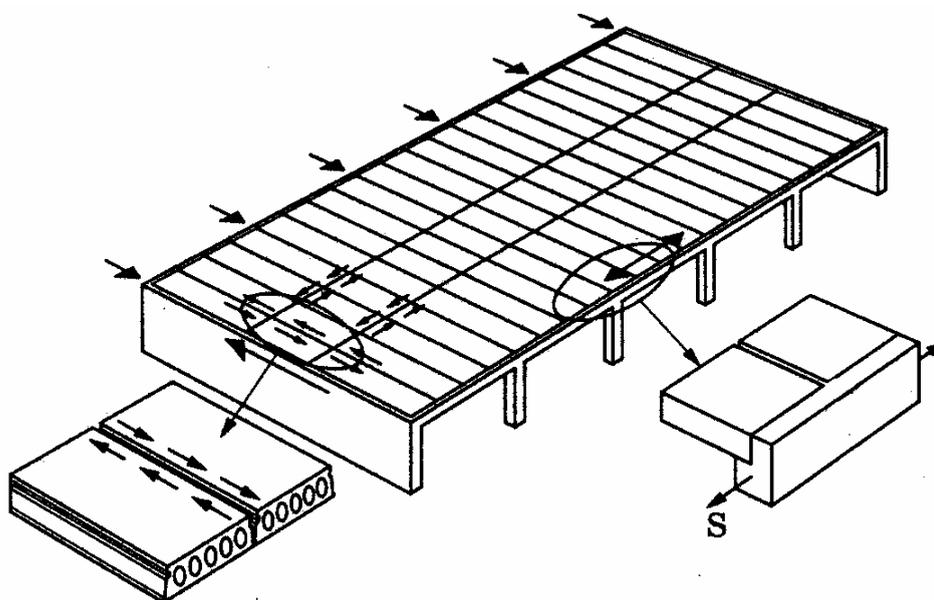


Figura 4.20 – Transferência do cisalhamento por meio do atrito nas juntas longitudinais entre elementos de piso

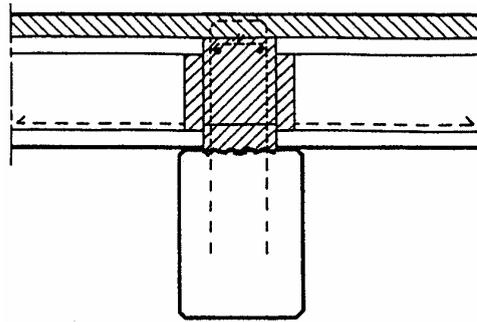


Figura 4.21 – Transferência do cisalhamento horizontal por meio do atrito e de estribos

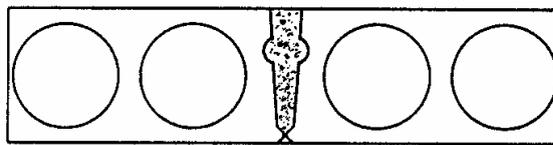


Figura 4.22 – Transferência do cisalhamento vertical por meio de dentes na junta

4.4.4 Ligações para Transferência de Flexão e de Torção

Os momentos fletores são geralmente transferidos entre elementos de concreto por meio do estabelecimento de um binário de tração e compressão, onde o princípio de projeto está baseado na ligação entre as armaduras por meio de sobreposição, chumbamento ou soldagem. Na Figura 4.23 são apresentados exemplos de ligações resistentes à flexão.

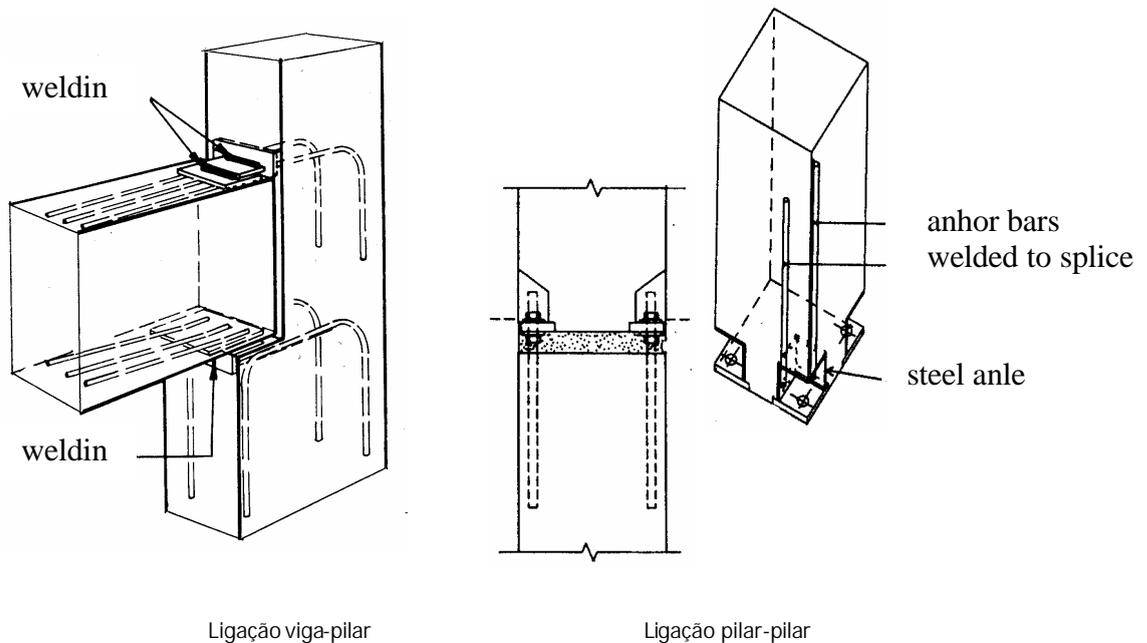


Fig.4.23 Exemplos de ligações resistentes à flexão

Os momentos torsores aparecem freqüentemente nas vigas que suportam as lajes de piso, as quais são carregadas em apenas um dos lados. A torção resultante na viga deveria ser resistida pelas ligações nos

apoios e transformada em momento fletor no elemento de apoio. Assim como no caso do momento fletor, a torção pode ser transferida por ação de um binário de forças (ver Fig.4.24).

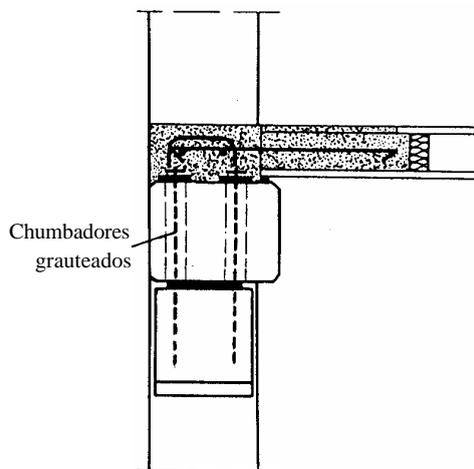


Fig. 4.24 – Exemplo de ligação resistente à torção

4.5. Apoios para Elementos Pré-Moldados

4.5.1 Requisitos Gerais

A integridade dos apoios para elementos de concreto pré-moldado deverão ser garantidos por:

- a) presença de armadura efetiva nos elementos acima e abaixo dos apoios
- b) prevenção de perda de área de apoio por movimentações
- c) limitação das tensões na superfície de contato

Onde é provável de ocorrer grandes rotações nas extremidades dos elementos fletidos, as condições nos apoios devem ser adequadas para acomodar estas rotações. Estas grandes rotações podem também ocasionar na mudança no ponto de aplicação das resultantes das forças para as extremidades das bordas nos apoios, especialmente quando se emprega almofadas de apoio rígidas. Nestes casos, devem ser previstos os possíveis aumentos de momentos fletores ou de tensões localizadas nos apoios.

Os apoios deverão ser dimensionados e detalhados para assegurar um posicionamento correto, considerando as tolerâncias de produção e de montagem. O projeto e dimensionamento dos elementos junto aos apoios deveriam levar em consideração os requisitos de ancoragem e as dimensões necessárias de dobra nas armaduras dentro dos elementos.

4.5.2 Comprimento nos Apoios

O comprimento nominal para os apoios de um elemento pré-moldado simplesmente apoiado é dado pela soma do comprimento do aparelho de apoio (almofada de apoio) mais a somatória das tolerâncias aplicáveis. O comprimento do aparelho de apoio é definido pelas tensões admissíveis na zona de contato entre os elementos. As almofadas de apoio são empregadas para compensar as tensões de contato, devendo as mesmas ser posicionadas a uma certa distância das bordas do elemento suporte para evitar o fendilhamento. O mesmo cuidado deve ser tomado para evitar o fendilhamento na borda inferior no apoio das vigas. Além disso, devem ser previstas tolerâncias no comprimento do elemento de viga e para as folgas entre as duas extremidades da viga e os elementos suporte (no caso pilares).

A tabela seguinte fornece valores indicativos para o comprimento de apoio nominal "a" (Fig.4.25) para elementos de laje e de viga simplesmente apoiados em função do material da estrutura de apoio.

Tabela 4.26 – Valores indicativos para o comprimento de apoio nominal "a"

Elemento apoiado	Estrutura de apoio	Espessura de lajes ou comprimento de vigas	comprimento de apoio nominal "a"
Lajes alveolares	concreto/aço	= 250 mm	60 - 70 mm
		> 250 mm	100 - 130 mm
	alvenaria	= 250 mm	100 mm
		> 250 mm	120 mm
Pisos com placas de concreto	concreto		
	- com escoramento	-	30 mm
	- sem escoramento		50 mm
Pisos com placas de concreto	alvenaria	-	
	- com escoramento		=40 mm
	- sem escoramento		=50 mm
Lajes com vigotas	concreto/aço	-	85 - 100 mm
	alvenaria		= 100 mm
Lajes nervuradas	concreto	=15 m	150 mm
Vigas de cobertura secundárias	concreto	=8 m	140 mm
Vigas para pisos	concreto	12 - 20 m	200 - 230 mm
Vigas para coberturas	concreto	=24 m	195 mm
		=40 m	225 mm

De acordo com o Eurocode 2 [2], o comprimento nominal para apoios simples, conforme indicado na Figura 4.25, pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$a = a_1 + a_2 + a_3 + \sqrt{\Delta_2^2 + \Delta a_3^2}$$

onde

a_1 é o comprimento da almofada (aparelho) de apoio em relação à tensão de contato

b_1 é a largura da almofada (aparelho) de apoio

a_2 é a distância assumida como não efetiva para apoio na borda externa do elemento suporte (pilares ou consolos no caso de apoios para vigas), onde o valor usual varia entre 10 e 15 mm para apoios em juntas longitudinais (como nos apoios para lajes) e entre 10 e 25 mm para apoios concentrados (como nos apoios para vigas).

a_3 é a distância assumida como não efetiva para apoio na extremidade do elemento a ser suportado (vigas ou lajes), onde o valor normal usual varia entre 5 e 15 mm.

Δa_2 é uma tolerância para a distância entre os elementos suporte (elementos de apoio » pilares ou vigas). $\Delta a_2 = \text{comprimento do vão} / 1200$

Δa_3 é uma tolerância para o comprimento do elemento de viga ou de laje (elemento a ser suportado). $\Delta a_3 = \text{comprimento do elemento} / 2500$

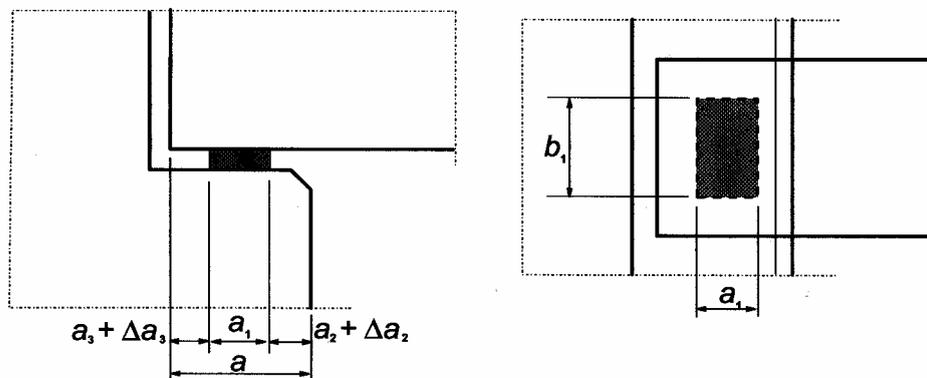


Fig. 4.25 Exemplo de Apoio Simples

4.6. Consolos de Concreto

4.6.1 Geral

Os consolos são geralmente empregados nas estruturas pré-moldadas para as ligações viga-pilar e ligações viga-viga, mas também são empregados para ligações piso-parede. Na Figura 4.27 são apresentados diferentes tipos de consolos. O tipo "c" é difícil de produção devido a complexidade de execução para formas e armaduras, devendo ser empregado somente quando for realmente necessário. A alternativa recomendada é empregar 4 consolos simples.

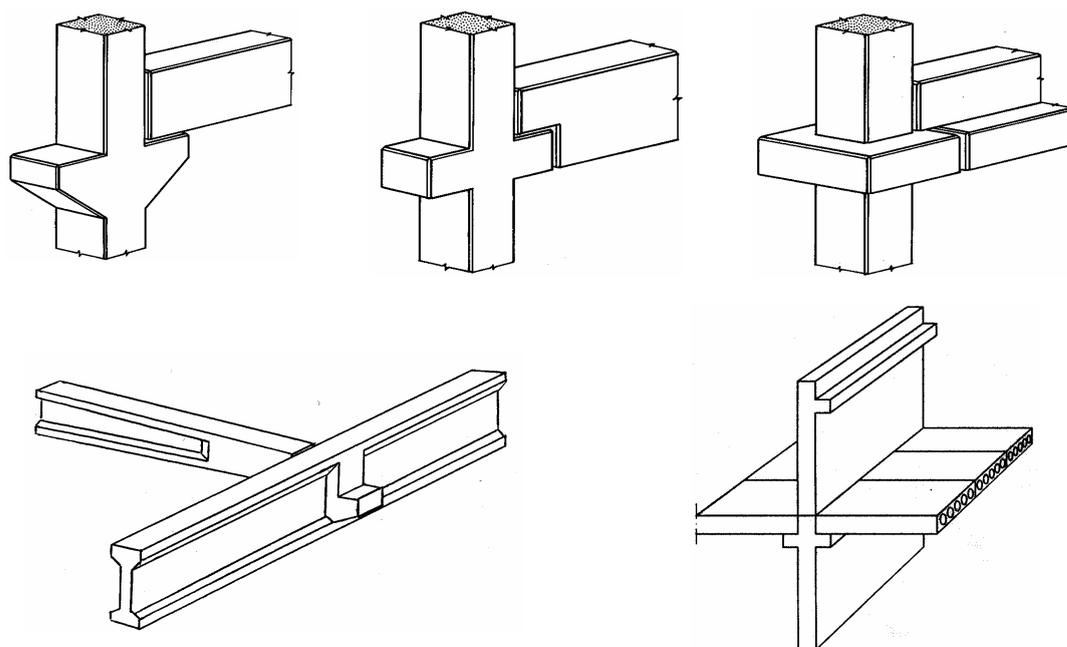


Fig. 4.27 Exemplos de consolos de concreto

4.6.2 Projeto de Consolos

Recomendações para as dimensões de consolos em pilares são fornecidas na Figura 4.28. A distância a_0 do ponto de aplicação da força até a face do pilar não deve ser maior do que "d", que é a altura efetiva do consolo. A altura h_1 da face do consolo não deve ser inferior que a metade da altura total "h". O comprimento do consolo ℓ não deve ser maior que $0.7h$. Por razões de padronização, recomenda-se padronizar o comprimento ℓ para 300 mm ou 400 mm.

$a_0 = d$ valor recomendado entre: $0.4d$ a $0.6d$

$h_1 = a_0$ valor mínimo de $0.5h$

$\lambda < 0.7 h$ usualmente $\ell = 0.5h$, mas é melhor modular para 300 ou 400 mm.

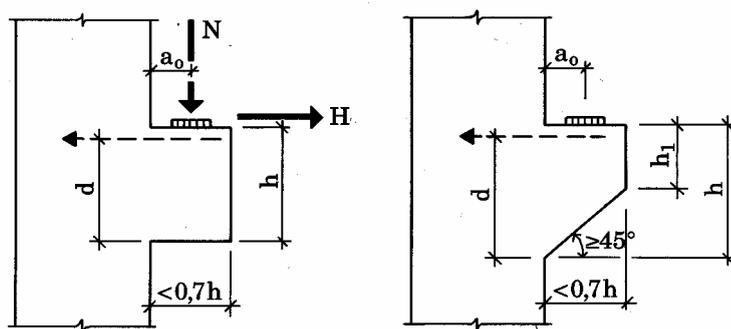


Figura 4.28 – Dimensões recomendadas para consolos de concreto

Os consolos em pilares e em vigas são projetados usualmente com base nos modelos de bielas e tirantes conforme apresentado no Eurocode 2 EN 1992-1-1, sessão 6.5, ou na norma inglesa BS 8110, Parte 1, item 5.2.7 [3]. A inclinação da biela comprimida de concreto é limitada por $1,0 = \tan \theta = 2.5$ (para θ ver Figura 4.29).

Além da força vertical N , o consolo deve ser projetado para resistir a uma força horizontal complementar induzida por deformações por fluência, retração, expansão térmica ou contração devido à variação de temperatura, particularmente no caso de vigas protendidas longas. Na falta de cálculo mais elaborado, a força horizontal no consolo pode ser considerada como sendo igual a 15% da carga vertical, ou seja, $H_c = 0.15 N_c$. Outras ações horizontais, como as ações na ponta dos guindastes ou outras ações durante a montagem também deveriam ser consideradas no cálculo.

Na Figura 4.26 são apresentadas as trajetórias das linhas de tensões decorrentes de um consolo carregado para dentro de um elemento de pilar. As tensões correspondentes são consideradas no cálculo por meio de uma biela comprimida de concreto F_c e uma força de tração no tirante horizontal F_s . A largura da biela de compressão é uma função da resistência de compressão para projeto do concreto. A armadura tracionada no consolo deve ser devidamente ancorada no pilar. No caso de consolos duplos nas faces opostas do pilar, a armadura de tirante interliga esses dois consolos. Para um consolo simples, a armadura principal deve ser devidamente ancorada no lado oposto do pilar e com sobreposição junto a armadura longitudinal do pilar. Informações mais detalhadas sobre os arranjos e detalhes típicos para armaduras de consolos são fornecidas na sessão 4.6.3.

Consolos em paredes são geralmente projetados com balanços curtos com mecanismos resistentes por flexão e cisalhamento. No caso da utilização de almofadas de argamassas ou de elastômeros para se obter uma melhor distribuição das tensões nos apoios para grandes elementos de piso, a largura no apoio para projeto b_1 (ver Fig.4.25) pode ser considerada como sendo igual à largura efetiva no apoio.

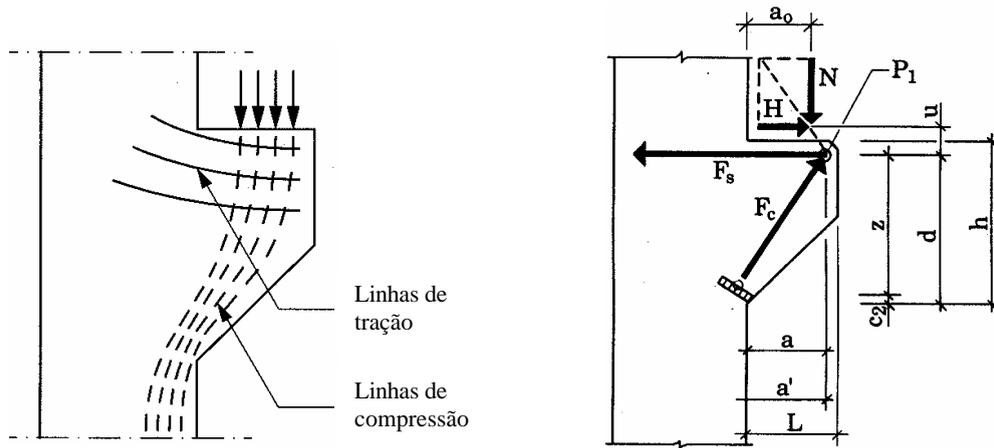


Figura 4.29 – Trajetória das tensões e modelo de bielas e tirantes em consolos de concreto

4.6.3 Detalhamento da Armadura em Consolos

Existem vários pontos críticos para serem considerados no detalhamento prático da armadura de consolos. O primeiro problema é relativo à curta distância existente entre a linha de aplicação da força vertical e a borda do consolo. O componente tracionado do modelo biela-tirante deve ser adequadamente ancorado além da linha de aplicação da força vertical. Todavia, isto pode ser difícil por causa do grande diâmetro de dobra das barras da armadura de tirante, fazendo com que o canto superior do consolo pouco armado.

Existem várias formas de ancorar a armadura principal de tração na borda superior do consolo:

- Por meio de solda entre a armadura de tirante do consolo e uma barra transversal posicionada na borda superior do consolo (Fig. 4.30.a)
- Utilizando estribos horizontais em forma de "U" (ou em laço) na borda superior do consolo (Fig. 4.30.b)

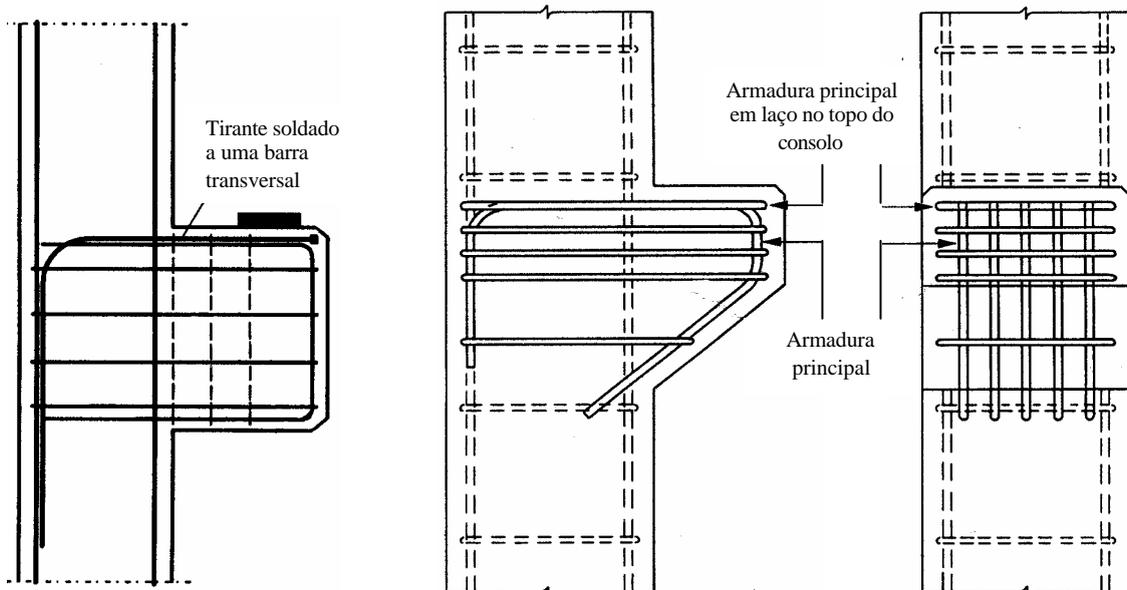


Figura 4.30 – Exemplos de ancoragem para a armadura principal nos consolos

O segundo problema está relacionado com o detalhamento da armadura para consolos em múltiplos planos, particularmente quando esses estão todos em um mesmo nível. O congestionamento na região dos tirantes horizontais pode ser aliviado por meio da variação da altura do topo do consolo por pelo menos 50 mm, ou adicionando-se um inserto metálico especial para transmitir as forças de tração necessárias nos tirantes.

O terceiro problema está relacionado com as tensões nos apoios junto às dobras na armadura. Isto pode ser resolvido empregando-se barras com diâmetros menores, $\phi < 25$ mm. Elliott [4] recomenda que a região de distúrbio nos pilares pode se estender para uma distância igual a $1.5h$ acima do topo do consolo e $1.5h \times \cos \theta$ abaixo da base do consolo, sendo que armaduras adicionais deveriam ser previstas dentro destas regiões nos pilares.

Um quarto problema com relação aos consolos em planos múltiplos é que as formas necessitam de detalhes especiais para cada projeto. Isto é dificultado quando os elementos são moldados em linhas de produção. Quando os consolos estão em apenas um dos lados do pilar, estes são posicionados na face superior da forma, permitindo a utilização de equipamentos convencionais para formas. Todavia, quando os consolos estão em mais de uma face, os sistemas com formas padrões necessitam ser modificados para inserir as formas para os consolos. Para solucionar este problema, os pilares deveriam ser concretados em duas etapas. Na primeira etapa, o pilar é concretado sem consolos, a menos no caso de consolo na face superior da forma. Na posição dos consolos, acopladores rosqueados (luvas rosqueadas) devidamente ancorados são posicionados dentro da forma do pilar para receber a armadura do consolo após a desmoldagem do pilar. Para melhorar a transferência das tensões de cisalhamento, um recesso de ± 20 mm é deixado na face do pilar na altura do consolo ou aplica-se um agente retardador para expor o agregado. Na segunda etapa, após a desmoldagem do pilar, a armadura de tirante do consolo é rosqueada dentro dos acopladores embutidos no pilar juntamente com as demais estribos e os consolos são concretados em alguns dias mais tarde.

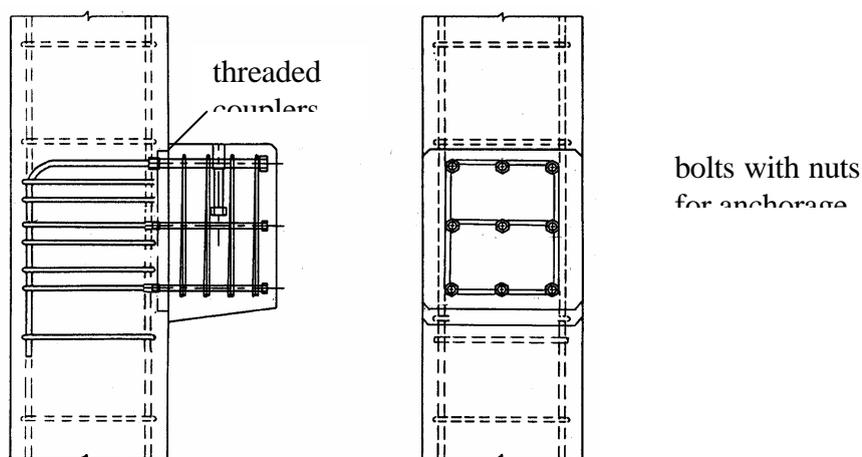


Fig. 4.31 Exemplo de um consolo executado em duas etapas

4.7. Outros Critérios para Projetos

Um dos princípios mais importantes no projeto de ligações é a busca contínua por soluções simples. A máxima economia em uma construção pré-moldada é atingida quando os detalhes das ligações são razoavelmente simples, com um desempenho adequado e com uma montagem rápida. Além disso, ligações complexas são mais difíceis de serem projetadas, para serem produzidas e geralmente resultam em montagens complicadas no canteiro. Isto pode contribuir para atrasar a montagem e também para um desempenho menos satisfatório.

4.7.1 Produção

Abaixo segue uma lista com itens para serem considerados durante o projeto de modo a melhorar a simplicidade na produção. Em muitos casos, alguns destes itens precisam ser comprometidos para fazer com que a ligação possa desempenhar uma função específica.

Evitar Congestionamento

A região no elemento onde a ligação é executada freqüentemente requer uma grande quantidade de insertos metálicos e armadura adicional. Assim, é importante projetar as ligações de tal forma que haja espaço suficiente para uma concretagem adequada entre os diferentes detalhes da ligação. No caso de suspeita de congestionamento, é útil utilizar escalas maiores para detalhar a área da ligação em questão.

Evitar Furos nas Formas

Projeções que requerem furações nas formas são trabalhosas e reduzem a vida útil das formas. Assim, onde possível, essas projeções deveriam ser limitadas para a face superior do elemento a ser concretado.

Minimizar o Número de Itens Embutidos (“Detalhes” Embutidos)

Os itens que são embutidos no elemento de concreto, assim como insertos, chapas, etc., requerem maior trabalho durante a produção para posicioná-los precisamente e para fixá-los de modo seguro. Portanto, esses itens devem ser minimizados. Isto se aplica especialmente para itens embutidos na face superior. Todavia, se a mesma chapa metálica é disposta no fundo ou sobre o lado da forma, isto pode ser posicionado com grande exatidão.

Empregar Itens Padronizados

Em todas as partes possíveis os itens metálicos, como os insertos, as formas metálicas, etc., deveriam ser itens padronizados que estão prontamente disponíveis, preferivelmente, por mais de um fornecedor. Isto também simplifica a fabricação se itens similares em um produto ou projeto são padronizados como para o tamanho e a forma. Neste caso existem margens menores para ocorrerem erros na produção.

Utilizar Repetição de Detalhes

É bastante desejável que ocorra repetição nos detalhes o tanto quanto possível. Detalhes similares devem ser idênticos, mesmo se isto significar num pequeno excedente no projeto. Uma vez que a mão-de-obra está familiarizada com um detalhamento típico, torna-se mais fácil de repeti-lo do que para se aprender a executar um novo detalhe. Além disto, quanto maior a repetição menor será o trabalho para preparação das formas, melhorando assim o cronograma de fabricação.

Permitir Materiais ou Métodos Alternativos

Muito freqüentemente, um fabricante de estruturas pré-moldadas irá preferir certos detalhamentos em lugar de outros. O fabricante deve ser livre para empregar métodos ou materiais alternativos, desde que os requisitos de projeto sejam satisfeitos. Permitir soluções alternativas resulta geralmente em ligações mais econômicas e com melhor desempenho.

Utilizar detalhes “à prova de erros”

A regra geral é que os dispositivos e componentes nas ligações devem ser “à prova de erros” o máximo possível, desde o posicionamento na forma, corretamente orientados e dentro das tolerâncias necessárias, com esforço mínimo e sem possibilidades para enganos.

4.7.2 Estocagem e Transporte dos Elementos Pré-Moldados

Uma devida consideração deve dada para o fato de que a forma e as dimensões dos detalhes nas ligações escolhidas podem causar problemas durante o transporte e armazenamento dos elementos. As barras da armadura ou outros componentes salientes na ligação podem ser incômodos durante o manuseio e a

estocagem. Eles também podem dificultar um carregamento eficiente dos caminhões. As barras salientes (barras de espera) podem algumas vezes serem substituídas por acopladores com rosca inseridos nos elementos e com emendas por barras rosqueadas ou, ainda, ou por barras que possam ser parafusadas em insertos no canteiro.

4.7.3 Levantamento e Montagem dos Elementos Pré-Moldados

Muitas das vantagens da construção em concreto pré-moldado está relacionada com a possibilidade do rápido levantamento da estrutura. Para tirar maior partido deste benefício e manter os custos dentro de limites razoáveis, as ligações executadas na obra devem ser simples. Todavia, para atender aos requisitos de projeto, algumas vezes é necessário comprometer a simplicidade de fabricação e de montagem.

As ligações devem ser projetadas de modo que os elementos possam ser içados, posicionados e desenganchados dos equipamentos o mais rápido possível. Quando é necessário travar os elementos antes de desenganchá-los para se obter uma estabilidade temporária, esta operação deveria ser tão rápida e simples quanto possível e não ser afetada pelas condições climáticas. As ligações que demandam mover o elemento horizontalmente na posição final ou necessitam levantar os elementos em um ângulo inclinado deveriam ser evitadas.

Para um rápido levantamento dos elementos é necessário que as ligações sejam ajustáveis para permitir os desvios dimensionais. Não apenas as tolerâncias dos elementos pré-moldados devem ser consideradas mas também o risco do posicionamento incorreto desses elementos. Isto pode ser decorrente de desvios na locação e/ou execução da fundação moldada no local ou da estrutura de apoio. Com este respeito, é recomendável permitir o máximo de tolerâncias quanto possível para estas partes da construção. Por exemplo, as folgas entre a estrutura moldada no local e os painéis de fechamento não são normalmente visíveis na edificação acabada, e portanto, dentro de limites razoáveis, estas folgas poderiam ser tão largas quanto as considerações práticas demandam.

As ligações devem ser acessíveis durante a montagem, para posicionar e fixar parafusos e porcas, para executar serviços de soldas e para inspecionar e checar a qualidade mais tarde. O risco de empregar os detalhes das ligações incorretamente pode ser minimizado utilizando soluções simples mas apropriadas.

No projeto dos elementos pré-moldados é muito importante considerar as ações e os esforços que ocorrem nas chamadas situações transientes. Durante o manuseio, estocagem, transporte e içamento, os detalhes das ligações podem ser expostos a casos especiais de carregamento. Apoios temporários, carregamentos excêntricos durante o levantamento, forças de vento antes que a estrutura esteja completa, içamento e estabilização temporária são exemplos de situações transientes.

Capítulo 5 – Estruturas em Esqueleto

5.1 Introdução

As estruturas de esqueleto em concreto pré-moldado consistem de um conjunto de elementos de viga e pilar, interligados de forma racional entre si para compor um sistema estrutural que seja capaz de suportar e transferir as ações verticais e horizontais dos pavimentos e fachadas para as fundações. As estruturas de esqueleto são empregadas em edificações com poucos ou vários pavimentos. As diferenças entre as estruturas de esqueleto moldadas no local e as pré-moldadas estão na filosofia geral do projeto, na presença das ligações entre os componentes pré-moldados e nas possibilidades para maiores vãos e seções transversais reduzidas no caso das peças protendidas.

Existem dois tipos básicos de estruturas de esqueleto em concreto pré-moldado:

A estrutura em esqueleto com traves planas: consiste de pilares e vigas de fechamento (cobertura), as quais são empregadas em construções de um pavimento, como em armazéns e construções industriais;

A estrutura em esqueleto aporticada consiste de pilares, vigas e lajes, as quais são empregadas em construções de média e maior altura, com poucas paredes de contraventamento. Essas soluções são comuns para edifícios comerciais, edifícios de escritórios e em estacionamentos.

As considerações gerais no projeto em estruturas pré-moldadas, ao contrário do projeto detalhado das peças pré-moldadas, incluem a seleção do sistema estrutural, a otimização do uso dos componentes, o suprimento de serviços (fabricação, transporte e montagem), características especiais e outros itens que requerem especificações, assim como aspectos estéticos e acabamento entre outros requisitos de desempenho.

Na maior parte dos casos, a seleção dos componentes internos para compor o sistema estrutural é controlada pelas exigências do layout da edificação, tais como a necessidade de vãos maiores, localização, tamanho e orientação dos poços de elevador, caixas de escada e mezaninos, bem como a distribuição do espaço interno do edifício. A escolha dos componentes externos é definida pelas características da fachada, onde o projetista pode especificar uma estrutura externa, diferente do arranjo interno, e ajustar os componentes estruturais que adequem tanto aos requerimentos internos quanto externos.

5.2 Tipos de pórticos e estruturas de esqueleto

Existem diferentes soluções para estruturas de concreto pré-moldado, as quais variam de acordo com a altura e com a função da edificação.

5.2.1 Estruturas de Traves Planas (Aporticadas)

Os componentes básicos de uma trave aporticada consistem de dois pilares e uma viga de fechamento (cobertura). Os pilares são engastados nas fundações e funcionam como uma viga em balanço. A viga é simplesmente apoiada nos pilares com ligações com chumbadores. Desta forma, uma trave plana estável é concebida para resistir às ações verticais e horizontais. O esqueleto total da estrutura é composto por uma série de traves planas posicionadas a uma certa distância uma das outras (figura 5.1).

As ações verticais são transferidas dos elementos de cobertura para as vigas e depois para os pilares. As ações horizontais, devidas ao vento e outros efeitos na fachada, são distribuídos para os pilares das traves pela ação de diafragma na cobertura (Fig.5.3).

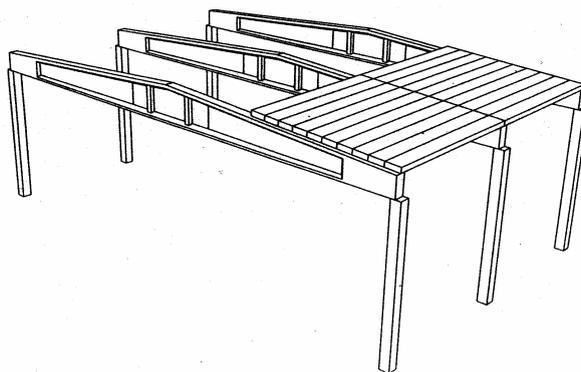


Fig. 5.1 Traves aporticadas apoiando a cobertura e os elementos de fachada, distantes entre si entre 5 e 12 m.

À distância entre as traves aporticadas é definida pelo vão da cobertura e pela tipologia construtiva da fachada, normalmente de 6 m para peças de concreto celular (fig. 5.2), de 6 a 9m para as lajes alveolares de cobertura e 9 a 12m para coberturas com nervuras (Fig. 5.3).

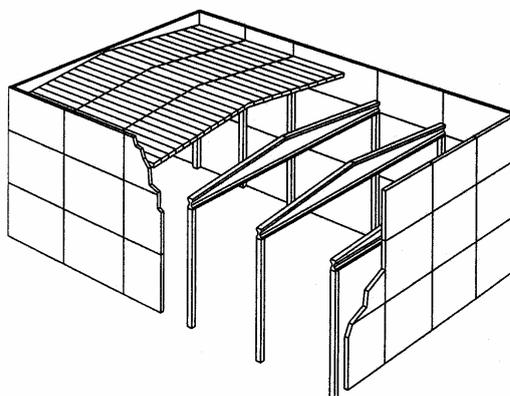


Figura 5.2 Trave aporticada com concreto celular ou lajes alveolares como elementos de cobertura.

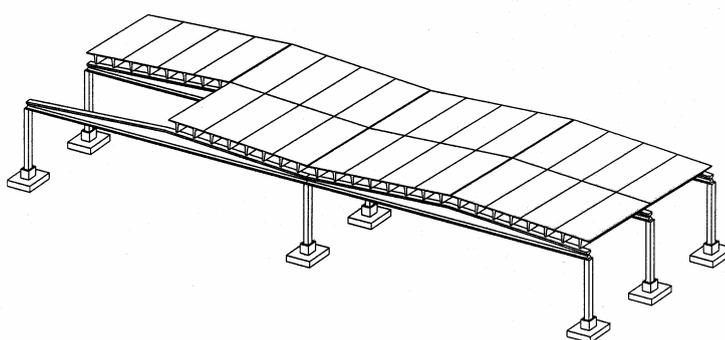


Figura 5.3 Trave aporticada e cobertura com painéis nervurados protendidos.

As vigas de cobertura podem ter superfície inclinada ou perfil reto. As mesmas soluções para os elementos de cobertura também são empregadas aqui. A inclinação da cobertura para drenagem da água de chuva é conseguida alternando-se a altura das linhas de sustentação da viga. Na fachada, as lajes de cobertura são apoiadas em vigas ou em paredes portantes.

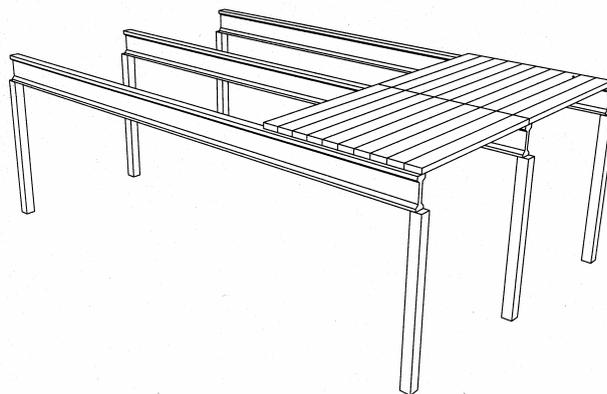


Figura 5.4 Traves planas apoiadas com vigas retas para cobertura.

Quando a distância entre as traves planas apoiadas é maior do que o vão dos elementos de cobertura, como por exemplo no caso de lajes de concreto celular com 100 mm de espessura, são necessárias vigas secundárias para apoio desses elementos de cobertura (Fig.5.5). O comprimento dessas vigas é da ordem de aproximadamente 8 a 12 m.

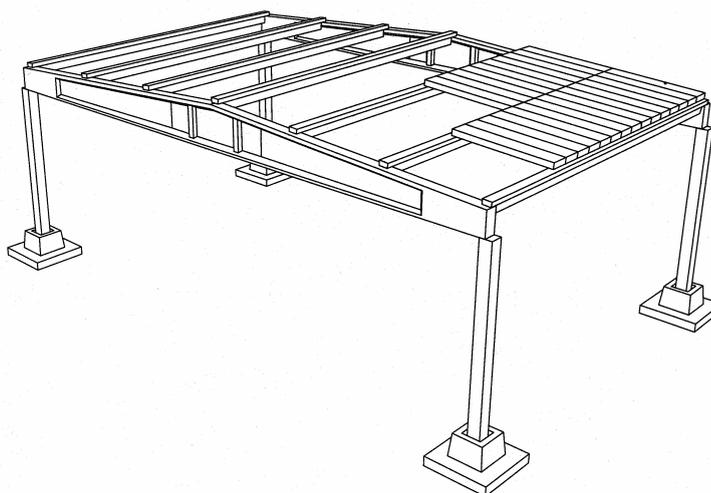


Figura 5.5 Traves apoiadas com vigas secundárias para cobertura.

Grandes áreas livres de pilares são obtidas pelo uso de vigas longitudinais primárias intermediárias que apoiam as vigas principais de cobertura (Fig.5.6). Neste caso, é recomendado apoiar as vigas principais de cobertura diretamente sobre os pilares e colocar as vigas primárias de fechamento sobre os consolos dos pilares (Fig.5.6). Há duas razões para isto: primeiramente, para promover a estabilidade durante o içamento e a montagem é aconselhável evitar colocar mais de dois elementos pré-moldados em cima um do outro; uma segunda razão é a dificuldade de se colocar a viga principal da cobertura no topo para a ligação entre as duas vigas primárias.

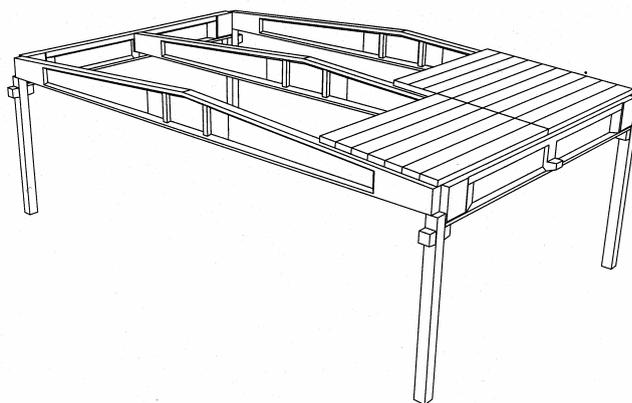


Figura 5.6 Estrutura com traves aporticadas com vigas de cobertura principais e vigas primárias de fechamento.

O comprimento recomendado para os vãos, para os tipos de estruturas pré-moldadas descritos acima, estão listados na tabela abaixo.

	Mínimo	Ótimo	máximo
Vão da viga principal do cobertura (B)	12	18 - 32	45
Vão da viga secundária	4	8 - 12	12
Vão da viga primária (C)	12	12 - 18	24
Altura da pilar (H)	4	8	20

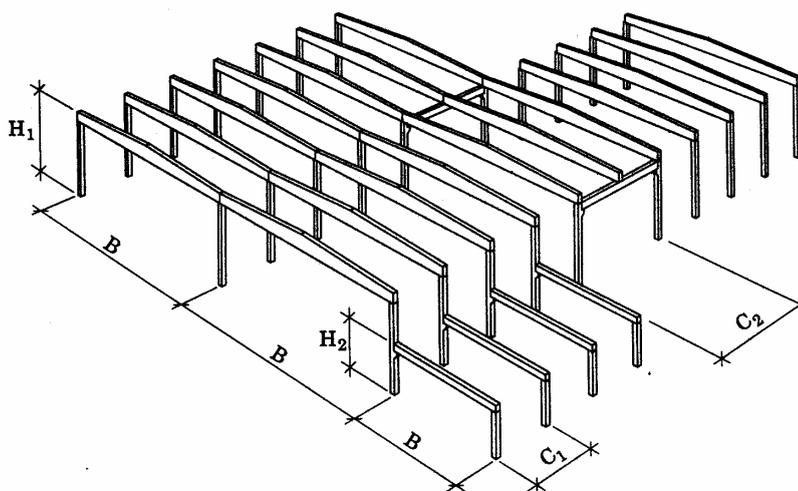


Figura 5.7 – Diretrizes para vãos em traves planas (dimensões em m)

5.2.1.1. Soluções Alternativas

Uma solução alternativa para estruturas com traves planas consiste em empregar grandes vãos, onde as vigas e os elementos de cobertura são interligadas entre si para compor um telhado duas águas, como mostra a Figura 5.8. Neste caso, o vão para cobertura duas águas pode variar entre 9 e 32 m.

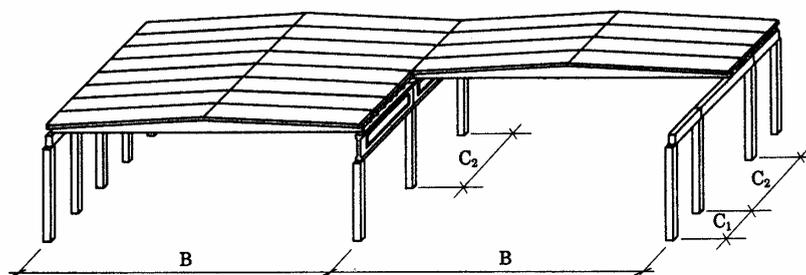


Figura 5.8 Elementos de laje em duplo "T", com duplo caimento para telhado duas águas, apoiados em traves planas longitudinais.

5.2.1.2. Estruturas com Traves Planas Aporticadas com Pisos Intermediários

Em edificações de apenas um pavimento é possível inserir pisos intermediários em algumas partes da construção ou cobrindo toda a planta. Geralmente, isto é conseguido por meio de uma ligação viga-pilar adicional para apoiar as lajes de piso intermediário. Como as sobrecargas sobre esses pisos são geralmente bem maiores do que na cobertura, os vãos também serão menores. Com base na figura 5.9, o vão "A" será de 6 a 18 m, dependendo da sobrecarga e do tipo de elemento selecionado. Uma boa modulação para o vão "B" com lajes alveolares protendidas ou com painéis com nervuras protendidas vai de 7.20 a 9.60 m. Para elementos de cobertura com concreto celular, o vão empregado deve ser normalmente limitado para 6 m.

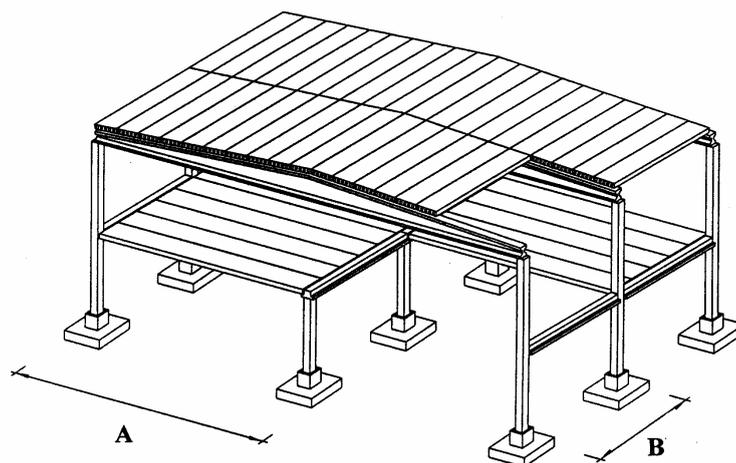


Figura 5.9 Estrutura aporticada com andar intermediário.

Geralmente, as estruturas em traves planas de baixa altura são estabilizadas pela ação em balanço dos pilares, os quais são engastados nas fundações por meio de ligações resistentes à flexão.

5.2.2. Estruturas de Esqueleto

As estruturas de concreto pré-moldado para múltiplos pavimentos são constituídas de elementos de vigas e pilares com diferentes formas e tamanhos, elementos de laje para piso, escadas, poços de elevador, etc. As juntas entre os elementos de piso são feitas de tal forma que as ações concentradas sejam distribuídas por todo o piso. Esse sistema é largamente empregado para edificações até 20 pavimentos ou mais.

O pórtico estrutural é geralmente composto por pilares retangulares com comprimento superior à altura de um ou mais pavimentos (geralmente até quatro pavimentos). As vigas são normalmente em formato retangular, em formato L ou T invertido, com apoios simples e conectadas por meio de chumbadores nos topos dos pilares ou sobre consolos de concreto, ou mesmo com ligações desenvolvidas especialmente para ficarem embutidas. As lajes alveolares protendidas para cobertura são os tipos mais comuns de serem empregadas nesse tipo de estrutura.

Para construções com até três ou quatro pavimentos, a estabilidade horizontal pode ser facilmente conseguida pelo efeito do balanço dos pilares. Contudo, para as estruturas de esqueleto para múltiplos pavimentos, a solução mais efetiva é utilizar sistemas de contraventamento, independente do número de pavimentos. A rigidez horizontal é conseguida por meio de caixas de escadas, poços de elevadores e paredes de contraventamento. Neste caso, os detalhes das ligações e o projeto das fundações são bastante simplificados. Os núcleos centrais de contraventamento podem ser moldados no local ou pré-moldados na fábrica.

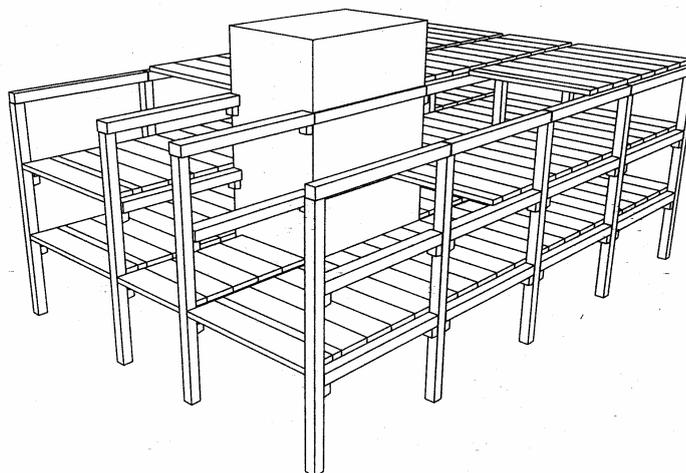


Figura 5.10 Estrutura de esqueleto pré-moldada típica com núcleo central para prover estabilidade horizontal.

A altura recomendada para comprimentos de vãos e de altura dos pilares estão apresentados na Tabela 5.11. Nas últimas décadas, tem havido um aumento constante no comprimento dos vãos para lajes alveolares protendidas para atender à necessidade de espaços abertos maiores, especialmente em edifícios administrativos. Atualmente, é uma prática comum (na Europa) empregar lajes alveolares para pisos com 400 mm de espessura, com vãos de até 17 m para sobrecargas de 5 kN/m². Em alguns países, o conceito de vencer vãos de uma fachada para outra sem apoios intermediários é muito aplicado em edifícios comerciais.

Tabela 5.11 Diretrizes para comprimentos e vãos de pilares

	Mínimo	Ótimo	Máximo
Comprimento das vigas (m)	5	1- 9.60	14
Vão das lajes de pisos (m)	6	7 – 14	18 – 20
Altura da pilar (m)	3 – 4	6 – 12	20 – 25

5.3. Layout e Modulação da Construção Pré-Moldada

O uso planejado das edificações irá determinar em muitos casos o comprimento dos vãos e a direção das vigas e, portanto, a seleção dos tipos de vigas e lajes para pisos e cobertura.

Em construções industriais, as vigas de fechamento normalmente irão vencer os vãos na direção do menor lado do piso retangular, onde os elementos de laje para piso também irão se estender para a mesma direção. A razão para isto está em facilitar: a repetição dos elementos; a possibilidade para utilizar as bordas das vigas de fechamento para apoiar os elementos de fechamento para fachada; a seqüência de içamento das peças, etc. Para projetos com pisos quadrados, os compartimentos serão escolhidos de acordo com o tipo de utilização da edificação.

Em edifícios comerciais e em estruturas de esqueleto altas, os vãos dos elementos de laje são, geralmente, perpendiculares à fachada principal.

A modulação é um fator econômico importante no projeto e na construção das edificações pré-moldadas, tanto para as partes estruturais quanto para o acabamento. O uso de um planejamento modular não implica na limitação da liberdade de projeto, pois o mesmo é apenas um instrumento para se conseguir um trabalho sistêmico e econômico, além de simplificar as ligações e detalhes.

Contudo, existem algumas diretrizes para proporções do projeto em planta, as quais podem ser plenamente empregadas para simplificar a construção. A largura dos elementos de laje pode ser modulada em 1200 e 2400 mm. É aconselhável, durante o planejamento da construção, modular as dimensões para combinar a largura dos elementos. Numa estrutura simples, todos os elementos de laje deveriam ser posicionados na mesma direção para simplificar o layout e, no caso das peças protendidas, limitar as possíveis diferenças entre as flechas dos diferentes elementos de laje que compõem o mesmo piso.

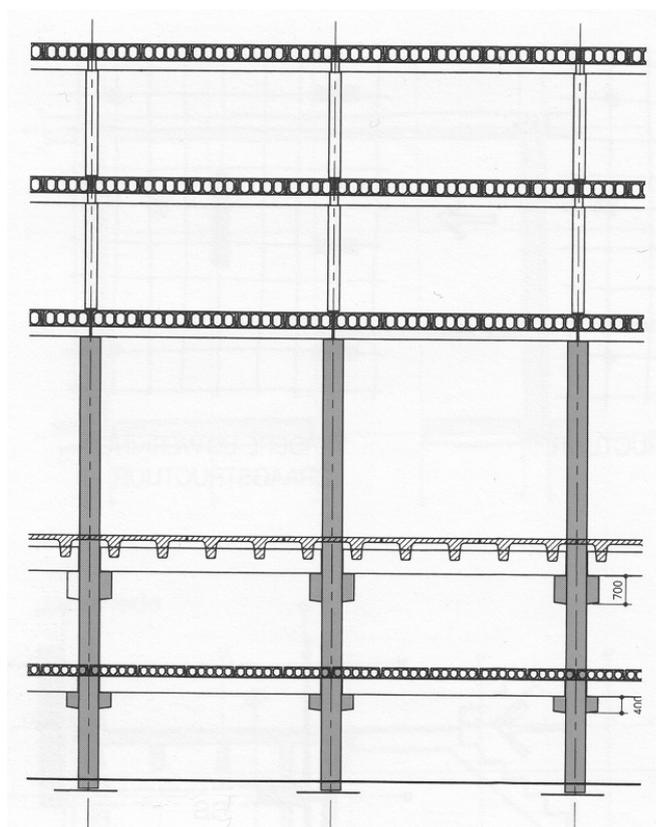


Figura 5.12 Exemplo de estrutura de esqueleto modular

A figura 5.12 mostra um exemplo de modulação adequada para estrutura de esqueleto pré-moldada. A edificação contém dois níveis de estacionamentos no subsolo, uma galeria de compras no térreo, e apartamentos para estudantes nos pavimentos superiores. Os eixos da grade modular são de 6.00 m x 9.60 m. As lajes alveolares de piso com 1.20 m de largura são utilizadas no estacionamento e nos

apartamentos, enquanto as lajes em duplo T com 2.40 m de largura são utilizadas na galeria. Os pilares são respectivamente duas a três vezes a altura dos pavimentos, com uma redução das seções transversais para os dois últimos pavimentos. A escolha de pilares segmentados entre os pavimentos nos níveis dos apartamentos é devida à necessidade da ausência de consolos para suporte das vigas suportes para os sistemas de piso.

5.4. Projeto para Ação de Pórtico na Estrutura Pré-Moldada

Existem vários sistemas em uso para estabilizar os pórticos pré-moldados e sistemas de esqueleto. Esses vários sistemas também podem ser combinados. A estabilidade lateral é conseguida por um dos sistemas:

- Pilares em balanço engastados na fundação;
- Contraventamento provido por paredes de cisalhamento ou por ação de treliça.

5.4.1. Ação dos Pilares em Balanço

O comportamento dos pilares atuando como vigas em balanço ocorre principalmente em edificações baixas, com até três a quatro pavimentos. A estabilidade de estruturas de esqueleto não contraventadas, com ligações articuladas (ligações com chumbadores) é conseguida por meio dos pilares projetados em balanço para altura total da estrutura. Neste caso, é comum ignorar o comportamento semi-rígido das ligações viga-pilar, ou a rigidez de elementos em forma de arcos para fachadas ou mesmo a contribuição de paredes internas de alvenaria ou de painéis. A linha de aplicação da ação horizontal pode ser assumida no centro de massa do sistema de piso.

Os efeitos das forças de vento atuantes no pano da fachada são absorvidos primeiramente pelos pilares da fachada. É importante distribuir os efeitos das ações horizontais sobre todos os pilares da estrutura, evitando assim diferentes seções transversais nos pilares. As forças horizontais paralelas às vigas são distribuídas diretamente através das vigas na mesma linha, enquanto que as forças na direção transversal às vigas são transferidas pela ação das lajes no plano da cobertura. Isso pode ser conseguido de duas maneiras, ou pela da ação (efeito) de diafragma da cobertura ou com a ajuda de diagonais de contraventamento.

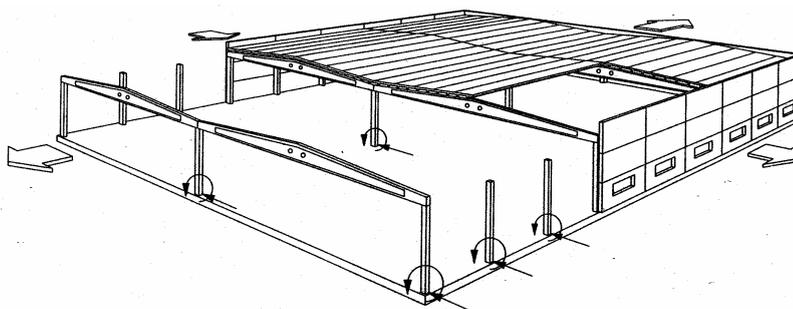


Figura 5.13 Estrutura apórticada estabilizada pela ação em balanço dos pilares

O efeito de diafragma nas coberturas é facilmente conseguido por meio de elementos de concreto ou concreto celular. As ligações entre os elementos da cobertura e as vigas são projetadas para resistir a todas as forças atuantes no plano da cobertura. Dessa maneira, a força horizontal total atuante na edificação é distribuída para todos os pilares de acordo com a rigidez dos mesmos.

Para estruturas leves de cobertura, onde a ação do diafragma não pode ser promovida pelo sistema de cobertura, a distribuição das forças horizontais atuantes nas paredes que compõe os oitões sobre os pilares internos e externos é assegurada por meio de diagonais de contraventamento entre as vigas dos intereixos externos, com ajuda de tirantes ou perfis (cantoneiras) metálicos. Para edificações com pilares altos e delgados, a rigidez horizontal da estrutura pode ser assegurada por diagonais de contraventamento entre os pilares de fachada em uma ou mais aberturas. A solução normal é, usar perfis de aço galvanizados ou tirantes (barras) de aço dentro das vigas de concreto.

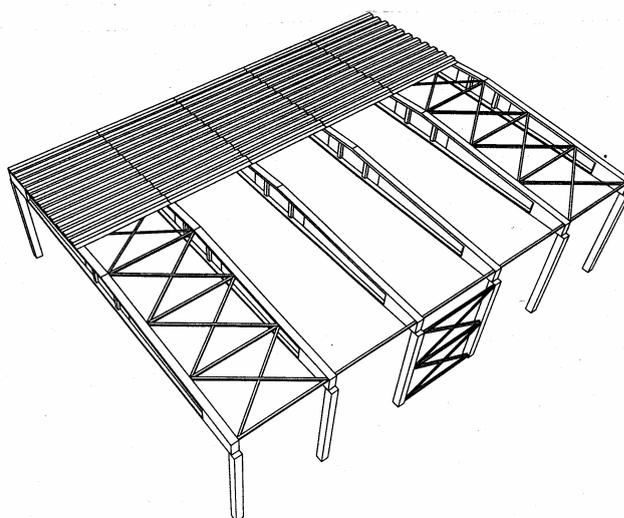


Figura 5.14 Diagonais de contraventamento para estrutura da cobertura e/ou fachada

5.4.2. Estruturas de Esqueleto Contraventadas

Para estruturas de esqueleto com múltiplos pavimentos, os sistemas contraventados constituem-se na solução mais eficaz, independentemente do número de pavimentos. A rigidez horizontal é fornecida pelas escadas, poços dos elevadores e pelas paredes de contraventamento. Dessa maneira, os detalhes das ligações, bem como o projeto e construção das fundações são bem simplificados. Paredes de contraventamento formadas por painéis de concreto pré-moldado apresentam-se como uma solução racional, com grande rigidez e resistência no plano da parede, são fáceis de serem içadas e podem ser integradas com o sistema de esqueleto em viga-pilar, atuando como paredes de preenchimento ou como paredes de contraventamento em balanço isoladas ou formando núcleos de contraventamento. Paredes de enchimento de alvenaria (ou preenchimento, as quais são executadas entre as linhas de viga e pilar) e sistemas de contraventamento metálicos podem também ser utilizados.

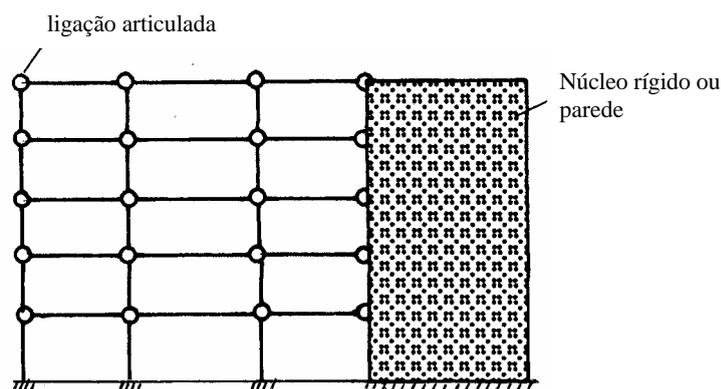


Figura 5.15 Princípios de contraventamento para estrutura de esqueleto com ligações viga-pilar articuladas

A ação de diafragma das lajes é utilizado para distribuir as ações horizontais entre os componentes de estabilização. As lajes de piso devem ser projetadas e detalhadas de acordo com um comportamento previamente intencionado. A aplicação das ações nos elementos de contraventamento é mais uma vez considerada no centro de massa (centróide) da planta do pavimento. A distribuição das forças horizontais entre os painéis e/ou núcleos depende de vários fatores:

- A rigidez dos componentes de estabilização;

- Reação de flexão no plano dos componentes de estabilização – predominantemente o efeito de flexão das paredes em balanço, o efeito de cisalhamento nos painéis, e a flexão no contraventamento de aço;
- Posição dos componentes de estabilização – Os componentes de estabilização devem ser posicionados de maneira que não aconteça nenhum tipo de torção (centro de gravidade dos componentes estabilizados = centro de gravidade das forças horizontais).
- Juntas de dilatação no diafragma da laje – Juntas de dilatação são geralmente posicionadas em aproximadamente 80 m de intervalo dos diafragmas da laje, se a estrutura é retangular no projeto, ou de aproximadamente 60 m de intervalo se o projeto não for retangular, depende das condições climáticas, tipos de estruturas e tipo de fundação.

5.4.3. Comparação dos Sistemas

O efeito de balanço dos pilares é fácil de ser conseguido. Porém, neste caso a altura máxima da estrutura, sem componentes de estabilização adicionais, é limitada a 10 metros por causa das restrições de tamanho dos pilares e das flechas admissíveis.

As estruturas estabilizadas apenas pelo efeito de pórtico (por ação de pórtico) não são muito empregadas na Europa, por causa das forças concentradas na ligação e pela dificuldade de montagem no canteiro. A utilização de pórticos pré-moldados com formato TT ou H podem evitar esse problema até certo nível, embora possam gerar problemas para o transporte e içamento. Por essa razão, recomenda-se não utilizar essas últimas soluções.

Os sistemas de contraventamento são a solução mais eficaz para estruturas de esqueleto para vários pavimentos, pois os poços da escada e do elevador já estão presentes por razões funcionais e, portanto, o custo adicional para estabilização das peças é desprezível. Por outro lado, a concentração de todas as forças horizontais para alguns elementos escolhidos permite pilares menores e ligações mais simples. Além disso, como os pilares são contraventados nos níveis dos pavimentos, tem-se um menor comprimento efetivo de flambagem, permitindo assim pilares mais esbeltos.

As estruturas de esqueleto devem ser analisadas em sua forma tridimensional. Normalmente, essas estruturas consistem de duas direções perpendiculares principais, onde o sistema estrutural pode ser diferente nas duas direções. O sistema pode também, variar na altura do prédio, como por exemplo: com painéis de contraventamento (cisalhamento) nos pavimentos mais baixos e com sistemas pilar-viga nos pavimentos mais altos.

5.5. Elementos Pré-Moldados

5.5.1. Geral

As estruturas de esqueleto e estruturas aporticadas pré-moldadas são geralmente compostas por elementos padronizados. Esses elementos podem ter tamanhos e formas diferentes, como por exemplo: vigas retangulares, vigas I para cobertura, lajes dublo-T para pisos, etc. As dimensões e desempenhos são fornecidos em catálogos de fabricantes. Para planejar um projeto, o projetista necessita escolher os elementos mais apropriadas para seu projeto. A seguir, são apresentadas informações gerais sobre os principais produtos existentes.

5.5.2. Pilares

Os pilares de concreto pré-moldado são fabricados em várias formas e dimensões. A superfície de concreto é lisa e as bordas são chanfradas. Geralmente, os pilares requerem uma seção transversal mínima de 300 mm, não apenas por motivos de manuseio, mas também para acomodar as ligações pilar-viga. A largura mínima de 300 mm fornece uma resistência ao fogo para cerca de duas horas, tornando possível a aplicação destes elementos em edificações com diferentes usos.

Um exemplo de dimensões nominais padronizadas para seções retangulares e circulares é fornecido na tabela 5.16, onde o tamanho recomendado está sombreado (as dimensões do corte transversal são em mm).

Tabelas 5.16 Exemplo de dimensões padronizadas para pilares

b/h	300	400	500	600	800
300					
400					
500					
600					
Circular					

Os pilares com altura máxima de 20 a 24 m podem ser fabricados e executados como uma peça, sem juntas ou ligações, embora também é normal a prática normal de se trabalhar com pilares segmentados nas alturas dos pavimentos.

Os pilares devem ser constantes ao longo de toda a altura do edifício ou podem recuar em um nível intermediário para satisfazer exigências arquitetônicas. Como em qualquer forma de construção, é importante manter o alinhamento vertical dos pilares e é preferível terminar os pilares nas posições onde os elementos de piso ou de cobertura possam vencer os vãos sobre os pilares. Podem ser produzidas mudanças razoáveis nas dimensões ou nas formas das seções transversais dos pilares, quer em um elemento pré-moldado isolado ou pela união de seções compostas.

Nos níveis dos pavimentos, os pilares possuem insertos estruturais ou consolos para prover suporte para as vigas. A posição dos insertos ou consolos pode variar para possibilitar ligações em níveis diferentes em cada face do pilar, mas é preferível e mais econômico manter essas variações ao mínimo possível.

5.5.3. Vigas

O tipo mais clássico de vigas pré-moldadas para traves planas aporticadas e para estruturas de esqueleto serão apresentados posteriormente. Para cada tipo, tem-se uma variedade de formas de seções transversais padronizadas disponíveis nos catálogos de produtos dos fabricantes.

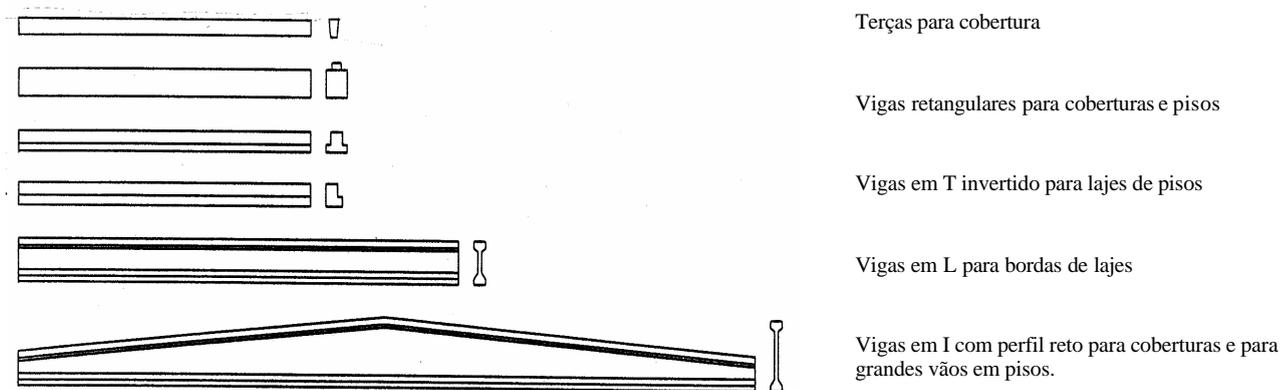


Figura 5.17 Tipos de vigas protendidas

5.5.3.1. Vigas da cobertura

Vigas com altura variável são normalmente utilizadas em edificações industriais onde se requer vãos maiores. A seção transversal em forma de I é geralmente empregada para vigas protendidas. A inclinação varia entre 5 e 12%. Os tamanhos normais são fornecidos na Tabela 5.8.

Tabela 5.18 Dimensões normais para vigas de cobertura com altura variável

Largura (mm)	Altura (mm)	Espessura da Alma (mm)	Vão (m)
250 – 300	800 – 1400	80 - 120	10 – 25
300 – 400	1200 – 2000	80 - 120	15 – 25
300 – 500	1300 – 2500	80 - 120	25 – 40

Outras seções transversais de vigas, as quais podem ser empregadas na construção de coberturas, são as vigas "I" retas, as vigas retangulares e as vigas tipo "shed". As vigas "I" retas são empregadas para coberturas e pisos. A escolha de alturas padronizadas é normalmente mais limitada do que para as vigas de cobertura declinadas. Recomenda-se o uso dessas vigas para grandes vãos e para pisos com cargas elevadas. Os vãos ficam entre 10 a 35 m.

Vigas com seções transversais retangulares são bastante comuns. A largura normal para vigas varia entre 300 e 600 mm e a altura varia entre 400 e 800 mm. Os vãos normais são entre 4 e 14 m. Geralmente, as vigas retangulares possuem dentes de apoio na extremidade para esconder os consolos retangulares dos pilares. Estas vigas normalmente não atuam em ação combinada com a laje (como estruturas mistas).

As vigas tipo "shed" são bastante empregadas na Itália, onde a escolha de formas e dimensões padronizadas está disponível no mercado para vãos entre 15 e 28 m.

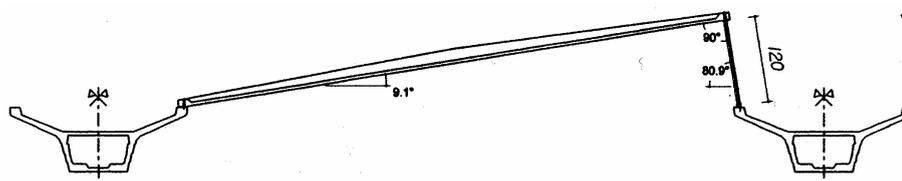


Figura 5.19 Exemplo de cobertura tipo "shed".

5.5.3.2. Terças (Vigas secundárias da cobertura)

Existem terças com um grande número de seções transversais que são bastante empregadas como vigas secundárias para coberturas. A seção transversal pode ser retangular ou em forma de "I". O comprimento dos vãos varia de 6 a 12m e a altura de 250 a 600 mm.

5.5.3.3. Vigas para Pisos (para apoio de pisos)

O tipo mais comum de viga para pisos em construções pré-moldadas é a viga com abas em forma de "L" ou em forma de "T" invertido. As vigas são em concreto protendido ou armado. A principal vantagem das vigas com abas invertidas para apoio das lajes é a redução da espessura total dos subsistemas de piso.

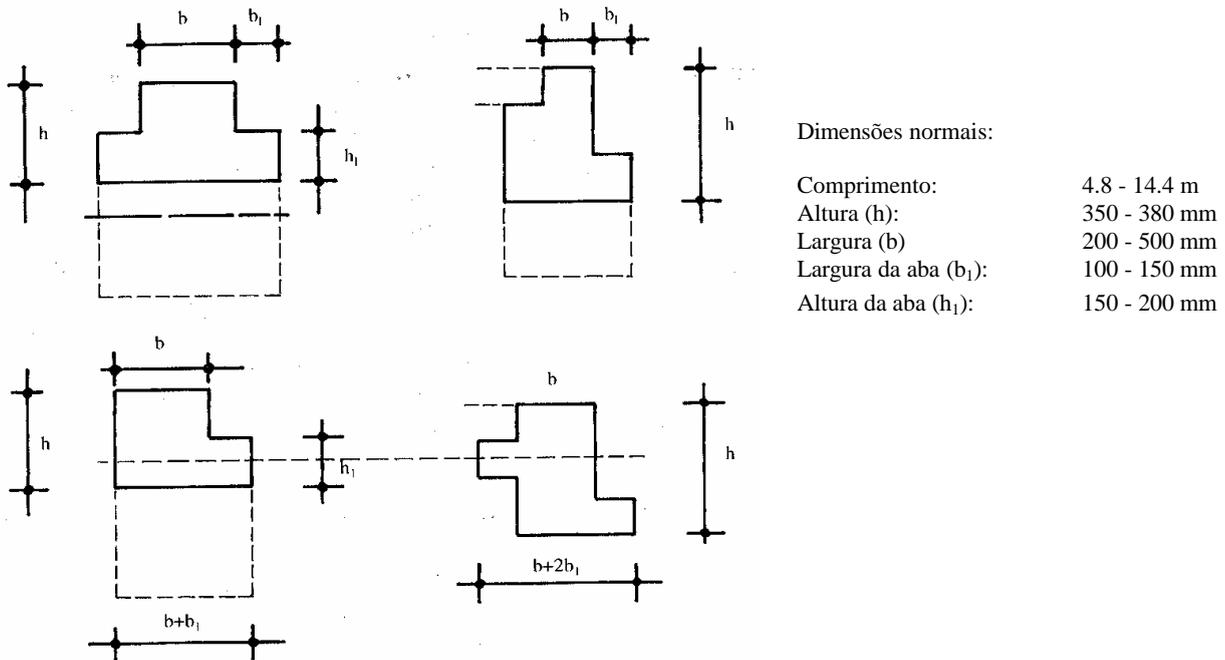


Figura 5.20 Seções típicas e dimensões em vigas com abas invertidas para pisos

Mudanças no nível do piso podem ser acomodadas por vigas em "L" (ou forma de "bota") ou pela construção de um lado de uma viga em "T" invertido. Onde as diferenças nos níveis dos pisos nos vãos adjacentes excede aproximadamente 750 mm, a solução é empregar duas vigas em "L" uma de costas para a outra (com os lados retos faceando) e separadas por uma pequena folga entre si. Isso é geralmente utilizado para compor pisos intermediários alternados para estacionamentos, mas também é necessário se ter uma atenção particular para os tirantes transversais atravessando a estrutura.

As vigas em "L" para apoios de pisos podem ter a mesma largura que a dos pilares (ver Figura 5.21.a) ou com largura menor do que a dos pilares (fig. 5.21 b). No primeiro caso, as lajes fazem as vigas e o pilar junto aos seus apoios, enquanto no segundo caso faz-se necessário fazer um recorte nos elementos de laje ao redor dos pilares para compensar o recesso causado pela largura menor da viga, havendo uma descontinuidade na face interna da viga que apoia a laje, sendo a primeira solução mais recomendada.

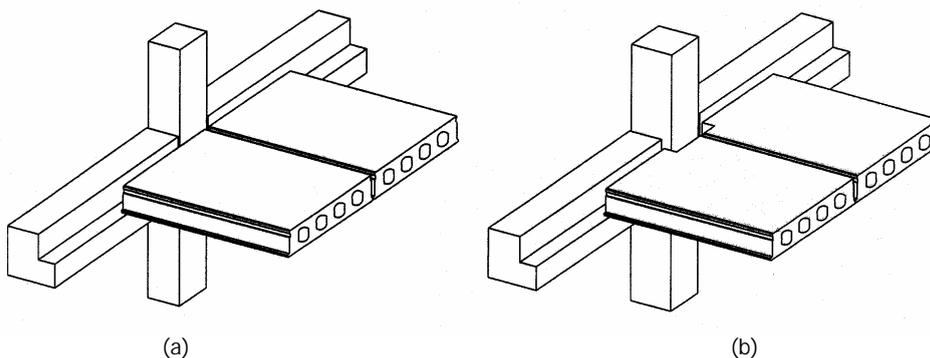


Figura 5.21 Soluções variantes para a largura das vigas para apoios pisos.

Vigas retangulares largas e com pequena altura são geralmente empregadas para compor sistemas de piso, especialmente para cargas elevadas e quando a espessura total para o piso for limitada for necessária (ver Capítulo 4). Essas vigas serão normalmente projetadas e detalhadas para atuarem de forma conjunta com as lajes do piso.

5.6. Exemplos de Ligações Típicas

Alguns exemplos de ligações típicas em estruturas de esqueleto para edificações são apresentados nesta sessão. A idéia não é mostrar um apanhado completo de todas as soluções existentes, mas auxiliar ao projetista a se familiarizar com as tipologias mais comuns de ligações. Informações mais gerais e teóricas são apresentadas no Capítulo 4. Os princípios aplicados na maioria das soluções são válidos tanto para edifícios baixos quanto para edifícios altos. Os exemplos de ligações fornecidos neste capítulo são aplicáveis principalmente nas estruturas reticuladas. Em relação à estrutura total, haverá outros exemplos relativos às lajes, paredes e fachadas, os quais serão apresentados em outras partes deste livro.

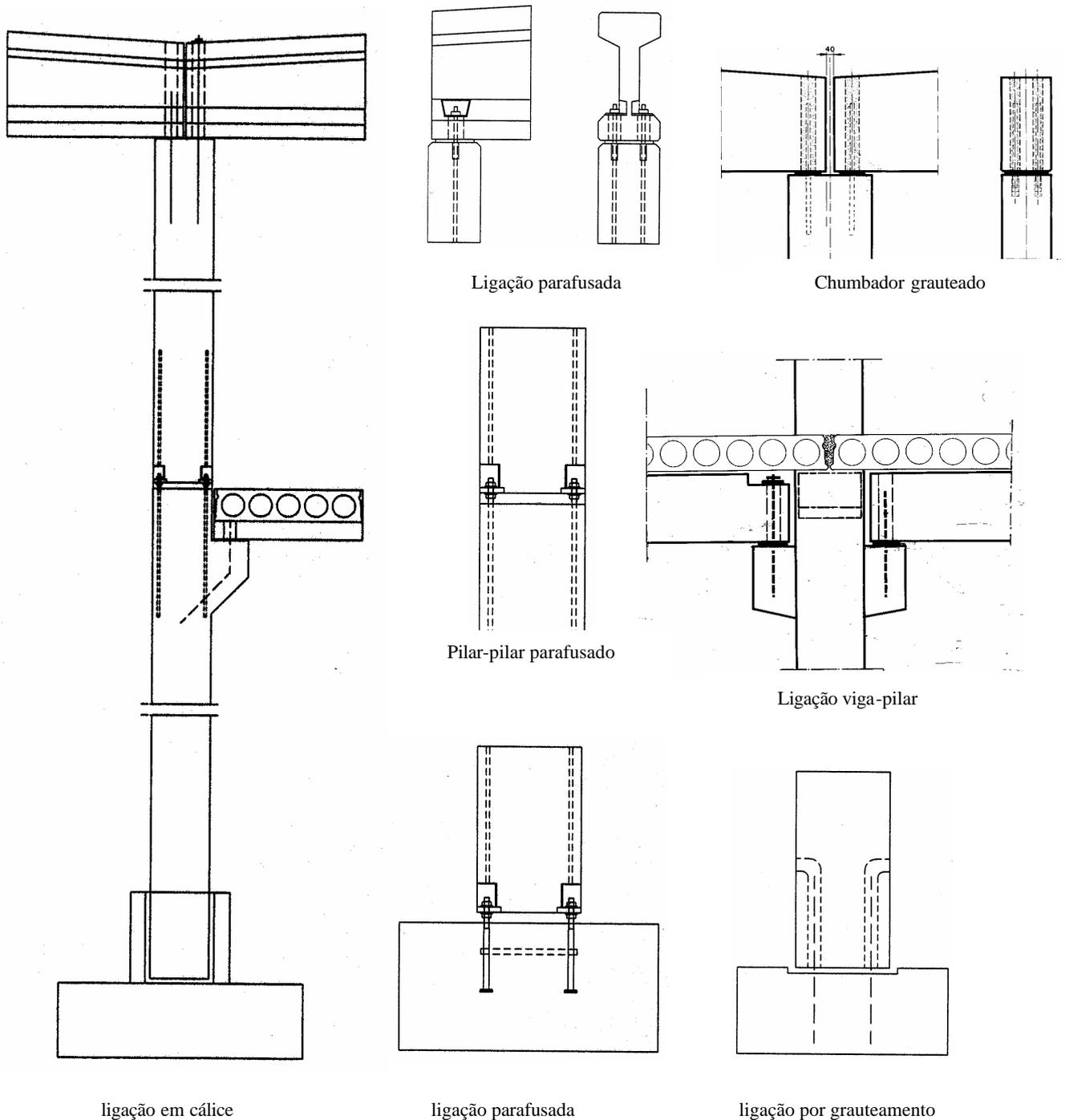


Figura 5.22 exemplos de típicas ligações em pórtico e estruturas de esqueleto

Os cálices de fundação são empregados em terrenos com boas condições. Os cálices devem ser largos o suficiente para possibilitar um bom preenchimento de concreto abaixo e ao redor da pilar. Quando as superfícies internas do cálice são lisas, a força vertical é assumida como sendo transmitida através diretamente abaixo da base do pilar. Quando o cálice possui superfícies dentadas, a força vertical pode ser suscetivelmente transferida por cisalhamento na interface. As fundações com cálices podem ser moldadas in loco, parcialmente ou completamente pré-moldadas.

Arranques da armadura são geralmente deixados em lajes de fundações (tipo "radier") ou em fundações com estacas. As ligações resistentes à flexão são realizadas com barras de armaduras, deixadas como arranques na fundação ou no pilar. Essas armaduras são inseridas em dutos (ou bainhas) as quais são preenchidas posteriormente com graute. O diâmetro interno dos dutos (bainhas) deve permitir uma acomodação adequada do graute ao redor da barra.

As ligações parafusadas são empregadas com lajes de fundações moldadas no local (tipo "radier") ou com fundações com estacas. As barras da armadura longitudinal dos pilares são sobrepostas com barras de aço soldadas nas cantoneiras metálicas posicionadas junto à base do pilar. A ligação resistente à flexão dentro da fundação é realizada com ganchos de ancoragem. Os buracos na chapa de base devem sempre ser aumentados para reduzir os problemas causados pelas variações dimensionais.

Ligações pilar-pilar são, a princípio, similares às ligações entre pilares e fundação com laje.

Os tipos clássicos de ligações viga-pilar são as ligações parafusadas ou por chumbadores. Nos dois caso, são deixados nichos verticais de 50 x 80 mm na região da extremidade da viga. Os parafusos ou chumbadores são projetados do topo do pilar ou do consolo. Após a montagem, os nichos são preenchidos com graute. Quando se intenciona permitir movimentos horizontais na ligação, este nicho não é preenchido com graute, mas com material betuminoso ou material plástico, parafusando o chumbador no topo da viga para fornecer estabilidade à ligação. Nos apoios da viga são utilizados aparelhos de apoio, como almofadas de neoprene ou uma camada de argamassa que permita distribuir as tensões de contato na região do apoio.

Para as bordas dos vãos, as vigas de fechamento na cobertura podem ser apoiadas cobrindo todo topo do pilar ou apenas a metade do topo. O último caso pode ser selecionado de modo a permitir uma futura ampliação da construção utilizando-se o mesmo pilar.

Existe uma tendência para embutir insertos metálicos nas ligações viga-pilar. A vantagem com esta solução é que a interseção entre pilar e viga é limpa, sem a saliência de um consolo. Por esta razão, essa ligação é atraente no ponto de vista estético, existindo várias soluções no mercado. Exemplos de possíveis alternativas são apresentados na figura 5.23.

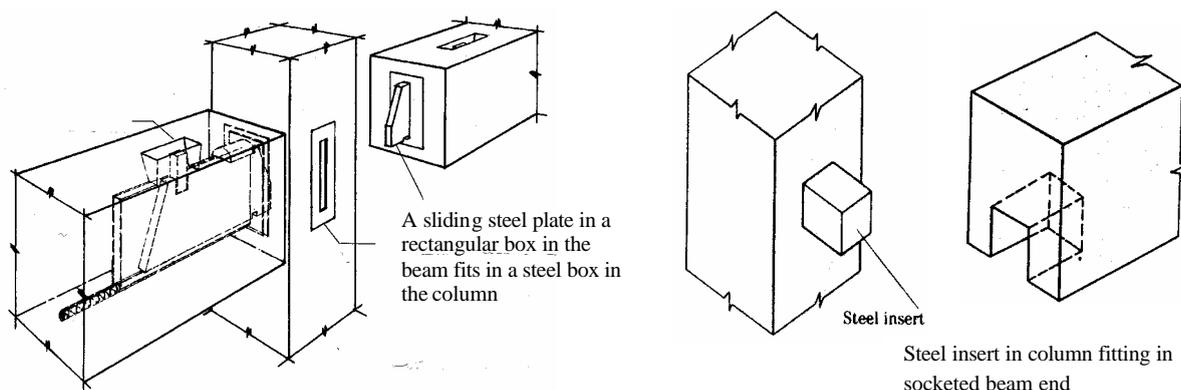


Figura 5.23 - Exemplos de consolos metálicos embutidos (escondidos)

Juntas de expansão são executadas, ou duplicando os pilares e as vigas ou utilizando almofadas de apoio deformáveis e preenchendo as juntas com argamassa semi-plástica ou betume, para absorver ações de curta duração como vento, mas para acomodar deformações causadas pela temperatura, retração e fluência. As vigas para pisos são geralmente conectadas aos pilares, ou consolos, por meios de parafusos ou chumbadores grauteados. Em alguns casos, especialmente para bordas das vigas, os momentos de torção devem ser resistidos. Isso pode ser feito por meio de barras parafusadas ou por soldagem (ver também Capítulo 4).

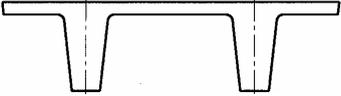
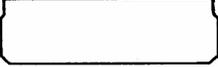
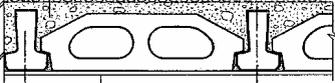
Capítulo 6 – Elementos Pré-Moldados para Pisos e Coberturas

6.1 Geral

Os sistemas de pisos em concreto pré-moldado oferecem muitas vantagens como a ausência de escoramentos, a rapidez na construção, as faces inferiores bem acabadas, o alto desempenho mecânico, os grandes vãos, durabilidade, etc. Há uma grande variedade de sistemas pré-moldados para pisos no mercado, sendo os cinco tipos principais:

- Pisos com lajes alveolares em concreto protendido ou concreto armado
- Pisos com painéis nervurados protendidos
- Pisos formados por lajes maciças
- Sistemas compostos por meio de placas (painéis) pré-moldadas
- Sistemas compostos por lajes com vigotas

Tabela 6.1 indicações de dimensões e pesos próprios dos principais tipos de pisos pré-moldados.

Tipo de piso	Vão máximo (m)	Espessura do piso (mm)	Largura normal do elemento (mm)	Peso próprio do elemento (kN/m ²)
	9	100 - 300	300 - 1200	2.0 - 4.0
	20	120 - 550	200	2.0 - 4.8
	24 (30)	200 - 800	2400	2.0 - 5.0
	9	150 - 300	600	1.5 - 3.5
	6	100 - 250	300 - 600	0.7 - 3.0
	7	100 - 200	600 - 2400	2.4 - 4.8
	7	200 - 300	200 - 600	1.8 - 2.4

Os principais requisitos estruturais para pisos são a capacidade portante, a rigidez, a distribuição de força transversal de cargas concentradas e distribuição das ações horizontais por meio da ação do diafragma horizontal. Além disso, dependendo do seu uso, os pisos também podem ter que atender outros requisitos como isolamento acústico e térmico, resistência ao fogo, etc.

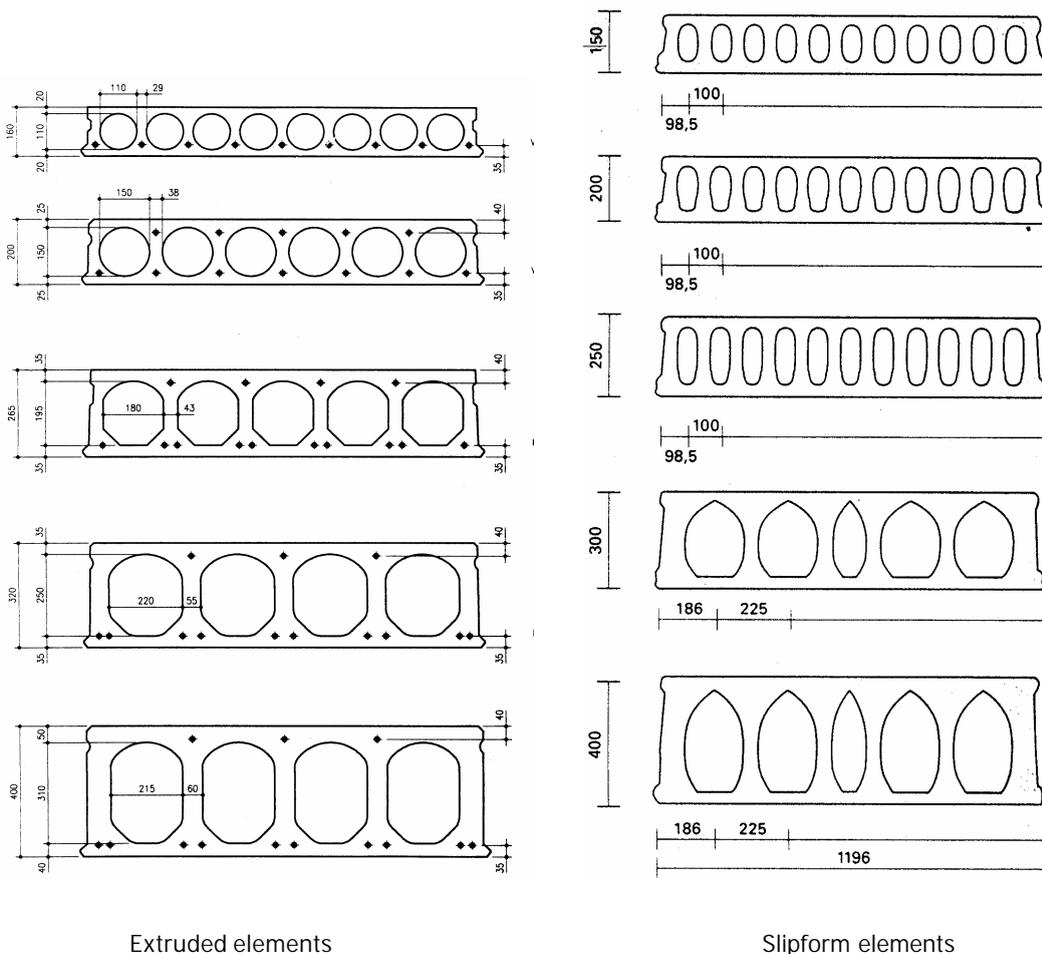
6.2. Principais Tipos de Pisos

6.2.1 Introdução

Os pisos pré-moldados podem ser classificados de acordo com a sua produção, como sendo completamente ou parcialmente pré-moldados. Os pisos completamente pré-moldados são compostos por elementos que são totalmente moldados na fábrica. Após o içamento e posicionamento, os elementos são conectados na estrutura e nas juntas horizontais são grauteadas. Em alguns casos é adicionada uma camada de cobertura em concreto estrutural moldado no local. Os pisos parcialmente pré-moldados são compostos de uma parte pré-moldada e por outra moldada no local. As duas partes trabalham juntas no estágio final, fornecendo uma capacidade estrutural composta.

6.2.2 Pisos completamente pré-moldados

a) Pisos de lajes alveolares



Extruded elements

Slipform elements

Figura 6.2 seções transversais típicas dos elementos de laje alveolar protendida.

Os elementos de lajes alveolares protendidas possuem alvéolos (vazios) longitudinais com a intenção principal de reduzir o peso próprio. As lajes alveolares são principalmente utilizadas em construções com grandes vãos, como escritórios, hospitais, escolas, shopping centres, prédios industriais, etc. Outro uso freqüente é para construção de apartamentos e residências, por condições favoráveis no custo e na rapidez da execução.

As lajes alveolares são encontradas tanto em concreto protendido quanto em concreto armado, onde os elementos estão disponíveis em diferentes espessuras para satisfazer as diferentes necessidades de vão e de carga. As principais seções transversais estão apresentadas na Figura 6.2. A porcentagem de vazios (volumes de vazios para o total de volume de uma laje sólida de igual espessura) para lajes alveolares está entre 30 e 50%.

Os elementos de laje alveolar possuem normalmente largura de 1200 mm, com comprimentos de até 20 m. A largura real do elemento é, geralmente, de 3 a 6 mm menor que a dimensão nominal para permitir as tolerâncias construtivas e para prevenir excessos no "layout" do pavimento devido o acréscimo cumulativo das larguras dos elementos. As bordas dos elementos são recortadas para assegurar a transferência do cisalhamento vertical através das juntas grauteadas entre os elementos adjacentes.

As lajes alveolares protendidas são produzidas por meio de processos de extrusão ou por deslizamento de formas (formas deslizantes). As pistas de protensão são construídas em concreto ou em aço, com largura normal de 1200 mm e com comprimento de 80 a 150 m. O grau de protensão, tipos de cordoalhas e espessura dos elementos são os principais parâmetros de projeto. Em alguns países, emprega-se um processo alternativo conhecido como "*moldagem molhada*", onde os alvéolos vazios são caracterizados por grandes aberturas quadradas. Após o endurecimento, os elementos são cortados nas dimensões especificadas por meio de uma serra circular especial. A extremidade retangular é padronizada, mas pode-se ter extremidades das lajes inclinadas ou recortadas junto aos apoios, necessárias no plano não retangular do piso.

Elementos de laje alveolar em concreto armado são geralmente de 300 a 600 mm de largura. Em alguns países são muito usados para construções habitacionais.

b) Pisos nervurados

Seções transversais típicas são apresentadas na figura 6.3. Normalmente, os painéis nervurados são protendidos, onde as vantagens principais são:

- capacidade portante em combinação com vãos grandes;
- as extremidades dos elementos podem ser chanfradas a um terço da espessura total para formar uma junta divisora para reduzir a espessura total.
- os elementos em duplo-T são produzidos como padrão até de 2400 mm de largura (na verdade 2390 mm) ou 3000 mm de largura, reduzindo assim o número de elementos a serem fixados no local. Geralmente, os elementos em forma de U-invertido são de 600 mm de espessura.

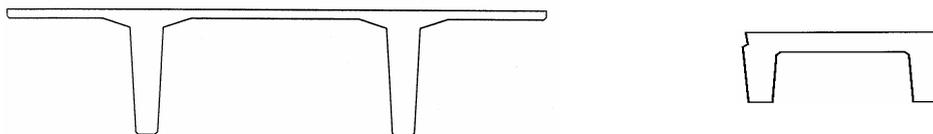


Figura 6.3 elementos nervurados do piso

A espessura total dos elementos em "duplo-T" pode variar entre 150 a 800 mm, permitindo vãos de até 22 m de comprimento. Esses elementos têm ótima estabilidade e oferecem uma grande capacidade portante para grandes vãos. Onde são utilizados elementos com mesas delgadas (40/50 mm), normalmente é requerida uma camada de concreto armado estrutural para assegurar a transferência de cisalhamento vertical entre os elementos adjacentes e a ação do diafragma horizontal no piso.

c) Elementos de cobertura

Os elementos de concreto de cobertura são principalmente utilizados para construções comerciais e industriais, para complexos esportivos, etc. Há diferentes tipos de elementos tais como elementos nervurados, chapas de dobradiças, elementos de asa simples ou duplos, etc. As características principais dos elementos são:

- são leves devido às seções transversais esbeltas
- grandes vãos
- superfície inferior lisa (face inferior bem acabada)

As seções transversais típicas dos elementos de concreto para piso são apresentadas na figura 6.4, os quais são geralmente protendidos.

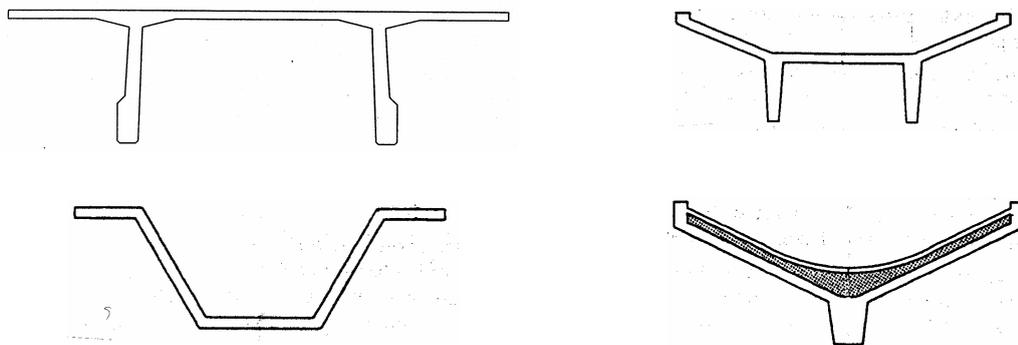


Figura 6.4 elementos de lajes maciças de concreto

Os elementos de lajes maciças são geralmente executados com concreto leve ou celular para reduzir o peso e melhorar as propriedades térmicas. Este tipo de laje é utilizado principalmente na construção de residências e para coberturas em construções industriais e comerciais. As lajes maciças também são produzidas em concreto normal. A razão principal para usar estes tipos de lajes é ou devido ao isolamento acústico ou por razões higrótérmicas. São utilizadas lajes maciças protendidas e armadas.

6.2.3 Pisos Parcialmente Pré-moldados

Sistema misto com placas pré-moldadas

Este sistema é um típico piso parcialmente pré-fabricado que consiste de painéis simples ou nervurados, os quais são utilizados como formas permanentes para o concreto de preenchimento para formar um piso composto robusto e sólido. Os elementos pré-fabricados de placa possuem entre 0.6 e 2.4 m de largura e entre 40 e 120 mm de espessura. Os comprimentos são ajustados para os vãos do piso. Os painéis para o "pré-piso" são feitos tanto em concreto armado quanto em concreto protendido. A face inferior dos elementos possui acabamento liso.

Para assegurar a boa interação entre os painéis pré-fabricados e o concreto moldado no local, os painéis são produzidos com armaduras treliçadas. Essa armadura fornece uma melhor resistência e rigidez aos elementos durante o transporte e a instalação. Os pisos compostos por painéis treliçados necessitam de

escoramento temporário durante a construção, com espaçamentos de 1.5 a 3.5 m , dependendo da barra superior na treliça.

As principais vantagens desse sistema, comparadas com os pisos moldados no local, são que, fora o escoramento, não necessita de formas no local e a armadura positiva já está incorporada nos painéis pré-moldados para o "pré-piso". O banzo (barra) superior da armadura da treliça, na região de preenchimento com concreto, atua como armadura resistente aos momentos fletores negativos. Desta forma, a laje do piso pode ser projetada como uma laje contínua.

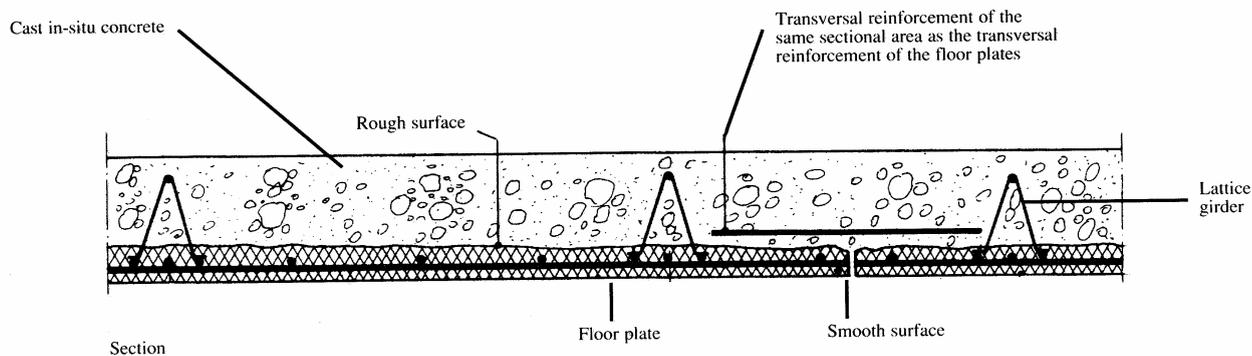


Figura 6.5 - Exemplo de sistema misto para piso com painéis pré-moldados com armadura treliçada

Sistemas compostos por lajes com vigotas

Esse tipo de piso composto é feito com os seguintes componentes:

- vigotas pré-moldadas (componentes portantes principais) posicionadas paralelamente entre si, espaçadas entre 0.4 e 0.8 m. As vigotas pré-moldadas podem ser em concreto armado ou protendido. Um tipo especial de vigota armada é a chamada vigota treliçada, formada por um painel estreito de concreto com uma armadura treliçada (figura 6.13.b).
- Os blocos pré-fabricados de preenchimento, colocados entre as vigotas, podem ser cerâmicos (Fig. 6.6a e 6.6d), de concreto normal ou leve (Fig. 6.6b), de poliestireno expandido (Fig. 6.6c), etc.
- O concreto de enchimento algumas vezes é combinado com uma camada de cobertura integral de concreto, e se necessário pode ser armado.

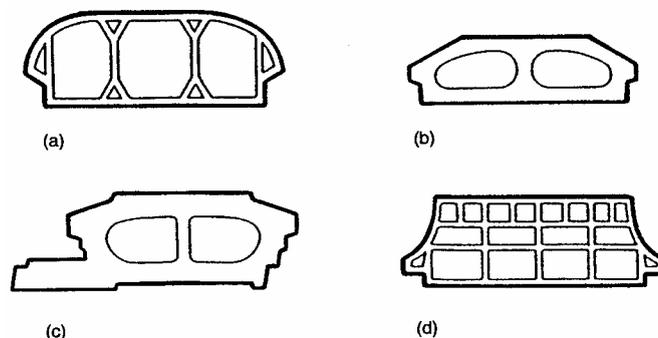
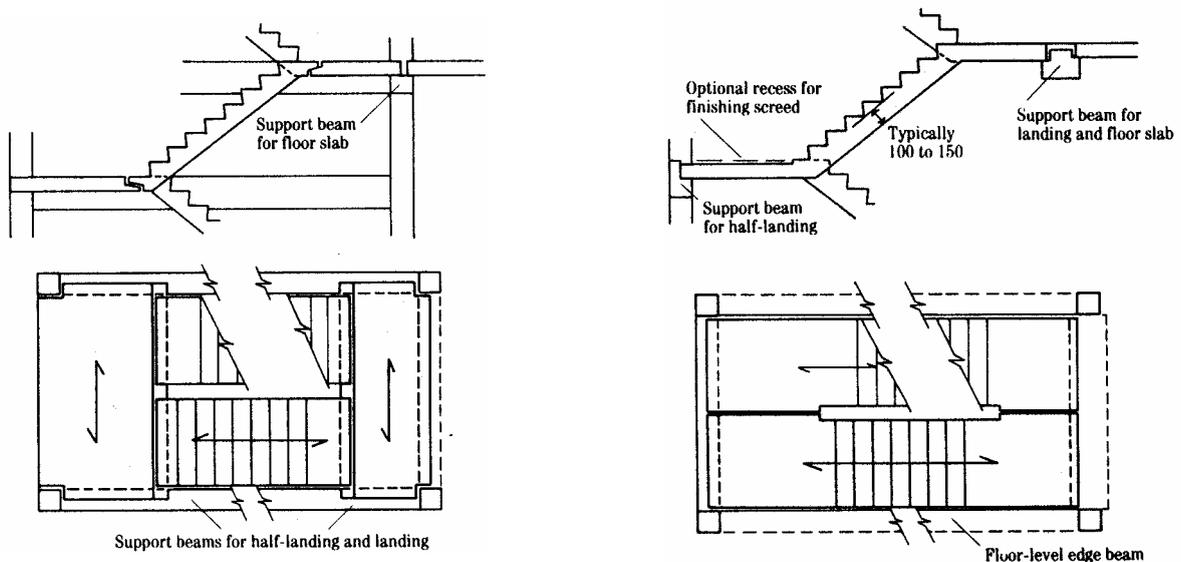


Figura 6.6 seções transversais típicas para pisos com vigotas e blocos de preenchimento

6.3 Escadas

As escadas pré-fabricadas de concreto são produtos muito interessantes por causa da qualidade de acabamento e do custo razoável. Tradicionalmente, escadas pré-moldadas no local consomem muita mão-de-obra, sendo sempre necessário um material adicional para o acabamento final e o custo total é geralmente subestimado. Os elementos pré-moldados de concreto para escadas são produtos industrializados, com alto grau de acabamento, variando desde as superfícies lisas regulares até o concreto polido. As escadas mais comuns são descritas nessa sessão.

A primeira categoria compreende as escadas retas, as quais são feitas ou de lances individuais de escadas pré-moldadas e patamares ou de elementos pré-moldados combinando lances e patamares. Nessa última solução pode haver níveis diferenciais nos pavimentos e meios patamares, necessitando de um friso de acabamento ou de outra solução.



(a) patamares combinados, lances de escadas e meios patamares

(b) patamares isolados, lances de escadas e meios patamares

Figura 6.7 "Layouts" alternativos para dois lances de escadas

A Segunda categoria compreende escadas "monobloco", as quais podem ser utilizadas ou em caixas de escadas ou individualmente entre diferentes andares.

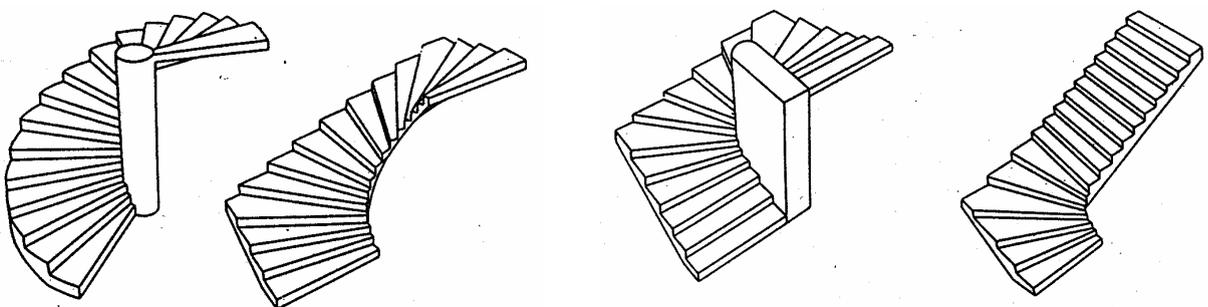


Figura 6.8 - tipos de elementos monoblocos de escada em espiral e alto-portantes

6.4 Modulação

Os pisos de concreto pré-moldado são extremamente versáteis e podem ser adaptados para quase qualquer combinação de paredes ou vigas de apoio. Todavia, existem certas diretrizes para as proporções na planta da construção, as quais podem ser empregadas para simplificar a construção. Os elementos de piso totalmente pré-moldados são geralmente modulados com base no módulo de 300 mm. As dimensões mais comuns são de 600, 1200 e 2400 mm. Os elementos para os sistemas de pisos compostos (mistos) são algumas vezes feitos para dimensões específicas. Quando se planeja uma construção para projeto com elementos pré-moldados de piso, é aconselhável modular as dimensões para se ajustar às larguras dos elementos disponíveis no mercado.

As lajes com vigotas são menos sensíveis à modulação. A cobertura necessária pode ser alcançada variando o espaçamento da viga, ou utilizando as vigas em pares ou utilizando blocos especiais de preenchimento. Onde as vigas são posicionadas nos centros reduzidos, pode não ser possível utilizar blocos completos a menos que estejam disponíveis tamanhos especiais. Através de uma modulação cuidadosa, essas situações podem ser minimizadas, restringindo-se às bordas nos pavimentos ou sendo evitadas completamente.

Em uma estrutura simples, preferencialmente, todos os elementos devem ser armados na mesma direção, simplificando o *layout* e, no caso dos elementos protendidos, limitando o congestionamento entre a armadura e as bainhas. Quando não é possível aplicar uma modulação exata, pode ser necessário produzir um elemento especial moldado para a menor largura ou cortada para a largura desejada com base no módulo padrão.

Tiras estreitas (ou faixas estreitas) de concreto moldado no local também podem ser utilizadas, armadas na direção perpendicular dos elementos pré-moldados de piso. Em muitos casos, essas faixas moldadas no local podem ser útilmente incorporadas nas ligações e no sistema de amarração por tirantes.

Junto aos apoios, os elementos pré-moldados de piso podem conflitar com as interseções entre vigas e pilares. Considerando esta questão, é possível detalhar as vigas para serem mais largas que os pilares, permitindo que os elementos de piso tenham extremidades planas (Fig. 6.9a). Nesse caso, a modulação do piso se torna independente do espaçamento entre os pilares e é bem mais simplificada. Quando as vigas não são mais largas que os pilares, será necessário fazer recortes nas extremidades dos elementos de piso (Fig. 6.8b). Geralmente, é possível remover até 1/3 da largura do elemento de piso sem causar sobrecarga ou instabilidade no apoio restante. É essencial que as juntas longitudinais do piso coincidam com a posição dos pilares para facilitar o recorte dos elementos e isso deve ser considerado na distribuição do *layout* da construção. Pode ser necessário um número de variações para adequar o *layout* de construções particulares, mas as economias na construção de pisos são maximizadas quando são utilizadas extremidades retas, sem recortes.

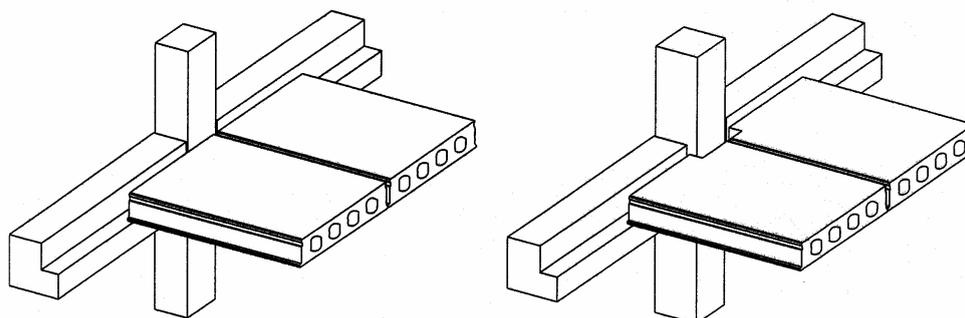


Figura 6.9 - Interseção entre viga e pilar no nível dos pavimentos

Os componentes pré-moldados protendidos podem não ser efetivos para elementos de piso curtos. Portanto, os elementos pré-moldados utilizados em vãos curtos (menor que 2 m) podem necessitar de armadura passiva adicional. No vértice de um elemento de piso com área triangular pode ser difícil produzir extremidades cortadas exatamente, as quais mantêm a cobertura correta do piso e essas áreas são melhores detalhadas quando se utiliza concreto moldado no local, quando o vão for menor que 2 m.

As mudanças no nível do pavimento ao longo do edifício podem ser acompanhadas por vigas em forma de "L" ou pela composição de um dos lados de uma viga em "T" invertido. Onde a diferença entre os níveis dos pavimentos excede a espessura da viga do piso, a melhor solução é utilizar duas vigas em "L", uma sobre a outra. Isso é geralmente empregado na divisão entre pavimentos em estacionamentos.

A modulação da laje é uma proposta útil para o projeto de sistemas pré-moldados, mas não é um requisito necessário. Outros fatores podem determinar o espaçamento dos apoios sem comprometer o uso da solução para o piso pré-moldado. Terrenos com formatos inadequados são típicos nos centros da cidade, mas apesar da necessidade de mudanças constantes no comprimento dos vãos e na direção dos apoios, os elementos de pisos pré-moldados podem ainda assim ser uma opção viável.

A modulação pode ser também fortemente controlada pelos elementos estruturais externos ou pelos painéis de fechamento que se mantém expostos após a construção e impõem a aceitação estética da estrutura acabada.

6.5 Projeto dos pisos pré-moldados

6.5.1 Geral

O projeto e o cálculo de elementos pré-moldados para pisos e coberturas são conduzidos em duas etapas: para os elementos de lajes individuais; para a interação do sistema estrutural de piso na estabilidade global da edificação.

Os elementos individuais de lajes são dimensionados considerando a capacidade de flexão e a resistência ao cisalhamento, combinando ou não com a torção quando esta for relevante. Também se deve checar a resistência à punção para carregamentos concentrados importantes. Finalmente, as flechas são calculadas e limitadas pelos valores recomendados. Outros critérios de projeto incluem: resistência ao fogo, propriedades acústicas e térmicas, durabilidade, manuseio e métodos de construção.

6.5.2 Projeto dos elementos de lajes individuais

Essa sessão apresenta as regras específicas de projeto específico para componentes de piso, desde que esses não são cobertos pelos procedimentos clássicos para elementos de concreto armado e protendido. Maiores informações detalhadas sobre dados de desempenho estão disponíveis nos manuais de produção e na literatura técnica dos fabricantes.

Os elementos de piso e de cobertura são, na maioria das vezes, em concreto protendido. Os elementos são projetados de acordo com as normas nacionais e internacionais, bem como outras literaturas específicas, por exemplo, as publicações da *FIB* (Commission on Prefabrication) e do *PCI* (Precast Concrete Institute). As lajes de coberturas e de pisos não compostas são normalmente calculadas para vãos simples apesar de que, algumas vezes, a continuidade parcial pode ser utilizada.

Para cada tipo de elemento, os fabricantes possuem curvas de desempenho padronizadas, previamente calculadas, as quais fornecem a sobrecarga permitida em função do comprimento do vão e da armadura. As curvas são calculadas de acordo com os requisitos de flexão e cisalhamento, e as vezes com base nas flechas. Também é fornecida a informação referente às contra-flechas dos elementos devido a protensão e ao peso próprio.

Pisos de lajes alveolares protendidas

Em geral, os elementos de laje alveolares protendidos não possuem armadura além da armadura ativa longitudinal com ancoragem por aderência. Portanto, a capacidade ao cisalhamento tem que ser assegurada quase que completamente pela resistência de tração do concreto.

Como em qualquer elemento de concreto protendido, a capacidade de cálculo ao cisalhamento é determinada por duas condições: a seção não fissurada perto do apoio (cisalhamento de tração), e a seção fissurada na flexão (cisalhamento de flexão). Esta última condição ocorre quando a força de

cisalhamento excede a capacidade de compressão de cisalhamento e uma simples fissura de flexão inicia uma falha por cisalhamento.

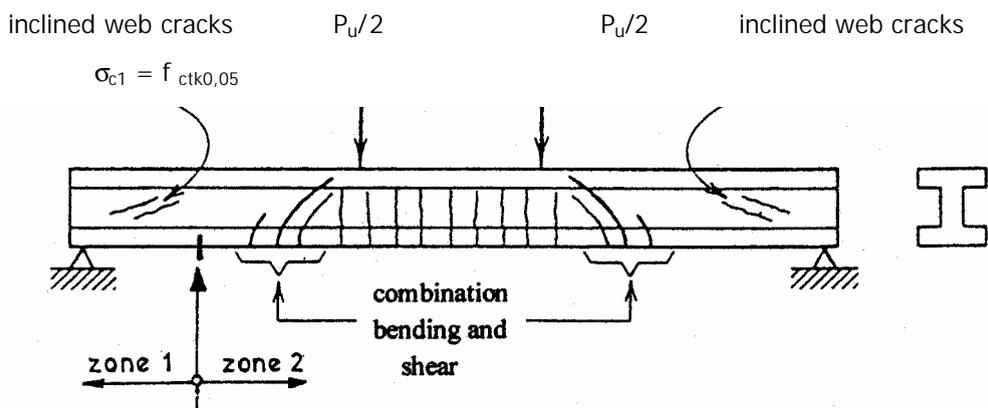


Figura 6.10 - Zonas fissuradas e configuração no elemento de concreto armado ou protendido.

A capacidade de cisalhamento na região em que haja carga máxima e flexão não fissurada pode ser calculada da seguinte maneira:

$$V_{Rd,c} = \frac{I b_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + a s_{cp} f_{ctd}}$$

Onde

I = é o momento de inércia

b_w = é a largura total da alma

S = o primeiro momento da área acima e abaixo o eixo central

$a s_{cp}$ = é a transferência efetiva de protensão na interseção da fissura inclinada e da armadura ativa, considerando a transferência da protensão.

A capacidade de cisalhamento do elemento na região fissurada no estado limite último de flexão pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$V_{Rd,c} = [0,12 k (100 r_\ell f_{ck})^{1/3} + 0,15 s_{cp}] b_w d$$

Onde:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} : k \text{ é um fator que considera o efeito da escala}$$

d : altura efetiva da seção transversal em mm. Na maioria das vezes $d = 0,9h$.

$$r_\ell = A_s / b_w d \leq 0,02.$$

A_{s1} = é a seção transversal da armadura tracionada (armadura passiva e/ou ativa), a qual continua pelo menos a uma distância igual a $d + b_{net}$ com relação à seção transversal considerada onde ocorre V_{sd} . Parece lógico também levar em consideração a armadura ativa.

b_w : menor alma da seção transversal (mm)

s_{cp} : N_{sd} / A_c (onde A_c é a seção de concreto)

N_{sd} : a força longitudinal na seção transversal considerada devida ao carregamento ou à protensão (compressão = positiva)

Quando as lajes são apoiadas em vigas com rigidez moderada, a deformação da viga introduzirá tensões na direção transversal das lajes alveolares. Essas tensões afetam a capacidade ao cisalhamento dos elementos e devem ser consideradas no projeto. Procedimentos detalhados para projeto são encontrados no Boletim-FIB-6 "Considerações Especiais do Projeto para Pisos Pré-Moldados com Lajes Alveolares Protendidas".

Pode surgir torção nos cantos do piso onde o elemento é apoiado ao longo da sua borda longitudinal ou em pisos com grandes aberturas. A resistência à torção pode ser calculada de acordo com os princípios e expressões clássicas. A área de seção resistente inclui as mesas superiores e inferiores e as almas mais externas dos elementos. As tensões de tração devidas ao cisalhamento perto do apoio se acumulam às tensões de tração que resultam da torção. Para pisos de laje alveolar com carregamento moderado, como por exemplo em construções residenciais e administrativas, o cisalhamento e/ou a torção geralmente não são fatores determinantes de projeto.

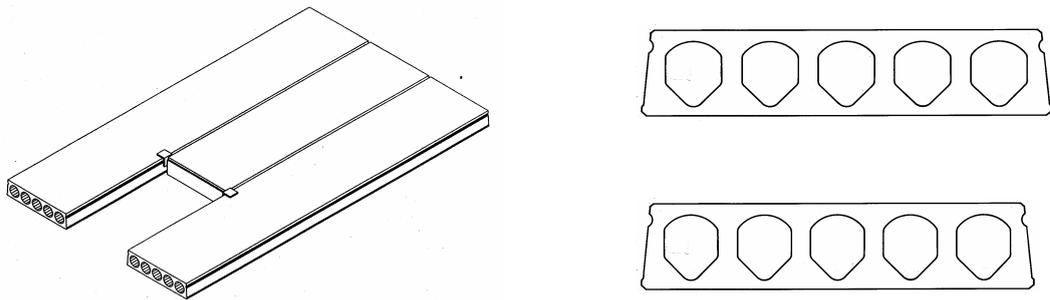


Figura 6.11 torção devido aos pontos de carga em grandes aberturas

A resistência à punção dos pisos de lajes alveolares pode ser checada utilizando expressões simples. O perímetro de controle básico pode ser considerado para uma distância igual a duas vezes a espessura da laje a partir da borda da área carregada. A seção de controle é aquela que segue o perímetro de controle e se estende acima da espessura efetiva d . Somente as seções das almas são consideradas. A tabela a seguir fornece uma visão geral dos resultados experimentais obtidos para cargas de punção espalhadas sobre uma área de $100 \times 100 \text{ mm}^2$.

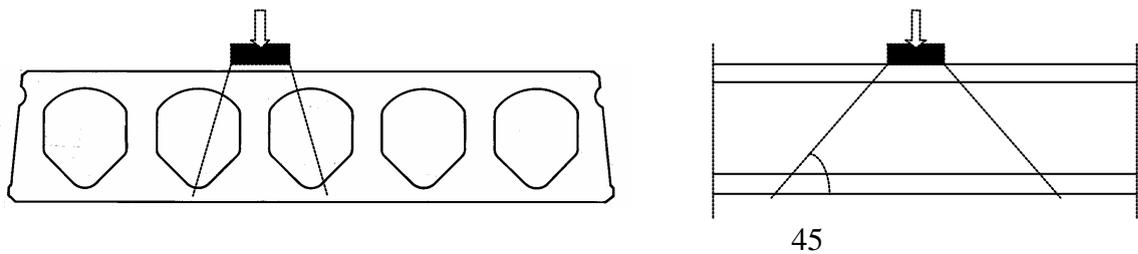


Figura 6.12 – Punção em lajes alveolares

Tabela 6.12 resultados dos ensaios de punção em pisos de lajes alveolares

Slab type	ø 50 mm	ø 100 mm	ø 200 mm
150 / 200	20 kN	30 kN	
270	40 kN	60 kN	
320 / 400		45 kN	65 kN
500		60 kN	80 kN

Cisalhamento e torção não são um problema comum em lajes alveolares protendidas sob carregamento uniformemente distribuído. Todavia, o cisalhamento pode ser crítico quando para elementos simplesmente apoiados com menos de 3 m de comprimento. Grandes carregamentos concentrados ou carregamentos lineares devem ser considerados para os elementos individuais (ver sessão 6.6).

Pisos nervurados

Os elementos nervurados são protendidos longitudinalmente, para ambas as resistências à flexão e ao cisalhamento, bem como para controlar as flechas. Quando necessário, uma armadura de cisalhamento (transversal) é também colocada nas almas nas zonas de ancoragem. As mesas podem ser armadas com tela soldada, para controlar a fissuração por retração e para assegurar a distribuição horizontal das forças para as almas. Os elementos são projetados de acordo com as hipóteses clássicas para concreto protendido.

Placas de piso

As placas pré-moldadas para piso são protendidas ou armadas. Quando empregadas, as armaduras treliçadas são fabricadas com barras de aço com alta resistência à tração para enrijecer os elementos durante o transporte e montagem. As barras longitudinais nas treliças são ignoradas no projeto para o Estado Limite de Serviço, mas elas podem ser incluídas no cálculo do Estado Limite Último.

Lajes com vigotas

A análise completa dos pisos compreende o cálculo das vigotas e dos blocos de preenchimento, no estágio da construção, e a estrutura completa do piso após o endurecimento do concreto, no estágio final. As vigotas são pequenas vigas pré-moldadas em concreto armado ou protendido. Dentro do grupo das vigas armadas estão as vigotas treliçadas, compostas de uma mesa inferior de concreto e uma armadura treliçada.

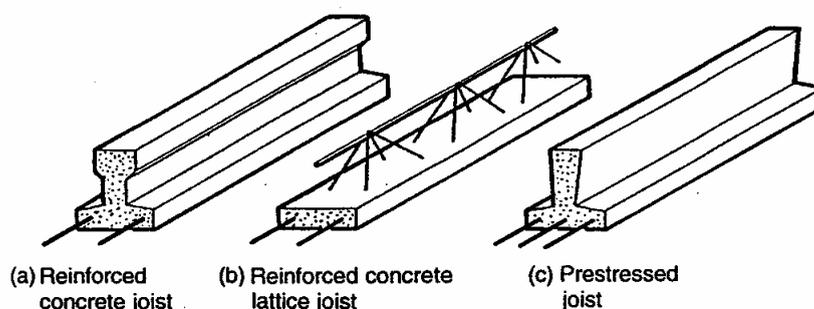


Figura 6.13 tipos de vigotas

As vigotas podem desempenhar sua função estrutural de diferentes maneiras:

- considerando o estágio de montagem, elas podem ser de auto-portantes ou podem ser temporariamente apoiadas por escoramentos;
- considerando o estágio final de apoio, elas podem ser auto-portantes ou semi-portantes. No primeiro caso o concreto não é considerado na capacidade portante, enquanto que no segundo caso o concreto e os blocos de preenchimento são adotados para a capacidade portante da estrutura composta.

Os blocos de preenchimento podem ser também utilizados de diferentes formas:

- blocos não resistentes, sem função estrutural no sistema de apoio final, servindo apenas como forma perdida durante a execução. Esse é por exemplo o caso dos blocos para preenchimento de poliestireno expandido;

- blocos semi resistentes, os quais transmitem as sobrecargas (ações variáveis) para as vigotas na direção transversal, mas não possuem função estrutural em para a capacidade de flexão longitudinal, ou em relação à capacidade de cisalhamento do piso;
- blocos resistentes, os quais atuam em conjunto com o concreto moldado no local como zona de compressão na seção composta.

Maiores detalhes sobre Projeto e cálculo dos sistemas de pisos formados por lajes com vigotas estão disponíveis no manual da FIP "Estruturas Mistas Horizontais".

6.5.2 Projeto de Piso com Pré-Moldagem Completa

Os sistemas de pisos, constituídos de elementos pré-moldados individuais, devem ser amarrados para formar uma só entidade estrutural. Os objetivos a serem atingidos são: **a) integridade estrutural; b) distribuição das forças horizontais; c) distribuição transversal das cargas concentradas.**

Integridade estrutural

Os sistemas de pisos constituídos por elementos de concreto pré-moldado individuais devem ser mantidos amarrados entre si para formar uma única entidade estrutural, com ou sem uma cobertura de concreto estrutural moldado no local sobre toda a superfície do piso.

Sistema de amarração por meio de tirantes

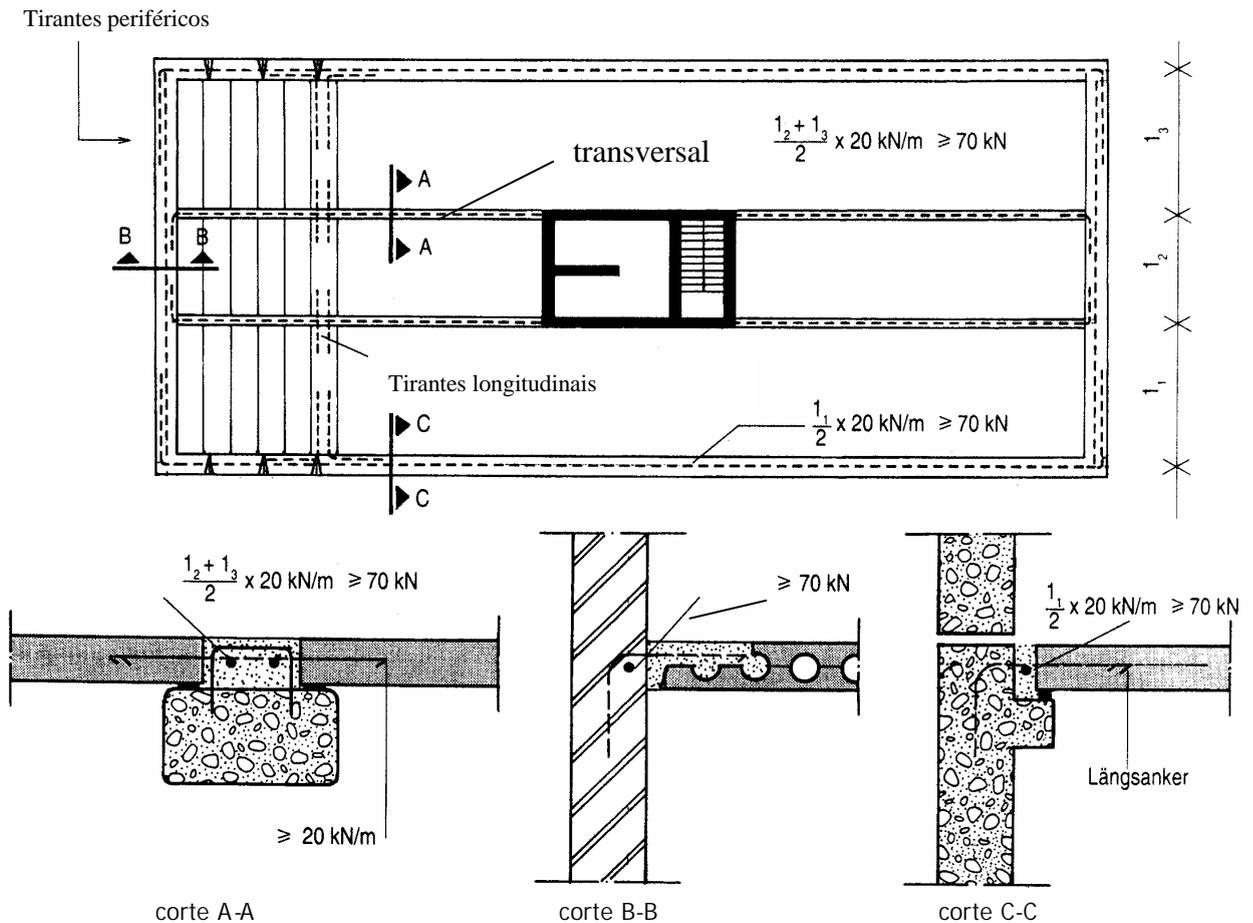


Figura 6.14 Amarrações horizontais

Os tirantes são elementos tracionados constituídos de faixas estreitas de concreto de preenchimento, bainhas ou vigotas entre os elementos pré-moldados. A função principal desses elementos é amarrar a estrutura, de tal forma que a força de tração pode ser transferida entre os elementos pré-moldados individuais e entre os elementos e as estruturas resistentes. O sistema de amarração também torna possível a transferência de cisalhamento, promovendo o efeito de travamento necessário.

O concreto de preenchimento serve para transferir as forças de tração e de cisalhamento dos elementos para a armadura de tirante e para prevenir uma eventual corrosão. A corda tracionada pode ser com armadura passiva ou ativa. Em qualquer dos casos, o sistema de amarração deve estar efetivamente contínuo. Isto pode ser obtido usando armadura sobreposta, com acoplamento por rosca, soquetes moldados ou outros fixadores.

Os seguintes tipos para amarração por tirantes serão (fig. 6.14)

Armação de tirantes periféricos

Esses tirantes são colocados ao redor de todo o piso pré-moldado, dentro de uma distância de 1.2 m na borda. Os tirantes periféricos são feitos contínuos ao redor dos cantos externos, concretando-os dentro de juntas com bordas moldadas no local ou por sobreposição da armadura de tirante com armadura longitudinal no componente pré-moldado. Nos cantos internos do perímetro das estruturas com bordas internas, a armadura de tirante deve ser ancorada para dentro em ambos os lados.

Amarrações internas

Essas amarrações são colocadas nas duas direções, paralelas e perpendiculares ao vão dos elementos do piso. A primeira categoria é chamada de amarração longitudinal e a segunda categoria é a amarração transversal. As amarrações internas, completa ou parcial, podem ser espalhadas igualmente pelo piso ou podem ser agrupadas nas (dentro) juntas, vigotas, vigas do piso, paredes ou outras posições apropriadas. Em pisos sem a capa de concreto no local, onde as amarrações não podem ser distribuídas sobre a direção do vão, as amarrações transversais podem ser agrupadas junto às linhas das vigas.

Amarrações horizontais para pilares e paredes

Os pilares e as paredes da fachada devem ser amarrados horizontalmente dentro da estrutura do piso por inteiro e também nos níveis da cobertura. Os cantos dos pilares devem ser amarrados em duas direções. Nesse caso, a seção efetiva para a amarração periférica pode ser utilizada como amarração horizontal.

Os requisitos para as capacidades mínimas da força de amarração estão disponíveis nas normas nacionais, como por exemplo: a norma britânica BS 8110, o código sueco de construção SBN-1890, e o código europeu EN 1992-1-1.

Capa de concreto estrutural

Os tirantes de amarração também podem ser fornecidos totalmente dentro da capa de preenchimento de concreto. As capas de concreto para preenchimento não são normalmente necessárias para atingir uma interação adequada entre os elementos do piso. A tendência é evitar o máximo possível o trabalho de concretagem no local e executar a maior parte do trabalho na fábrica pré-moldada. As capas de concreto de preenchimento são apenas necessárias onde há a necessidade de uma ação composta entre os elementos do piso, ou quando há cargas concentradas muito altas, assim como aquelas cargas devidas de armazenagem e máquinas pesadas, ou quando cargas móveis como das empilhadeiras e em zonas sísmicas. As capas de concreto de preenchimento devem sempre ser armadas com tela soldada.

Ação de diafragma

As estruturas pré-moldadas para pisos funcionam como diafragmas horizontais e distribuem as forças horizontais provenientes do vento e de outras ações para os componentes estabilizadores. A armadura

de amarração periférica é calculada para resistir as forças de tração que são o resultado da curvatura. As forças de cisalhamento são concentradas ao longo das juntas longitudinais entre as lajes do piso. Elas são resistidas pelo mecanismo de fricção por cisalhamento, ou em combinação com armadura transversal no cruzamento das juntas. No primeiro caso, as forças de cisalhamento no ELS não devem exceder 1.5 N/mm^2 .

A ação do diafragma também pode ser concebida com uma capa de concreto armado moldado por toda a área do piso. As ligações da capa com os componentes de estabilização devem ser desenhados em conformidade.

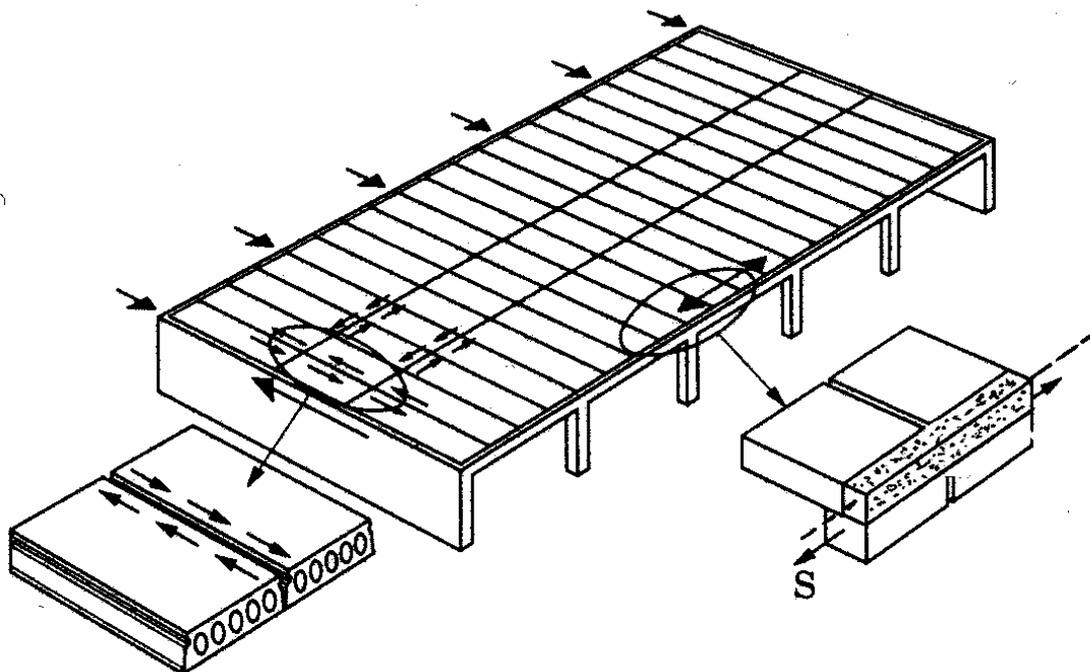


Figura 6.15 ligações de amarração em lajes alveolares para realização da ação diafragma

Distribuição transversal da carga concentrada

Usualmente, os pisos não recebem apenas carregamentos uniformemente distribuídos, mas também se pode ter linhas concentradas ou pontos de cargas, como na divisão entre paredes. Quando essas cargas são suportadas somente pelas lajes isoladas, isto deveria conduzir para dimensionamentos maiores para o elemento considerado e conseqüentemente para o piso total, o que seria estritamente necessário para uma carga uniformemente variável. Todavia, na realidade, a carga concentrada é espalhada para um número de elementos vizinhos.

Quando uma laje simplesmente apoiada é carregada por cargas uniformemente distribuídas, cada elemento de laje deflete similarmente. A situação é diferente quando a laje é sujeitada às cargas concentradas, com linhas de carga ou pontos de carga. O elemento de laje que suporta a carga concentrada flexiona. Pelo fato dos elementos de laje serem conectadas por juntas grauteadas e pelas amarrações de tirantes transversais, os elementos adjacentes à laje carregada também são forçados a fletir, onde o efeito da carga concentrada é distribuído para uma área maior que a do elemento de laje diretamente carregada.

Muitas pesquisas têm sido realizadas sobre a questão da distribuição transversal da carga para lajes alveolares e para pisos de painéis nervurados. Os resultados destas pesquisas indicam que a carga concentrada é distribuída para os elementos adjacentes, semelhante ao que ocorre em um piso monolítico.

A FIB (Comissão de Pré-fabricação) desenvolveu um modelo analítico de cálculo para pisos de laje alveolar, o qual está baseado na teoria da elasticidade. Os elementos são considerados como lajes

isotrópicas e as juntas longitudinais como articulações, em outras palavras, elas apenas transmitem as forças de cisalhamento, mas não momentos fletores.

A magnitude das forças de cisalhamento verticais nas juntas depende da rigidez à torção dos elementos, da rigidez de flexão longitudinal e transversal dos elementos, e como o deslocamento lateral das lajes em relação a cada elemento é restringido. Mesmo no caso das juntas fissuradas, as forças de cisalhamento serão transmitidas através das fissuras no graute devido à presença de tensões laterais de compressão, originadas da torção dos elementos e do mecanismo atrito-cisalhamento. Em qualquer caso, a capacidade de transferir cisalhamento deve ser controlada pela armadura de tirante transversal no apoio, a qual fornece forças perpendiculares necessárias para a junta, quando os elementos adjacentes tendem a se separar. A resistência exigida para a armadura de tirante transversal deve ser no mínimo igual à força de cisalhamento vertical total, a qual tem que ser transmitida através das juntas longitudinais.

A distribuição da carga transversal pode ser considerada no cálculo se as seguintes condições forem satisfeitas:

- as juntas longitudinais entre os elementos devem ser projetadas para resistir as forças de cisalhamento (fig. 6.16) e, durante a instalação, deve ser empregado um graute não retrátil para preencher as juntas;
- o deslocamento lateral deve ser limitado.

A distribuição do carregamento também pode ser conseguida pela capa de concreto estrutural, o que é mais aplicada nos elementos de pisos com painéis nervurados, por causa do fato de que a espessura da junta é muito pequena para transferir as forças de cisalhamento verticais apenas através da argamassa na junta.

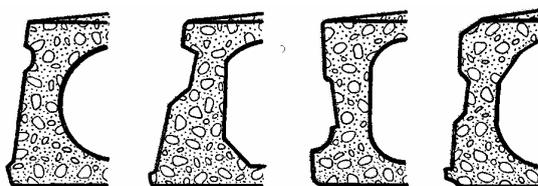


Figura 6.16 Perfis típicos de juntas para elementos de laje alveolares

Projeto prático para a distribuição de cargas

A determinação da possível distribuição da carga pode ser feita tanto pelas regras simples de “consideração de segurança” ou por cálculos analíticos mais complicados. Em muitos casos, a aproximação mais simplificada é satisfatória. A carga concentrada é então assumida como sendo distribuída sob a largura efetiva e deve ser igual a largura total de três elementos de laje, ou sobre uma largura igual a um quarto do vão do outro lado da área carregada. Quando essa distribuição não é suficiente, serão utilizados cálculos analíticos mais complicados ou gráficos. Todavia, esses cálculos são específicos para cada tipo de piso pré-moldado.

Pisos de laje alveolar

Nas figuras 6.17 e 6.19 são apresentados exemplos de gráficos mostrando os fatores práticos de distribuição de carga para elementos de laje alveolar com 1.20 m de largura. Esses gráficos estão baseados tanto em cálculos analíticos quanto em resultados experimentais. Os gráficos são independentes em relação à espessura dos elementos, desde que a distribuição da carga seja governada pela relação entre a rigidez de torção e a rigidez da flexão dos elementos. Essa relação é muito pouco influenciada pela espessura dos elementos e pelo formato dos vácuos. Os gráficos devem ser apenas usados para determinação dos fatores de distribuição do momento de flexão e não para cisalhamento, desde que a distribuição da carga na região próxima ao apoio pode ser menos efetiva.

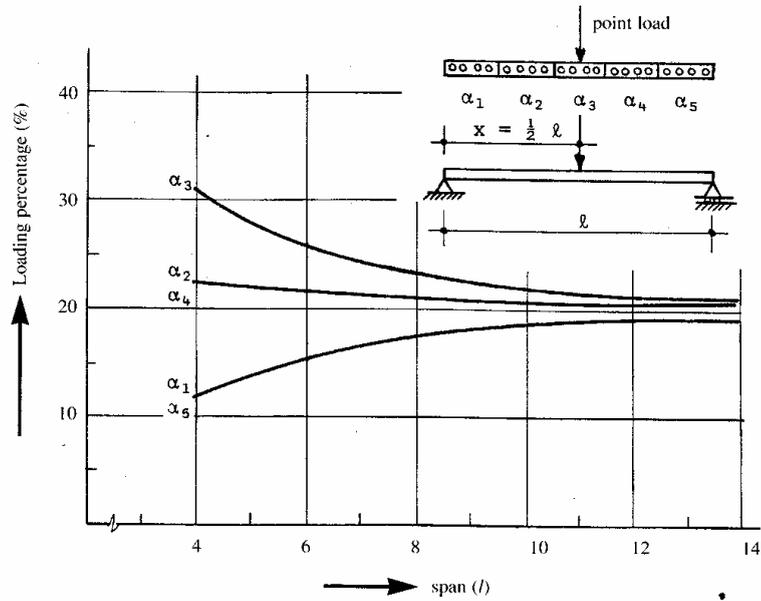


Figura 6.17 fatores de distribuição de carga para pisos de laje alveolar com 1.20 m de largura, para pontos de carga na área central da laje (apenas para momentos).

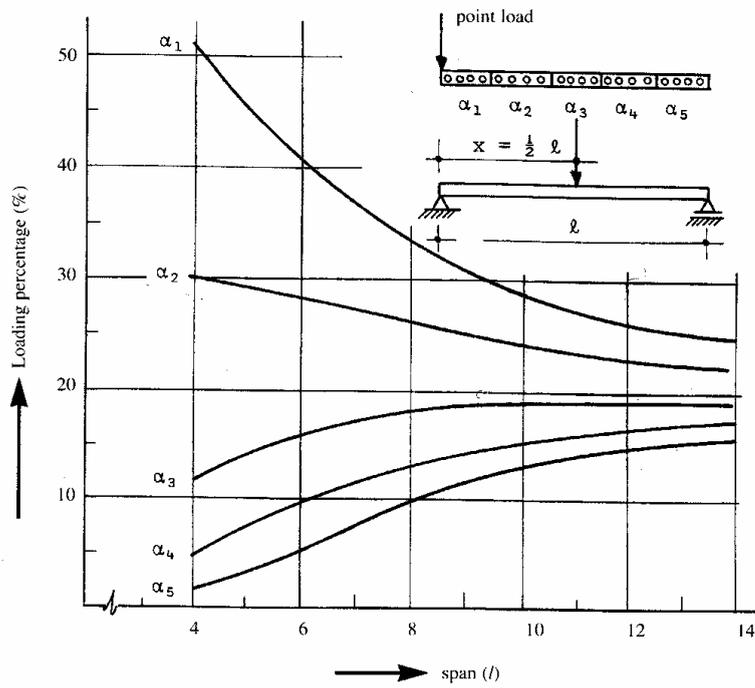


Figura 1.18 fatores de distribuição de carga para pisos de laje alveolar com 1.20 m de largura, para pontos de carga da borda da laje (apenas aplicada para momentos).

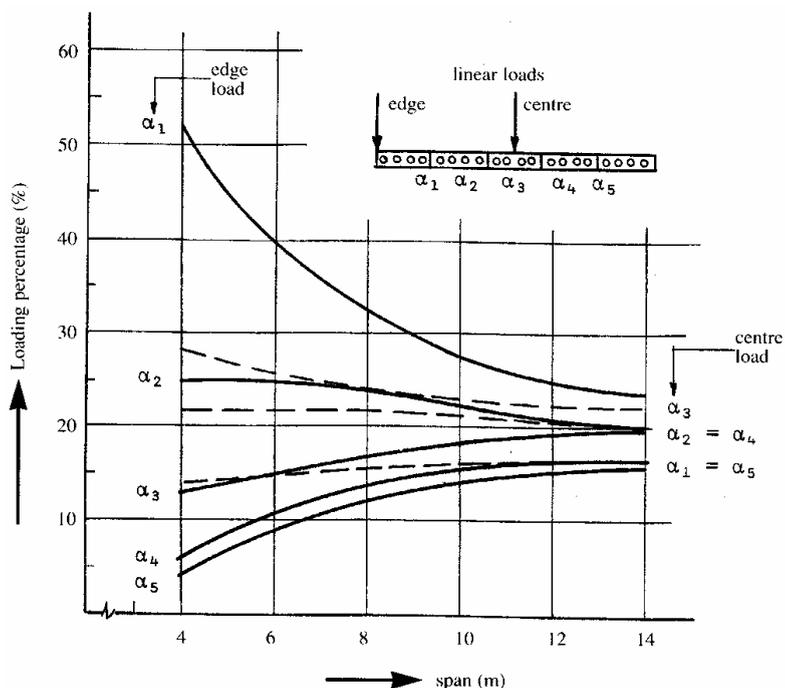


Figura 6.19 fator de distribuição de carga para pisos de laje alveolar com 1.20 m de largura, para cargas lineares concentradas (apenas para distribuição de momentos).

Pisos de painéis nervurados

A distribuição da carga transversal nos pisos em duplo-T com mesas delgadas (40/50 mm) requer uma capa de concreto estrutural com armadura transversal. Esse processo é recomendado para proporcionar barras transversais no topo das mesas dos elementos, as quais serão conectadas por soldagem após a instalação do painel (fig. 6.20a). No caso de elementos em duplo-T, onde as mesas possuem espessura suficiente para não necessitar da utilização da capa de cobertura de concreto, a distribuição transversal das cargas é possível de ser feita por meio das juntas grauteadas (Fig. 6.20b) e dos conectores soldados.

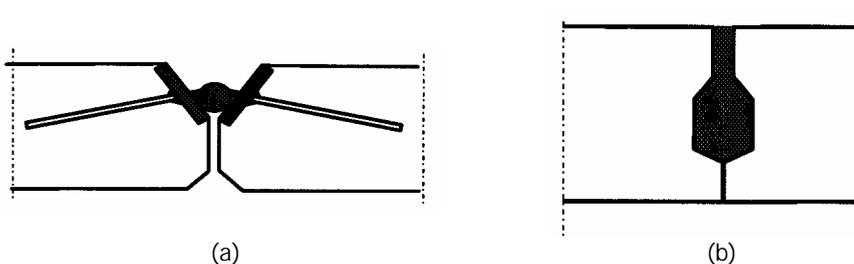


Fig. 6.20 ligações soldadas e grauteadas entre os elementos de piso em duplo-T

Pisos pré-moldados compostos (ou mistos)

A distribuição da carga transversal nos pisos pré-moldados compostos é similar ao que ocorre para os pisos moldados no local, desde que a armadura transversal adequada seja contínua sobre as juntas longitudinais entre os elementos compostos.

Para as lajes com vigotas, os seguintes procedimentos simplificados podem ser aplicados quando as condições listadas abaixo forem satisfeitas:

- o piso possui uma capa de concreto estrutural com armadura transversal;

- a distância entre as vigotas não é superior que 800 mm;
- as cargas concentradas são aplicadas no meio central do vão do piso;
- as divisões ou outras cargas lineares são assumidas para estender sobre todo o comprimento do vão, ou com pequenas interrupções (ex. porta), ou a carga é concentrada no meio central do vão.

Nesses casos, a carga efetiva resistida por cada vigota é obtida multiplicando a carga total concentrada pelos fatores de carga apresentados na Figura 6.21. Quando a carga não atuar sobre uma vigota, mas entre duas delas, a carga é dividida entre as duas vigotas adjacentes e o emprega-se o mesmo procedimento mencionado acima. Maiores informações estão disponíveis no manual de projeto da FIB "Horizontal Composite Structures".

Tabela 6.21 distribuição dos fatores de carga para lajes com vigotas

Number of joists to each side of the loaded joist	Coefficient for the joist no										
	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6
	1	2	3	4	5	6	7				
2	0.26	0.22	0.15	0							
3	0.24	0.19	0.13	0.06	0						
4	0.22	0.17	0.12	0.07	0.03	0					
≥ 5	0.21	0.17	0.12	0.07	0.03	0.01	0				

Pisos em balanços e sacadas

Os em balanços podem ser formados de muitas maneiras:

Vigas em balanços acima dos pilares podem suportar os pisos e sacadas. As vigas em balanço requerem que os pilares sejam seccionados em todos os níveis dos pavimentos. Esse projeto pode também requer um grande número de vigas e pode precisar de viga de canto adicional na extremidade dos balanços.

Certos tipos de elementos de pisos, como o duplo-T, podem ser projetados com balanços diretamente sob as bordas da viga. Elementos de lajes alveolares não são recomendadas para ação direta em balanço. As lajes são projetadas com armadura ativa na parte superior e inferior da seção transversal. A ação em balanço é também resistida por uma capa estrutural de concreto armado ancorada em tirantes posicionados nas aberturas dos alvéolos longitudinais, os quais também são preenchidos com concreto (Figura 6.22). Ao utilizar qualquer tipo de piso, o fabricante deve ser consultado porque os elementos de piso são normalmente projetados como simplesmente apoiados.

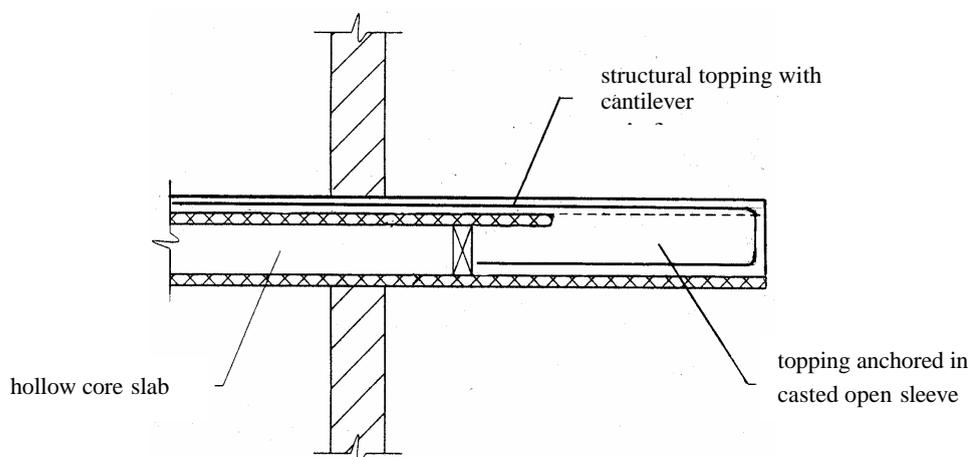
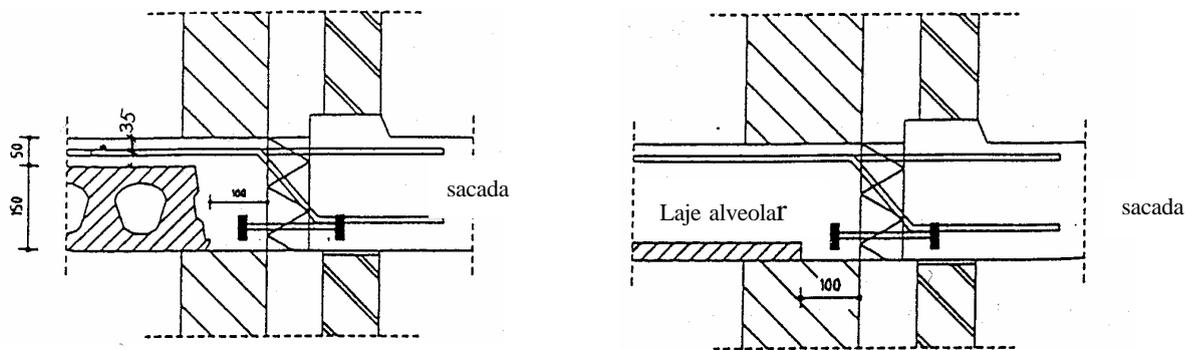


Figura 6.22 laje alveolar em balanço

Em regiões frias, devem ser tomados cuidados especiais para evitar pontes térmicas nos elementos em balanços. Uma possível solução para sacadas é apresentada na Figura 6.23. Uma camada intermediária isolante é colocada entre a sacada pré-moldada e o piso. As forças atuantes na junta são transferidas por meio do concreto ou por meio de chumbadores ou de armadura negativa, deixada como espera do elemento de sacada e ancorada na laje alveolar.



Sacada junto à borda longitudinal da laje alveolar

Sacada no prolongamento da laje

Figura 6.23 Sacadas em balanços com camada de isolamento intermitente para evitar pontes térmicas

6.7 Ligações

6.7.1 Geral

É importante considerar os seguintes tipos de ligações para pisos:

- ligações nos apoios;
- ligações nas juntas longitudinais;
- ligações laterais nas bordas não apoiadas dos pisos

Para assegurar que os pisos pré-moldados funcionem satisfatoriamente, é importante conceber e projetar adequadamente as ligações, onde os princípios já apresentados no Capítulo 4 devem ser seguidos. A sessão seguinte apresenta algumas recomendações e fornece alguns exemplos para o desenvolvimento do projeto e alguns detalhes de ligações para pisos.

Os objetivos essenciais a serem satisfeitos pelas ligações nos apoios são:

- conectar os elementos com a estrutura de apoio;
- transferir as forças de tração para os sistemas de estabilização;
- estabelecer integridade estrutural e tornar possível a ação de diafragma e distribuição das ações horizontais;
- acomodar os efeitos da fluência, da retração, das mudanças de temperatura e dos recalques diferenciais.

6.7.2 Ligações para apoios

O detalhamento das ligações para apoios depende do tipo de elemento de piso e do material da estrutura no apoio: concreto; aço ou alvenaria de tijolos. Alguns pontos devem ser considerados:

- comprimento mínimo de apoio, considerando as tolerâncias;
- planicidade da zona de contato junto ao apoio;
- capacidade de rotação – prevenção de lascamento do concreto;

- arranjo dos tirantes;
- grau de restrição dos elementos de piso

Comprimento do apoio

O comprimento nominal do apoio de um piso pré-moldado deve permitir a movimentação e rotação da laje sem risco de romper a borda da estrutura de apoio, considerando as tolerâncias possíveis no comprimento do elemento e a distância entre as vigas ou paredes de apoio.

A tabela 6.25 apresenta os valores nominais de projeto para o comprimento de apoio dos elementos pré-moldados de piso na direção longitudinal, o que pode ser usado no estágio inicial do projeto. As figuras incluem valores provisórios para tolerâncias tanto no comprimento do elemento de piso quanto na posição da estrutura de apoio. Há uma certa tolerância a respeito do risco de fragmentação (lascamento do concreto).

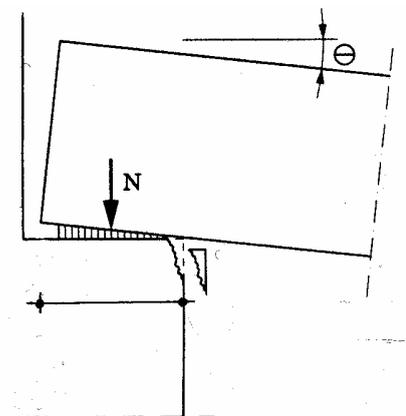


Figura 6.24 comprimento nominal do apoio do piso

Para elementos de lajes alveolares, lajes com vigotas e lajes com painéis compostos, as tensões de contato nos apoios são raramente críticas. Contudo, para os elementos de painéis nervurados, as cargas podem ser bem altas e a zona de apoio bem menor, ex.: quando elementos em duplo-T são apoiados em suas almas. Nesses casos, deve ser usado o valor máximo da tabela 6.23.

Tabela 6.25 valores nominais para comprimento de apoio a ser utilizado no estágio inicial do projeto

Estrutura de apoio	Elementos laje alveolar 120 a 400 mm	Elementos em duplo-T, com altas cargas	Lajes com painéis compostos	Lajes com vigotas
Vigas de aço ou de concreto armado	70 - 130	75 - 150	70	100
Alvenaria de tijolos	100 - 150	-	100	125

As almofadas de neoprene fretado (cintado) ou de argamassa, as chapas de fibro-cimento ou materiais similares são utilizadas para localizar a reação do apoio e para melhorar as condições de apoio quando superfícies de apoio são desiguais, ou quando as tensões de contato são. Nas cargas leves, como em construções residenciais, elas não são sempre estruturalmente necessárias e os elementos de piso

podem ser colocados diretamente sobre a estrutura de apoio. Em outros casos, recomenda-se o uso de almofadas de apoio.

Para os elementos em dublo-T é recomendável localizar o apoio nas almas, mesmo quando houver uma chapa de topo saliente nas extremidades do elemento, onde as forças de apoio são introduzidas diretamente nas almas.

Arranjo de tirantes nos apoios

O objetivo das ligações com tirantes nos apoios é assegurar a transferência das forças verticais e horizontais do piso para a estrutura adjacente, para as ações normais e/ou anormais. A ligação deve satisfazer os requisitos da transferência de forças, de integridade estrutural, de deformidade e de ductilidade. O detalhamento dos tirantes longitudinais, transversais e periféricos muito importante neste contexto. Existem soluções práticas diferentes, dependendo do tipo de piso e da estrutura de apoio.

Nos pisos de laje alveolar, os tirantes de amarração longitudinais são colocados nas juntas longitudinais grauteadas ou nas bainhas concretadas (Figura 6.26). As bainhas são embutidas (inseridas) nas mesas superiores durante a etapa de fabricação. As barras colocadas nas juntas longitudinais precisam de um comprimento de ancoragem entre 1,0 e 1.50 m por causa das condições da ancoragem menores que as bainhas grauteadas, onde o comprimento de ancoragem pode variar entre 0.6 e 0.8 m.

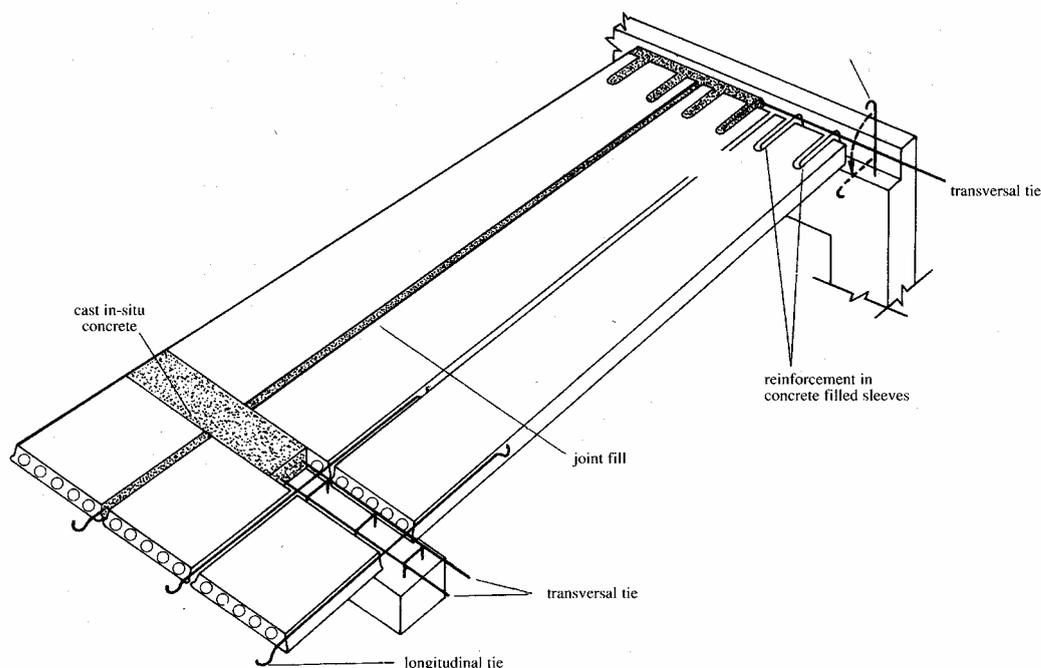


Fig. 6.26 Ancoragem das barras de tirante longitudinais nos elementos de lajes alveolares.

A menos que os apoios sejam projetados para continuidade de momentos, é recomendado colocar as barras de armadura para a conexão no meio da seção transversal, ao invés de colocá-las na mesa superior, para evitar o aparecimento de momentos de restrição junto aos apoios. Não é muito indicado colocar a armadura próxima da superfície inferior, pois isto é menos favorável em relação à filosofia de projeto com respeito à integridade estrutural, como será explicado mais a frente neste capítulo. Portanto, recomenda-se colocar a barra no meio da seção transversal.

Nos apoios intermediários, as barras de tirantes longitudinais são colocadas continuamente sobre a estrutura de apoio, enquanto que nas vigas de borda os tirantes longitudinais são diretamente ancorados na viga de amarração transversal, ou na estrutura de apoio que possui a função de viga de amarração (Figura 6.26).

Nos pisos com elementos nervurados, a continuidade entre os elementos e a estrutura de apoio é obtida pela ancoragem direta das barras de espera das vigas de amarração ou por soldagem (Figura 6.27).

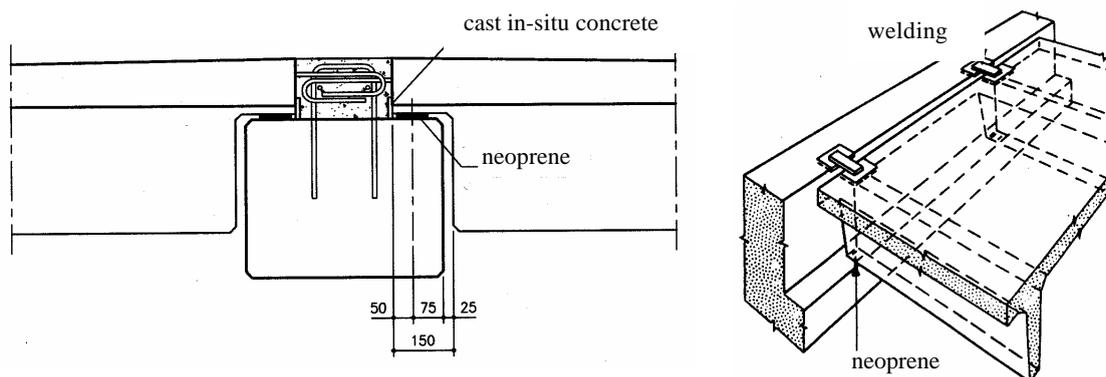


Fig. 6.27 Ligações de apoio para elementos em duplo-T

A conexão entre os elementos pré-moldados de piso e a estrutura de apoio pode ser conseguida através de uma camada de concreto estrutural moldada no local. As armaduras embutidas nessa camada podem ser contínuas sobre as vigas internas e sobreposta com as armaduras de espera das vigas de piso.

As ligações entre os pisos com painéis compostos e os elementos de apoio apresentam alguns problemas. A continuidade pode ser proporcionada por meio de sobreposição da armadura de tela soldada com as armaduras de espera das vigas e paredes de apoio. Nos pisos de lajes com vigotas, a ligação é conseguida por meio de soluções típicas com traspasse das barras projetadas das vigas com a armadura da região de preenchimento de concreto, etc. Alguns detalhes típicos da ligação viga-piso são mostrados na Figura 6.28.

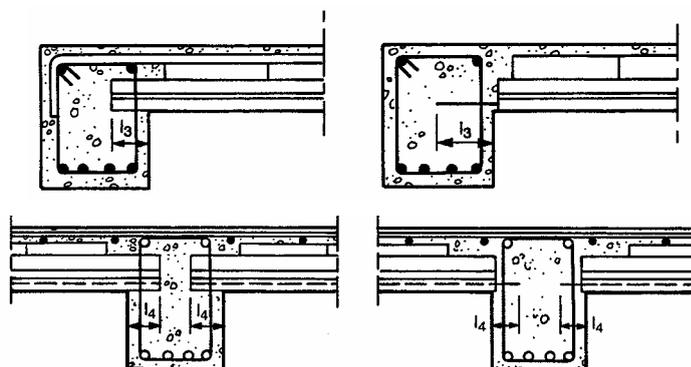


Figura 6.28 ligações nos apoios dos pisos de lajes com vigotas

Elementos de lajes alveolares travados entre paredes

Os elementos de piso são normalmente projetados assumindo-se que os mesmos sejam simplesmente apoiados. Essa é uma conseqüência lógica da filosofia do geral de projeto para manter as ligações simples e para garantir a estabilidade por meio de um número limitado de componentes de estabilização. Contudo, podem aparecer efeitos não intencionais, por causa de cargas altas da parede na extremidade dos elementos de piso. Nas lajes alveolares sem armadura na camada superior, a solução para o problema é suportar os elementos de piso em consolos nas paredes ou empregar juntas com preenchimento parcial ou com extremidades inclinadas. A justificativa para essa última solução se baseia em experimentos. Sabe-se que, no caso das extremidades inclinadas, a primeira fissura normalmente aparece entre a extremidade do piso inclinado e a junta preenchida de concreto, e que essas fissuras acabam dentro da zona de apoio do elemento. Para carregamentos adicionais, o elemento se comporta como um elemento com apoios livres e apresenta a mesma capacidade de cisalhamento como quando com um apoio simples.

O problema também pode ser evitado projetando-se os elementos de tal forma que eles possam resistir os momentos negativos através da armadura na última camada de concreto.

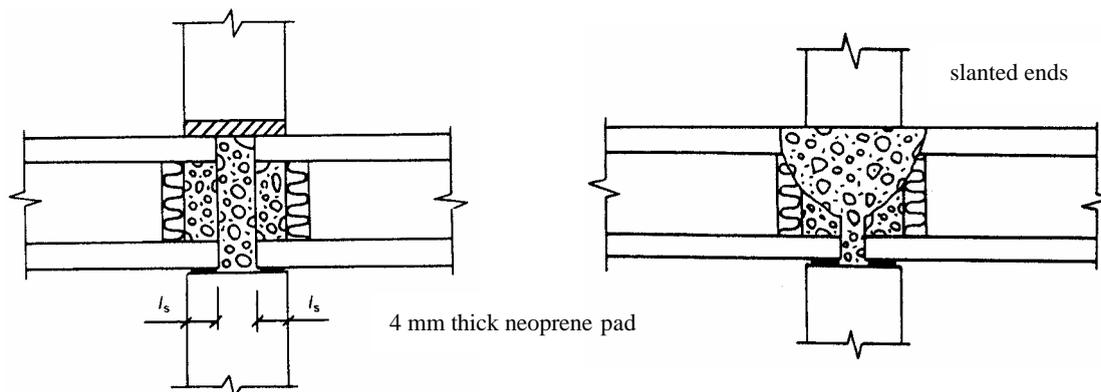


Figura 6.29 ligações nos apoios detalhadas para evitar efeitos das restrições negativas

Ligações nos apoios sobre vigas metálicas

A figura 6.30 mostra exemplos de ligações de apoio sobre vigas metálicas. Nas estruturas delgadas para pisos, as barras da armadura são colocadas sobre o perfil metálico ou através das aberturas na alma desse perfil. Quando é exigida a resistência ao fogo, todas as partes expostas da viga metálica devem ser protegidas adequadamente por isolamento ao fogo.

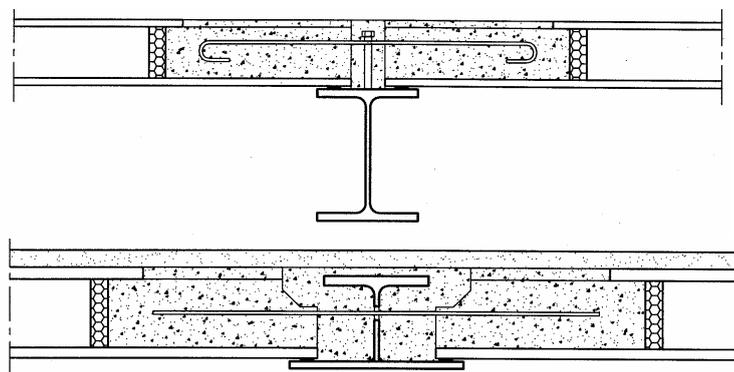


Figura 6.30 Exemplos de pisos apoiados em vigas metálicas

6.7.3 Ligações nas juntas laterais

A função principal das juntas laterais entre os pisos, vigas ou paredes pré-moldados é a conexão deles ao piso e para transferir as forças de cisalhamento horizontais entre o piso e componentes de estabilização adjacentes.

Podem surgir recessos das ligações nos elementos de piso de laje alveolar com a remoção de uma parte mesa superior. Barras de armadura e concreto moldado no local são colocados intermitentemente na borda da laje. As juntas contínuas instaladas no local podem ser utilizadas quando for necessária uma conexão de cisalhamento alta. Isso pode ser conseguido ou utilizando um elemento nervurado ou prolongando na espessura total. A laje é suficientemente flexível para acomodar movimentos verticais diferenciados causados por alterações de temperatura e carregamentos.

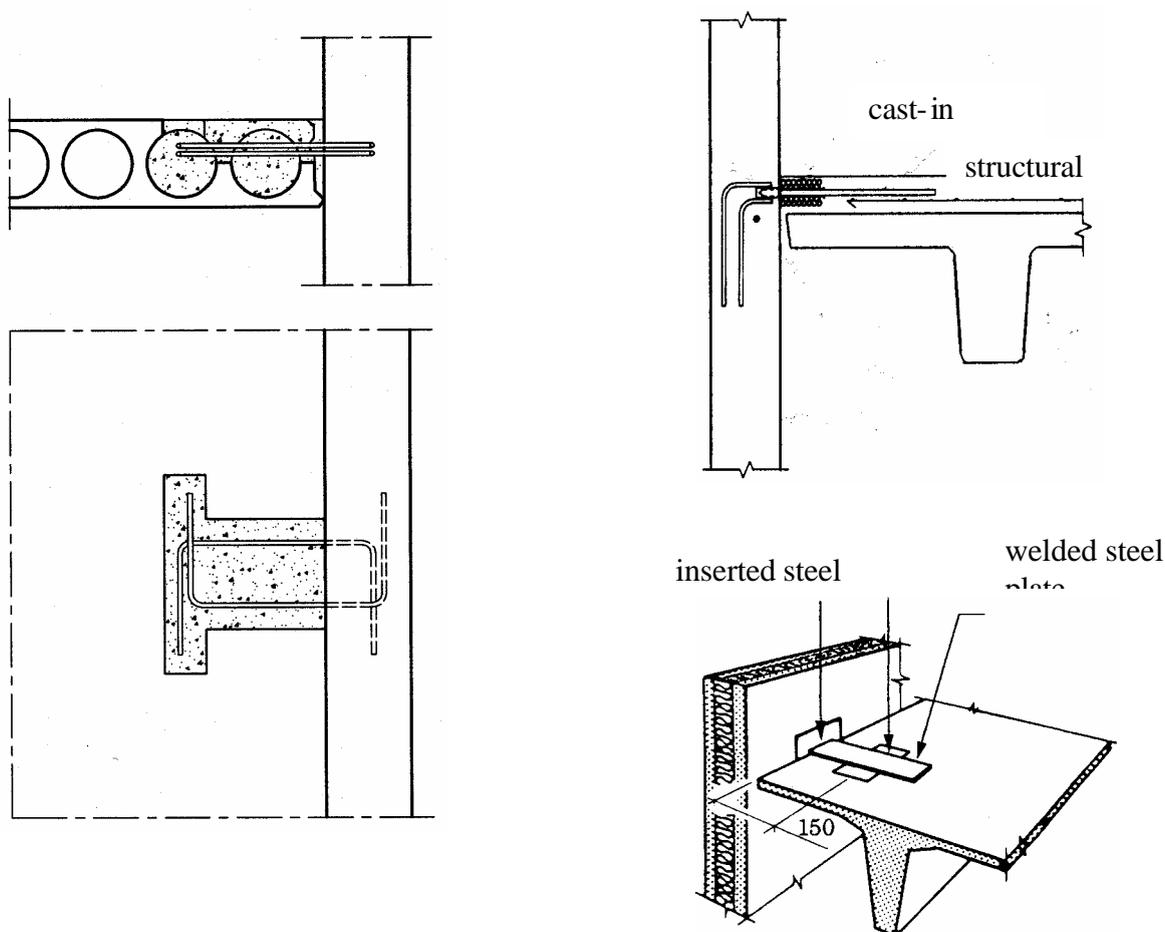


Figura 6.31 ligações nas juntas laterais dos pisos de lajes alveolares e pisos em duplo-T

6.8 Aberturas e interrupções

Nos pisos pré-moldados, as aberturas podem ser conseguidas em uma grande variedade de tamanhos e posições, as quais são influenciados pelas considerações do projeto estrutural, manuseios, da aparência visual e dos custos. As aberturas nos pisos de lajes alveolares são tratadas de uma ou duas formas dependendo do tamanho.

Comprimento/largura (mm)	HC 180 - 300	HC 400
- canto	600/ 400	600/ 300
- frente	600/ 400	600/ 200
- bordas	1000/ 400	1000/300
- aberturas centrais arredondadas	Núcleo mínimo 20 mm	135
- aberturas quadradas	1000/400	1000/200

Pequenas aberturas de menos de 300/400 mm podem ser instaladas em elementos pré-moldados durante o estágio de fabricação e após o endurecimento do concreto. O tamanho máximo das aberturas depende do tamanho dos alvéolos na laje e do quanto de armadura deve ser removida sem comprometer a estabilidade do elemento. As dimensões são normalmente limitadas aos valores mostrados na tabela.

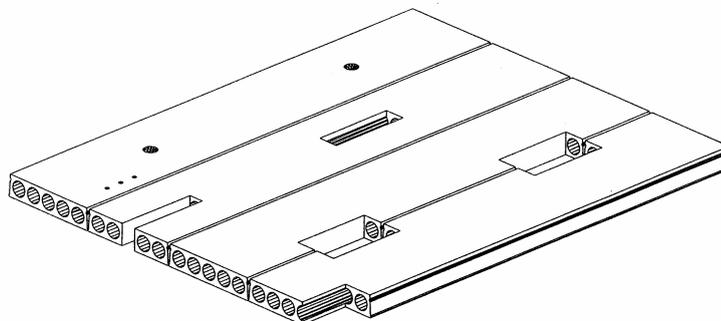


Figura 6.32 aberturas nos elementos de laje alveolar

Onde as aberturas são muito grandes para serem incorporadas dentro do elemento de laje alveolar, são utilizados dispositivos de apoio indireto com cantoneiras ou vigas moldadas no local para apoiar os pisos com grandes aberturas (Fig. 6.33). O peso dos elementos é transferido para os elementos adjacentes através dos dispositivos de apoio indireto com cantoneiras, enquanto que a sobrecarga é transferida diretamente para as juntas longitudinais grauteadas, sob a condição de que haja armaduras de tirantes periféricos e internos adequados cercado o piso todo. Os elementos de piso que circundam a abertura devem ser suficientemente armados para resistir as cargas adicionais.

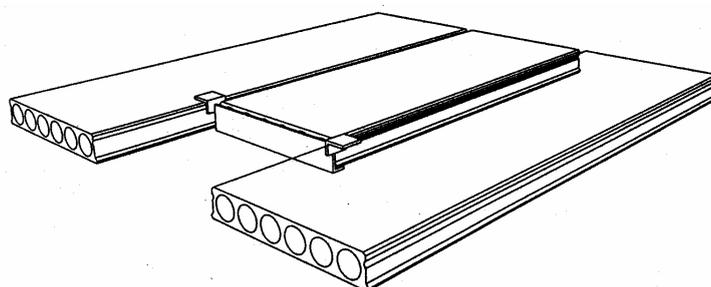


Figura 6.33 utilização de dispositivos de apoio indireto com cantoneiras ou vigas para grandes aberturas

É preciso se ter cuidado ao utilizar lajes alveolares em regiões onde o clima é úmido e frio, pois a água pode penetrar nas lajes alveolares durante a montagem. Se a água é permitida se ajuntar e expandir por congelamento existe a possibilidade que a mesa inferior se rompa. Uma solução simples é fazer furos na borda inferior da laje para drenar a água dos alvéolos.

As aberturas nos elementos de pisos nervurados podem ser conseguidas nas posições indicadas na Fig. 6.34. Em nenhuma circunstância as aberturas verticais devem ser formadas diretamente nas almas dos elementos em duplo-T. As aberturas circulares através das almas são possíveis acima da armadura ativa, para fornecer uma passagem para instalações prediais.

1/b (mm)	TT - 2400	TT- 3000
- centro	1000/630	1000/930
- borda	100/320	1000/460
- canto	1000/320	1000/460

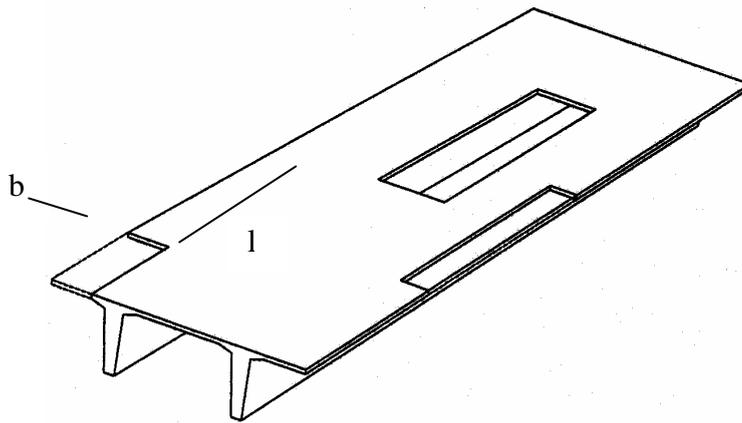


Figura 6.34 Aberturas nos elementos em duplo-T com em 2.4 e 3.0 m de largura

Nos pisos compostos por painéis pré-moldados, devido à pequena espessura das placas, as aberturas e interrupções podem ser facilmente adicionadas mesmo após as placas do piso serem posicionadas. Se necessário, uma armadura adicional pode ser colocada nas partes da laje concretada no local.

Capítulo 7 - Sistemas com Painéis Pré-Moldados Estruturais

7.1 Geral

Os sistemas de paredes estruturais com painéis pré-moldados são utilizados para fechamentos internos e externos em construções altas e baixas. Os elementos da parede são geralmente utilizados em edifícios altos. A espessura dos painéis depende dos requisitos de desempenho de estabilidade estrutural, de isolamento acústico e de resistência ao fogo. O comprimento dos painéis é variável de acordo com o projeto e com os equipamentos utilizados na fábrica. A tabela 1 fornece as dimensões mais comuns para os elementos de painéis.

Tabela 7.1 dimensões de painéis para sistemas de parede (fechamento)

Aplicação	Espessura (mm)	Comprimento máximo (m)	Altura (m)
Painéis estruturais:			
▪ com lajes armadas em duas direções	180 – 240	6.00 – 14.00	3.00 – 4.50
▪ com lajes armadas em uma direção	150 – 200		
Painéis não-estruturais:	80 – 150 (180)	6.00 – 14.00	3.00 – 3.30
Poços de elevador e de escada:	180 – 200	6.00 – 14.00	3.00 – 4.00

Os sistemas de parede com painéis pré-moldados de concreto são utilizados principalmente para residências e apartamentos, mas também são empregados em hotéis, hospitais ou outras edificações com funções semelhantes. Os sistemas de paredes também são utilizados com frequência para compor núcleos centrais, poços de elevadores e paredes de contraventamento para todos os tipos de edificações. Além disso, os painéis pré-fabricados são apropriados para paredes corta fogo.

Os painéis pré-moldados podem ser projetados tanto com concreto armado em concreto simples. Neste último caso, é aplicado apenas uma armadura periférica nas bordas do painel e ao redor das aberturas das janelas e portas. Além possibilitar uma construção rápida e industrializada, os painéis pré-moldados oferecem uma superfície lisa e pronta para receber pintura, apresentam boas propriedades acústicas e térmicas, além de possuir uma resistência ao fogo razoável de até 6 horas.

7.2 Sistemas estruturais

Os sistemas estruturais de parede podem ser divididos basicamente em duas categorias:

- sistema de paredes integral, onde todas as paredes internas e externas são em concreto pré-moldado.
- sistema de paredes na periferia, onde só as paredes externas ou as paredes que fazem a separação entre apartamentos são em concreto pré-moldado e as paredes internas são em blocos de alvenaria, ou qualquer outro sistema de divisórias.

7.2.1 Sistema completo de paredes

A figura 7.2 apresenta um esquema de construção de um edifício de apartamentos onde as paredes são em painéis pré-moldados de concreto. Algumas das paredes são portadoras de carga, outras apenas desempenham a função de fechamento. As fachadas são geralmente projetadas com painéis tipo sanduíche, onde a camada interna pode ou não ser portante. Geralmente, os pisos são executados com lajes alveolares protendidas ou com outros sistemas de lajes.

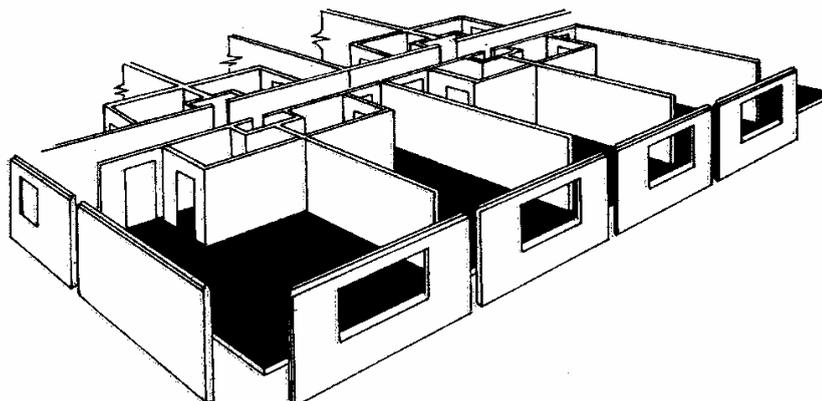


Figura 7.3 ilustração do sistema completo de paredes

7.2.2 Sistemas de parede no contorno (sistema “envelope”)

Nesses sistemas somente as paredes nos contornos dos apartamentos são pré-moldadas, sendo que os elementos de piso se estendem em toda a largura da casa ou apartamento. Normalmente, os pisos são compostos com lajes alveolares protendidas com vãos entre 9 e 12 m. As paredes portantes são ou as paredes de divisa entre apartamentos, no caso do sistema de paredes perpendiculares à fachada (Figuras 7.3 e 7.11), ou compõem as fachadas frontais e do fundo da construção (Figura 7.4). Dentro da filosofia moderna de projetos, procura-se criar grandes espaços livres dentro do apartamento, onde é possível não somente conseguir maior flexibilidade no *layout* interno do pavimento, mas também tem-se a possibilidade de modificações futuras.

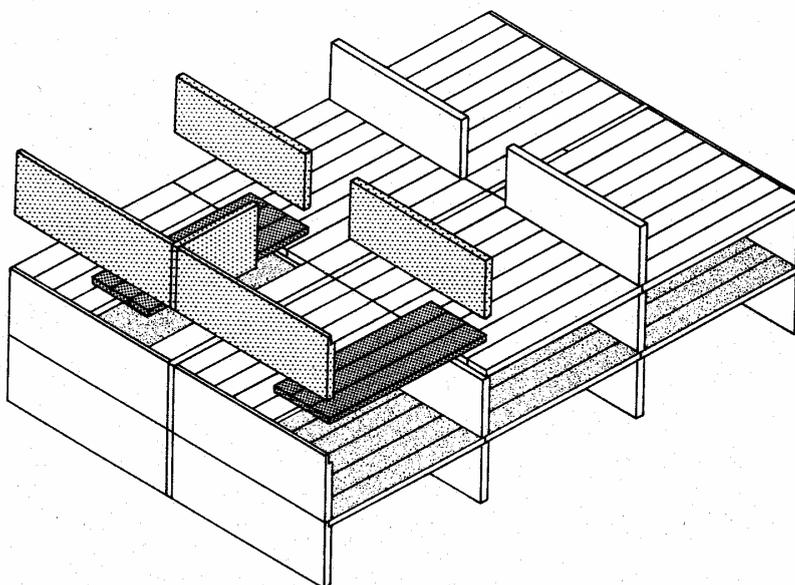


Figura 7.4 esquema da construção com paredes portantes perpendiculares à fachada.

Quando a largura total do edifício excede o vão máximo para as lajes, faz-se necessário empregar paredes portantes intermediárias ou estruturas com pilar e viga para apoio das lajes (Figura 7.4).

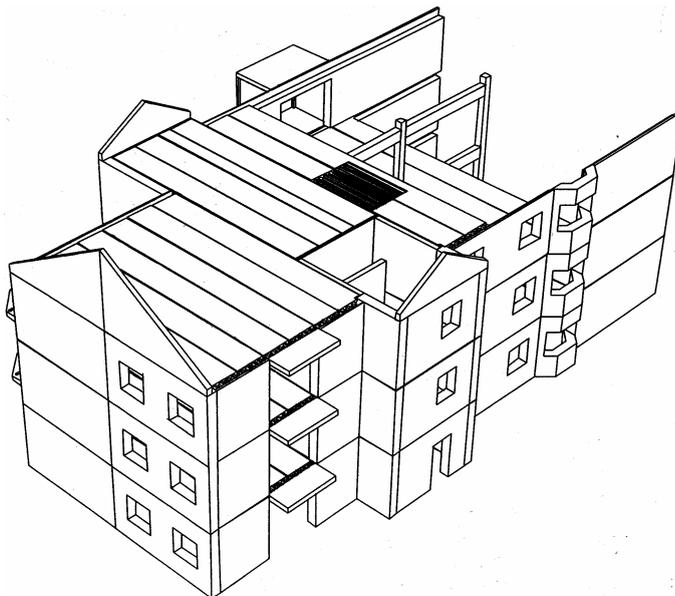


Figura 7.4 esquema de edifício de apartamentos com paredes portantes na fachada. Quando o vão total entre as fachadas opostas for muito grande, são empregados pilares e vigas intermediárias para apoio das lajes.

7.2.3 Sistemas compostos de parede e de esqueleto

Geralmente, os edifícios de apartamentos nos centros das cidades possuem tripla função: estacionamento no subsolo, galerias de lojas no primeiro andar e apartamentos nos andares superiores. Neste caso, a estrutura tem que ser planejada para vãos e cargas diferentes, consistindo, geralmente de uma estrutura em esqueleto no subsolo e no térreo, com sistemas de paredes do primeiro andar em diante.

7.2.4 Núcleos centrais e poços de elevadores

Paredes estruturais em painéis pré-moldados são geralmente utilizadas na construção de poços de elevadores e caixas de escada.

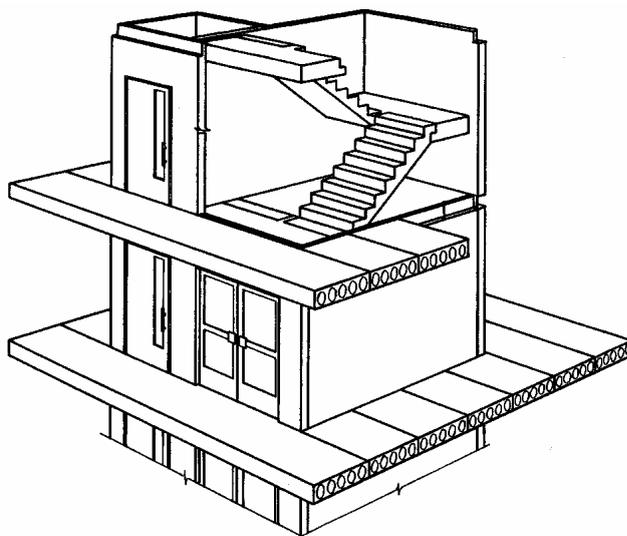


Figura 7.5 exemplo de núcleo central pré-moldado

O painéis são conectados ou solidarizados após a montagem seguindo a composição em forma de "T", "L", "U" ou com seções em forma de caixa vazada. Em alguns casos excepcionais, elementos celulares são completamente pré-fabricados na fábrica. A vantagem de se empregar núcleos e poços pré-fabricados ao invés de moldados no local está na qualidade do superfície final, rapidez na construção e oportunidade de uma melhor organização da montagem da estrutura totalmente pré-moldada.

7.3 Modulação

As seguintes diretrizes são dirigidas principalmente para edifícios de apartamentos de múltiplos andares. Contudo, eles também podem ser aplicados em edificações baixas.

Localização das paredes

As possibilidades para dimensões gerais são apresentadas na Tabela 7.6 e Figura 7.7

Tabela 7.6 possibilidades da modulação para paredes

	B 1,2,3	C 1, 2, 3	H
Mínimo	4.00 m	2.40 m	-
Normal	6.00 – 12.00 m	3.60 – 6.00 m	2.60 – 3.30 m
Máximo	14.00 m	12.00 m	4.20 – 4.50 m

O valor de B depende do vão dos pisos. B 1, 2, 3 devem ser modulados preferencialmente em $n \times 3M$ ou $n \times 6M$, onde M é um modelo básico. O valor C normalmente varia de 2.40 m ou mais, sem limites posteriores. É altamente recomendado modular C 1, 2, 3 em $n \times 6M$ ou $n \times 12M$, dependendo da largura dos elementos do piso.

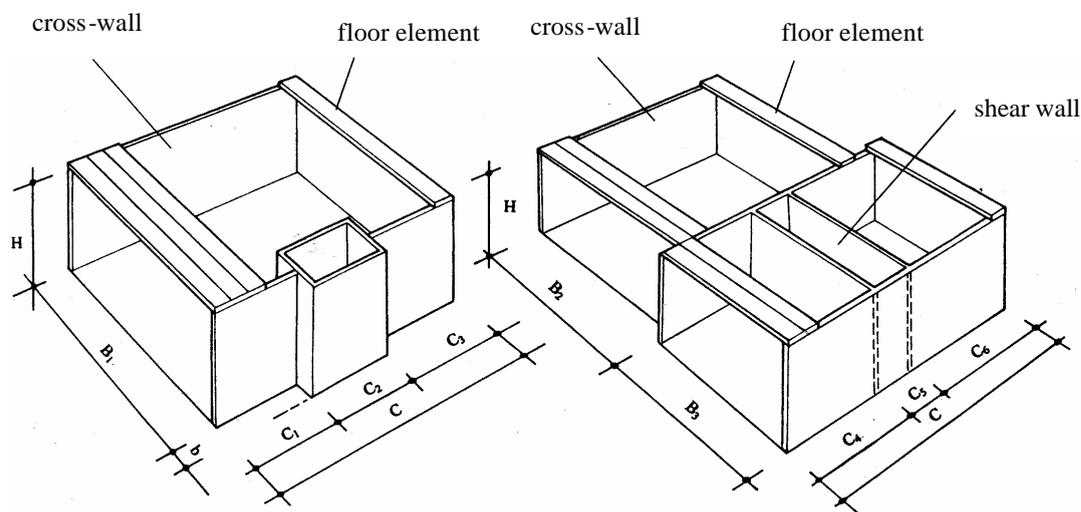


Figura 7.7 dimensões modulares recomendadas

Dependendo do perfil e do comprimento, as paredes dos apartamentos são compostas por um ou mais painéis alinhados. A altura máxima de um painel simples é governada pelos equipamentos utilizados na fábrica e na montagem, sendo normalmente entre 4 e 9 m, chegando excepcionalmente a 14 m. Quando C é maior que essas dimensões, são empregados vários painéis. É recomendado estabelecer juntas nas ligações com as paredes perpendiculares (ver por exemplo C4, C5, C6). O valor mínimo de 2.40 m na tabela 7.6 é aconselhado somente por considerações práticas para manter o custo dentro dos limites razoáveis.

7.4 Estabilidade

Análise de estabilidade estrutural das paredes de concreto pré-moldado submetidas à forças verticais e horizontais compreende:

- Resistência dos painéis na seção transversal mais carregada;
- Resistência à flambagem;
- Resistência das ligações horizontais.

7.4.1 Ações

As estruturas das paredes são projetadas para as seguintes ações:

- a) ações verticais: peso próprio e cargas variáveis;
- b) ações horizontais: causadas por ventos, excentricidade e inclinação da estrutura vertical;
- c) ações acidentais: tais como explosões, terremotos, impactos, etc.

7.4.2 Excentricidade

As cargas das lajes e das paredes superiores são transmitidas para as paredes inferiores com uma certa excentricidade. Estas excentricidades introduzem momentos fletores nos painéis pré-moldados e forças de tração nas ligações para o diafragma do piso. O cálculo das paredes e fachadas é baseado no princípio de que as ligações entre os painéis de parede são articuladas. As excentricidades iniciais seguintes são consideradas no cálculo das paredes e das ligações com as lajes:

- A) Excentricidades estruturais
 - posição excêntrica do apoio da laje sobre a parede e_7
 - excentricidade da carga do painel superior da parede e_s
 - excentricidade do peso próprio do painel e_G
- B) Excentricidades devidas às imperfeições geométricas
 - deficiência no alinhamento do painel na moldagem e_p
 - deficiência no alinhamento do painel na montagem e_m

Excentricidades estruturais

- ***Excentricidades nos apoios das lajes de piso sobre os painéis***

A carga total nas lajes pré-fabricadas simplesmente apoiadas é transferida para a parede com uma excentricidade e_{piso} .

Quando um elemento de piso é colocado sem almofadas de apoio ou argamassa, a localização de $(G + Q)_{\text{piso}}$ é de 1/3 do comprimento do suporte. No caso da argamassa ou aparelhos de apoio, a pressão de contato é assumida como sendo uniformemente distribuída e a carga do piso é localizada no centro do suporte.

Para a localização do e_{piso} as possíveis posições de deficiência não são consideradas.

Para lajes de piso com apoios engastados, a carga das lajes são aplicadas sobre os painéis em duas etapas e com duas excentricidades diferentes:

- G_{piso} é a parte da carga que é transferida para a parede antes do endurecimento do concreto moldado no local. A excentricidade é a mesma para os pisos simplesmente apoiados.
- Q_{piso} é a parte da carga transferida depois do endurecimento do concreto moldado no local. A carga é aplicada no centro da parede.

▪ **Combinação de excentricidades entre paredes sobrepostas**

A figura 7.9 mostra as forças atuantes em um painel da parede e suas excentricidades, considerando uma articulação na base do painel.

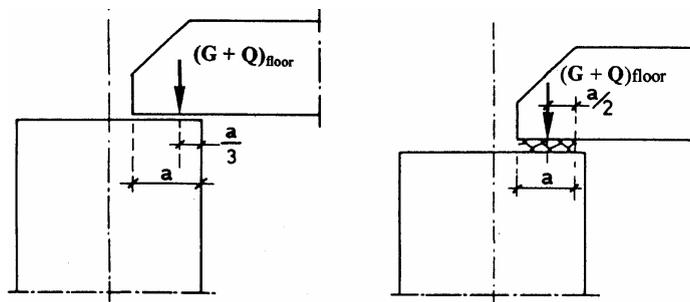


Figura 7.8 excentricidade da carga do piso sobre as paredes de apoio

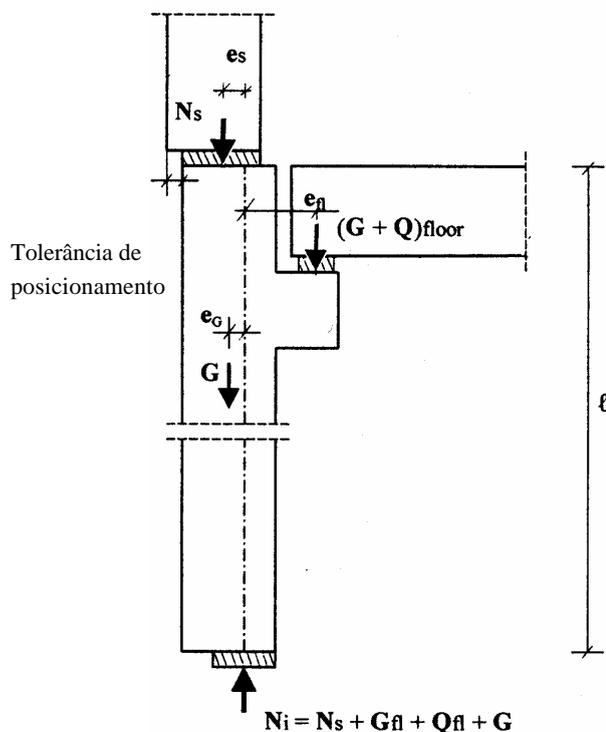


Figura 7.9 Excentricidades das forças atuantes em um painel de parede

Excentricidades devidas à imperfeições geométricas

Inclinação dos elementos

Os efeitos prejudiciais de possíveis variações na geometria da estrutura e a posição das cargas devem ser consideradas na análise dos elementos e da estrutura. O EUROCODE 2 [1], no item 5.2 (2), prescreve para elementos com compressão axial e estruturas com carga vertical, que as variações podem ser representadas por uma inclinação θ_i . Para tolerâncias normais de execução, o seguinte valor de projeto para a inclinação pode ser usado:

$$\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

onde

γ_0 é o valor básico (onde o valor recomendado é 1/200)

γ_h é o fator de redução para altura

$$a_h = 2/\sqrt{\ell} \quad 2/3 = a_h = 1$$

γ_m é o fator de redução do número de elementos

$$a_m = \sqrt{0.5(1+1/m)}$$

ℓ é a altura do painel

m é o número elementos contribuindo para o efeito total.

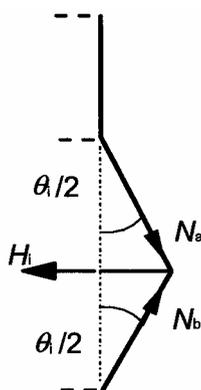


Figura 7.10 efeitos da inclinação dos painéis da parede

O efeito da inclinação γ_i (figura 7.10) pode ser representado pelas forças transversais para serem incluídas na análise conjunta com outras ações.

$$H_i = q_i(N_b + N_a)/2$$

Como alternativa simplificada, o efeito da possível inclinação dos painéis pode também ser estimado pela força horizontal igual a 1% da força vertical no andar considerado, com valor mínimo igual a 30 kN/m por painel (ver CEB-FIB Model Code 1978).

▪ **Excentricidades devidas à falhas de montagem**

As seguintes excentricidades são mencionadas no CEB FIB modelo de código 1978:

a) Deficiência no nivelamento

$$e_p = 2l/1000 \text{ to } 3l/1000$$

onde l é a altura do painel

h) deficiência no posicionamento

São indicados os seguintes valores:

$e_m = 5 \text{ mm}$ quando o painel subjacente é visível durante a montagem

$e_m = 10 \text{ mm}$ quando o painel subjacente não é visível

7.4.3 Estabilidade Estrutural

A) Geral

A estabilidade horizontal de uma estrutura com paredes pré-moldadas é garantida pela ação de contraventamento por cisalhamento entre as paredes, por ação em balanço das paredes e núcleos de contraventamento e pela ação de diafragma das lajes de pisos. As paredes de painéis pré-moldados são apropriadas para atuarem como paredes de enrigecimento. Contudo, elas só apresentam resistência no seu próprio plano, devendo ser complementadas com outras paredes perpendiculares aos seus planos ou com núcleos rígidos (figura 7.11).

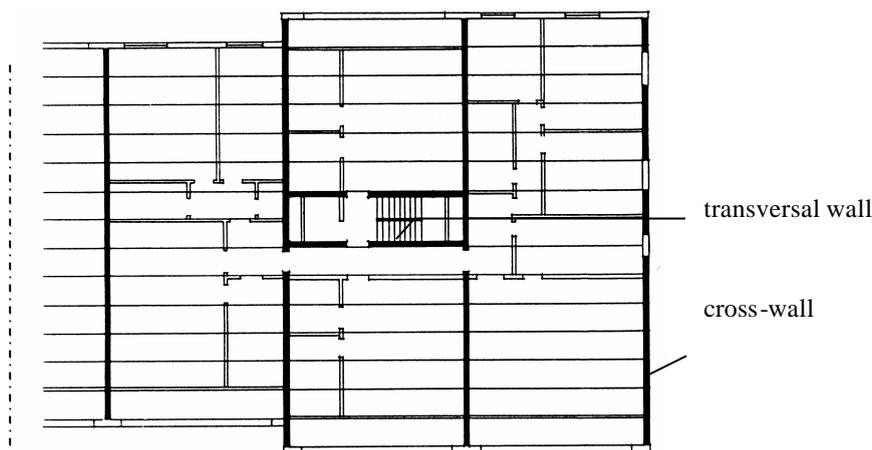


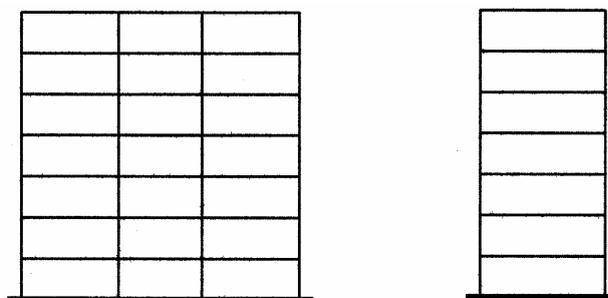
Figura 7.11 posição das paredes de contraventamento (paredes de enrigecimento)

A ação da força horizontal é distribuída em diferentes paredes e núcleos de forma proporcional à rigidez dos mesmos. Quando as paredes possuem aberturas maiores, como por exemplo as portas, deve ser verificado se a parte da parede acima da abertura pode contribuir para a resistência horizontal. Se isso não acontecer, apenas a parte da parede sem abertura deve ser considerada.

A ação composta das paredes adjacentes com formato em L, H, ou T é possível somente para condições onde as juntas verticais entre os painéis forem capazes de transferir as forças de cisalhamento requeridas no projeto.

B) Efeito de cisalhamento entre paredes

Quando vários painéis nos andares são sobrepostos, o efeito do cisalhamento nas juntas horizontais entre os painéis faz com que a parede global neste plano passe a funcionar como uma única parede composta, funcionando como uma haste de grande rigidez em balanço ou como uma parede de contraventamento. Quando a parede de contraventamento é formada por apenas uma prumada de painéis tem-se uma parede simples engastada na base (figura 7.12).



(a) Parede Composta em Balanço

(b) Balanço Simples

Figura 7.12 Estrutura de paredes compostas

As ligações entre os diferentes painéis devem ser capazes de transferir as forças de cisalhamento, de tração e de compressão.

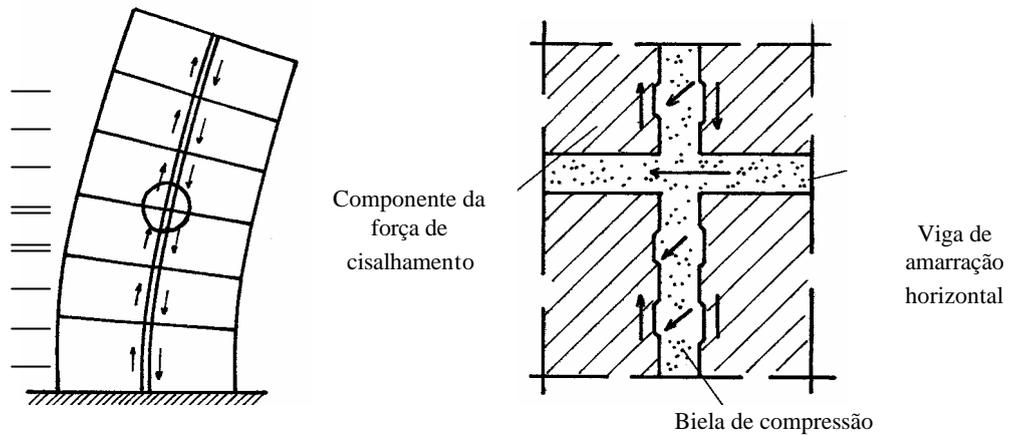


Figura 7.13 deformação de carga e forças de cisalhamento nas estruturas das paredes

A ação de diafragma dos pavimentos possui um papel muito importante na transferência e distribuição das forças horizontais entre os diferentes componentes de estabilização.

i) Resistência das juntas horizontais

As juntas horizontais entre os painéis pré-moldados em sistemas de paredes para edifícios com múltiplos pavimentos podem ser preenchidas com argamassa seca (*dry-pack*) logo após o posicionamento dos painéis. Uma solução alternativa é colocar os painéis sobre uma camada de argamassa, espalhada entre duas tiras de espuma.

Para a aplicação de lajes alveolares para sistemas de pisos, a solução mais eficiente é embutir as extremidades das lajes dentro das paredes. Os elementos de laje podem apresentar extremidades retas (Fig. 7.14 a) ou chanfradas (Fig. 7.14 b). A junta é geralmente preenchida em dois passos: primeiro o espaço entre as lajes; depois do endurecimento e posicionamento dos elementos da painéis superiores, a junta abaixo do painel. O preenchimento com graute nos núcleos centrais aumenta a largura colaborante da laje e proporciona um confinamento para uma coluna de graute.

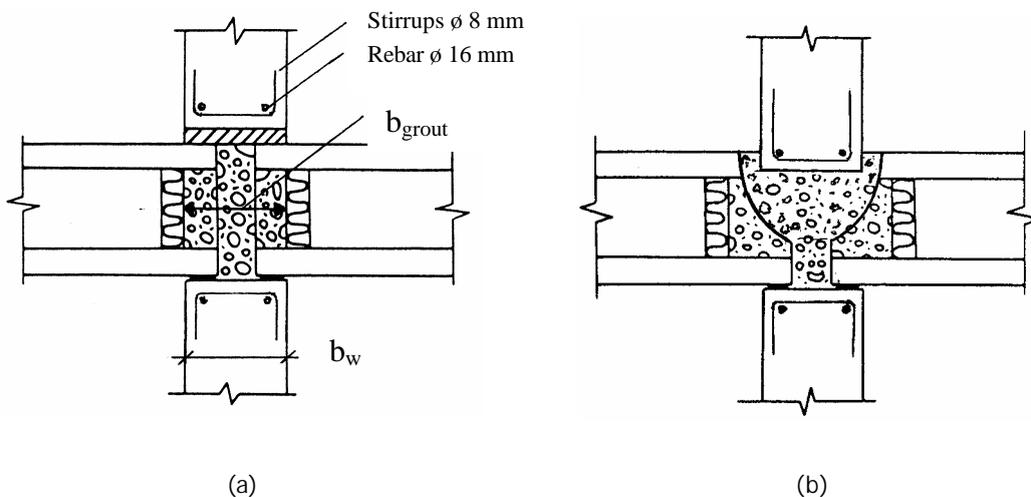


Figura 7.14 Exemplos de ligações entre painel e laje alveolar

Outra solução é preencher o espaço completo da junta de uma só vez com um graute líquido. Para conseguir um bom preenchimento na parte inferior da parede, a base do painel é posicionada um pouco abaixo da face superior da laje, como indicado na figura 7.14b. Assume-se que a junta acabada está confinada e por esta razão, pode-se levar em conta uma resistência maior para a capacidade da junta de concreto.

Nas construções das estruturas das paredes de um prédio com vários pavimentos onde se emprega lajes alveolares, as extremidades das lajes em conjunto com as juntas de concreto ou argamassa transferem as cargas dos elementos superiores de parede para os inferiores. Pesquisas experimentais recentes, realizadas no laboratório VTT na Finlândia [2], recomendam os seguintes procedimentos para serem utilizados para a estimativa da resistência de juntas para pisos com extremidades retas para transferência da carga vertical.

$$N_{Rd} = 0.5 f_{cd} b_j L_j$$

Onde

f_{cd} é a resistência de cálculo da parede de concreto ou argamassa, seja qual for a menor.

L_j é o comprimento da junta

$B_j = \min \{b_w, b_{argamassa}\}$, é a menor largura da junta na direção transversal (figura 7.14a)

A resistência das juntas para pisos com extremidades inclinadas (Fig. 7.14b) pode ser calculada a partir da expressão:

$$N_{Rd} = 0.6 f_{cd} b_w L_j$$

O uso dessas duas equações pressupõe que as partes superiores e inferiores dos elementos da parede são fornecidas com barra de aço horizontal de 16 mm em cada borda perto da junta e estribos de 8 mm espaçados no máximo de 200 mm.

Outro método mais detalhado para calcular as juntas horizontais entre as paredes portantes e pisos formados por lajes alveolares é apresentado no Manual para Projeto de Lajes Alveolares do PCI [3].

7.4.4 Integridade estrutural

A interação entre os elementos estruturais deve assegurar um projeto estável e robusto. Como já mencionado no Capítulo 3, não se pode superestimar a absoluta necessidade para se conceber uma conexão tridimensional entre os diferentes elementos. Para estabelecer essa integridade, deve ser fornecida uma capacidade de tração entre os elementos pré-moldados através das juntas.

As juntas (ou ligações) entre os painéis das paredes funcionam essencialmente por cisalhamento e por compressão. A capacidade de atrito das juntas deve ser suficiente para resistir as forças de cisalhamento. Todavia, em casos de ações excepcionais (acidentais), podem ocorrer tensões de tração importantes juntamente com grandes deformações. Para transferir essas forças corretamente, as juntas (juntas = ligações longitudinais) devem apresentar os três aspectos que chamamos de resistência, continuidade e ductilidade.

- A resistência é necessária para suportar as forças atuantes.
- A ancoragem e a continuidade da armadura nas ligações são necessárias para garantir a transferência e redistribuição das forças.
- A ductilidade é necessária não apenas para apoiar as grandes deformações, mas também para absorver a energia de possíveis ações ativas.

Consequentemente, devem ser feitas provisões no projeto para que haja integridade suficiente na construção em todas as direções por meio de um sistema de armaduras de tirantes (ver Capítulo 3).

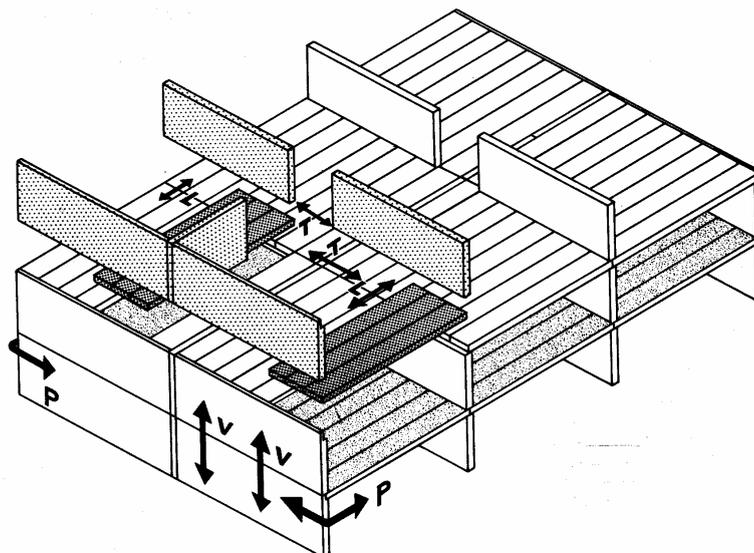


Figura 7.15 localização esquemática das armaduras de tirantes no sistema de paredes estruturais

As principais funções dos tirantes de amarração nas estruturas da parede são:

- Os tirantes periféricos de amarração em formato "P" devem contribuir para a ação de diafragma dos pisos, sendo considerados como armaduras de tração da viga baixa que compõe o sistema de piso.
- Os tirantes longitudinais de amarração em formato "L" devem estabelecer o equilíbrio para as forças horizontais atuando nas paredes interiores e exteriores, causadas por excentricidades de cargas, pelo efeito do vento, por cargas excepcionais (acidentais), etc. Esses tirantes devem também ancorar os pisos nos seus apoios.
- Os tirantes transversais de amarração em formato "T" devem, primeiramente, resistir o componente de tração horizontal das forças atuantes nas juntas verticais entre as paredes transversais (ou de contraventamento) (ver Fig.7.13). Em segundo lugar, os tirantes transversais devem promover a integridade transversal da construção e ajudar a criar a capacidade redistribuição para outras paredes no caso de danos locais em uma parede subjacente.
- Os tirantes verticais para amarração em formato "V" devem garantir a ação em balanço das paredes de cisalhamento e prover um segundo apoio de carga caso haja um dano local. As seguintes recomendações são feitas pela norma inglesa para concreto estrutural BS-8110 [4]: cada pilar e cada parede portante deve ser amarrada continuamente, das fundações até o nível da cobertura. O tirante de amarração deve resistir uma força de tração igual ao valor de cálculo para a combinação das ações permanentes e sobrecargas recebidas pelo pilar ou pela parede de qualquer um dos andares ou cobertura.

7.4.5 Colapso progressivo

Os sistemas de paredes portantes compostas por painéis pré-moldados são mais sensíveis a um desmoronamento progressivo, após a explosões ou outra ação acidental, do que as estruturas moldadas no local. A estrutura é normalmente projetada para suportar as ações decorrentes da utilização normal da edificação, mas deve haver uma probabilidade razoável de que a construção não irá desmoronar catastróficamente sob efeitos moderados do mau uso ou de um acidente. Nenhuma estrutura é esperada para resistir às ações que excedem em muito os valores de projeto, mas o dano ocorrido não deve se estender de forma desproporcional à sua causa original. Não é a intenção aqui de explicar um procedimento completo de projeto relacionado com ações acidentais, mas apenas fornecer alguns diretrizes e princípios práticos para projeto.

O procedimento de projeto normal para resistir às ações acidentais consiste em admitir o colapso de uma região localizada da estrutura, assegurando que as áreas adjacentes da estrutura que circundam o

local danificado proporcionem um caminho alternativo para as cargas, talvez em uma condição bastante deformada mas sem levar ao colapso global da estrutura.

Os seguintes mecanismos podem ser empregados para fornecer um caminho alternativo para as cargas:

- A) Ação de balanço das paredes adjacentes. A viga de amarração horizontal sobre o painel da parede D na figura 7.16 suportará as tensões de tração do balanço. Para esse efeito, a armadura de tirante deve ser devidamente conectada ao painel da parede, por exemplo por meio sobreposição destas armaduras com esperas deixadas no topo do painel.
- B) Suspensão dos elementos para a estrutura intacta acima da área danificada. Isso é possível aplicando tirantes verticais desde a fundação até o nível da cobertura em todos os pilares e paredes.
- C) Criando um efeito de "ponte" sobre a área danificada pela ação catenária das vigas de amarração. Para conseguir absorver essa função as vigas de amarração horizontais e periféricas devem apresentar resistência, deformação e ancoragem suficiente.
- D) Prevenir que os pisos danificados desmoronem e caiam sobre a estrutura (pisos B e C da figura 7.16). O colapso progressivo é geralmente o resultado do acúmulo de escombros de desmoronamentos sucessivos dos pisos superiores sobre os pisos inferiores. Os tirantes longitudinais ancorados nas extremidades dos apoios das lajes para a estrutura são melhor posicionados na altura média das lajes para permitir uma máxima eficiência e deformabilidade.

Pode ser necessária prover uma armadura adicional em certos locais para satisfazer esses requisitos, o que se for pensado ainda na concepção do projeto pode-se reduzir os custos extras. É necessário tomar cuidado para haja uma ancoragem adequada para os tirantes de amarração e também um comprimento suficiente de traspasse para fazer com que os tirantes sejam eficientemente contínuos.

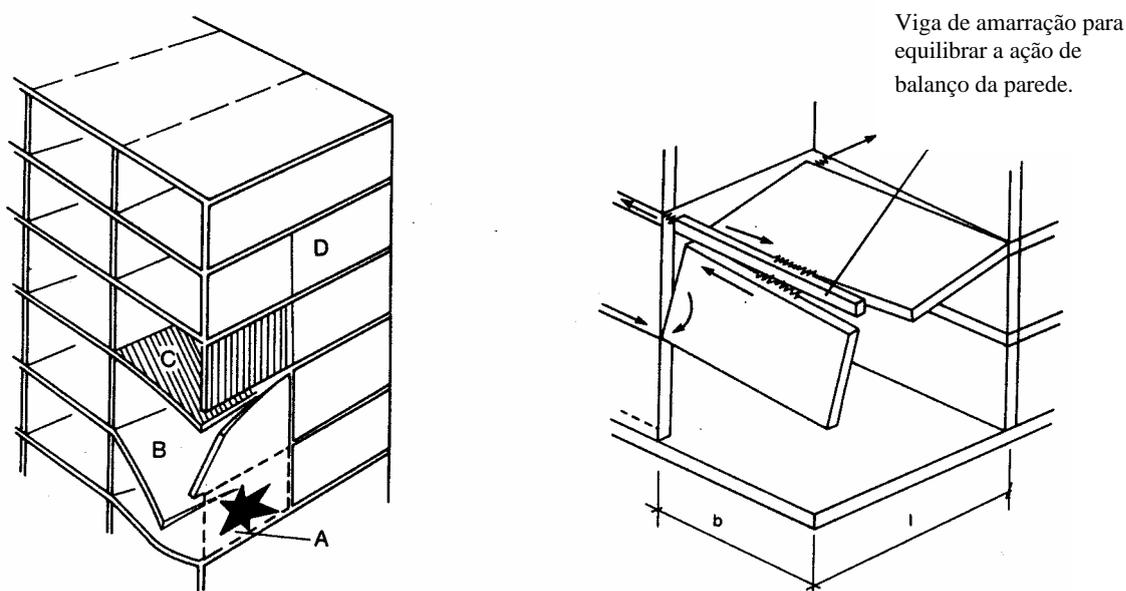


Figura 7.16 ilustração esquemática de apoio de carga secundário.

7.5 Elementos

A espessura de elementos de paredes maciças de concreto varia entre 80 a 240 mm, dependendo dos requisitos de resistência e de isolamento acústico. Os elementos de painéis possuem a mesma altura que os pavimentos, com no máximo 4.20 m, excepcionalmente com 4.50 m. Este valor é geralmente

determinado pelas condições de transporte. O comprimento dos painéis varia em torno de 2.40 a 14.00m.

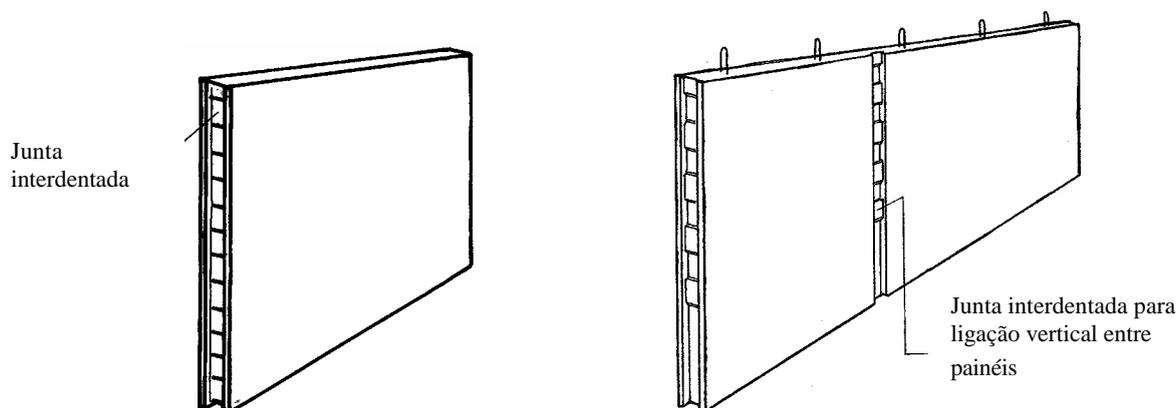


Figura 7.17 Elementos de painéis pré-moldados para paredes

As paredes pré-moldadas são fabricadas sobre bancadas longas ou em baterias de formas. Dutos técnicos e conduites para eletricidade são incorporados antes da moldagem. As dimensões das aberturas de portas e janelas são geralmente livres, apesar de alguns fabricantes preferirem tamanhos padronizados. Por razões de estabilidade durante a desmoldagem e manuseio, são necessárias dimensões mínimas dos vergas e montantes entre as janelas e nas bordas dos painéis. A figura 7.18 apresenta um exemplo com as dimensões recomendadas.

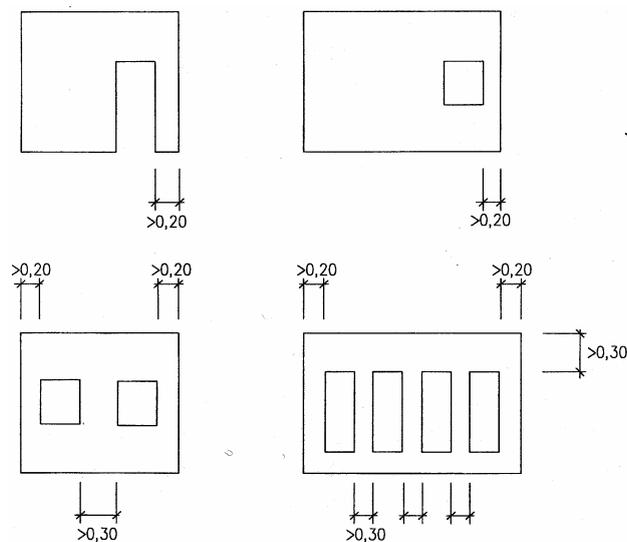


Figura 7.18 dimensões mínimas para vergas e montantes

Existe um sistema de parede feito de placas pré-moldadas conectadas entre si durante a moldagem (figura 7.19). As placas de concreto são de no mínimo 40 mm de espessura. A parede consiste de duas placas paralelas, afastadas entre si de 70 a 100 mm, com as faces lisas voltadas para fora e com parte de treliças formadas por barras soldadas projetando-se das superfícies rugosas voltadas para o espaço deixado entre os dois painéis.

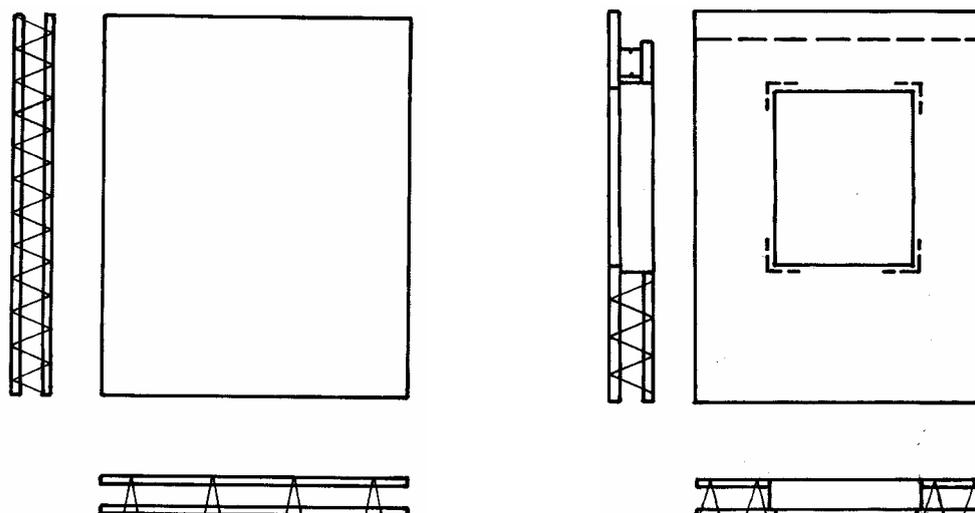


Figura 7.19 Elementos compostos de parede

Após o levantamento e posicionamento dos painéis, o espaço vazio entre os mesmos é preenchido com concreto no local para realizar as conexões com os pisos e paredes superpostas. O concreto de preenchimento aumenta também a capacidade portante e as propriedades de isolamento da parede. Para garantir a aderência e a posição das duas placas pré-moldadas, treliças de barras soldadas são concretadas dentro dos painéis na fábrica, com um espaçamento de cerca de 0.6 m. Os vazios entre as paredes podem ainda ser armados para absorverem as forças de estabilização ou grandes carregamentos verticais.

7.6 Ligações

As ligações entre as paredes e pisos pré-moldados estão entre os itens mais estudados nas construções pré-moldadas. O objetivo principal dessas pesquisas foi checar o comportamento estrutural de todos os tipos de ligações com diferentes configurações para juntas, armaduras, concreto de preenchimento, etc. Tais informações são de grande importância no projeto das ligações em paredes e existe uma extensa literatura sobre este assunto.

As ligações de parede são classificadas considerando a localização, a direção e a função, por exemplo: interior ou periférica, horizontal ou vertical, e parede para parede ou parede para piso.

7.6.1 Ligações parede-parede (parede para parede)

As ligações nas juntas verticais entre os elementos de parede são normalmente projetadas para transmitir as forças de cisalhamento. As superfícies da junta vertical são geralmente planejadas para aumentar a capacidade de cisalhamento. O componente horizontal da biela inclinada de compressão no concreto (do modelo biela e tirante para concreto armado) é equilibrada por uma armadura de tirante ou por ligações soldadas. É aconselhável concentrar a armadura de tirante na junta horizontal entre os elementos de parede (Fig.7.20). A solução alternativa para empregar armaduras em laços sobrepostos dentro da junta vertical (fig. 7.21 a) é um pouco mais complicada e não extremamente necessária.

Os elementos de painéis podem ser conectados para formar uma parede composta em formatos T, U ou I. A rigidez de perfis compostos é consideravelmente maior que as dos elementos isolados, mas para compor estes perfis necessita-se de uma grande capacidade de cisalhamento nas juntas verticais. Quando a rigidez fora do plano dos elementos é insuficiente, devem ser usados armaduras com ganchos sobrepostos nas juntas verticais.

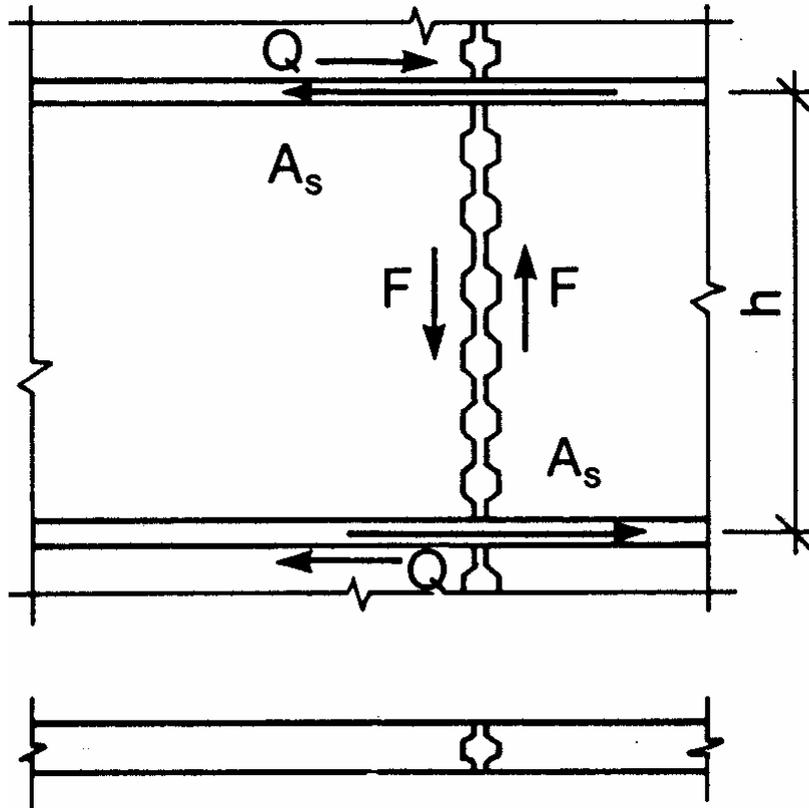


Figura 7.20 Ligações nas juntas de cisalhamento vertical entre elementos de parede

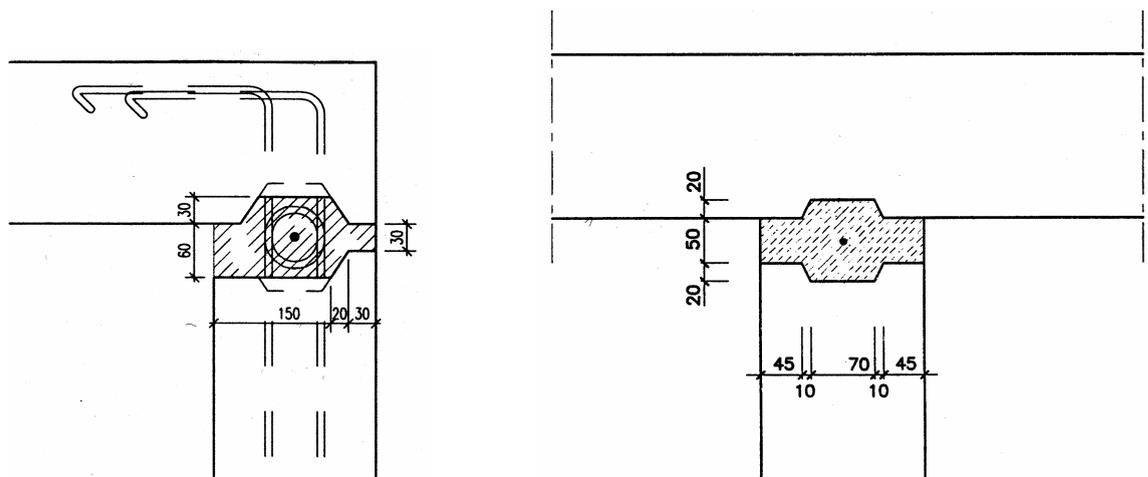


Figura 7.21 tipologias de ligações com chaves de cisalhamento

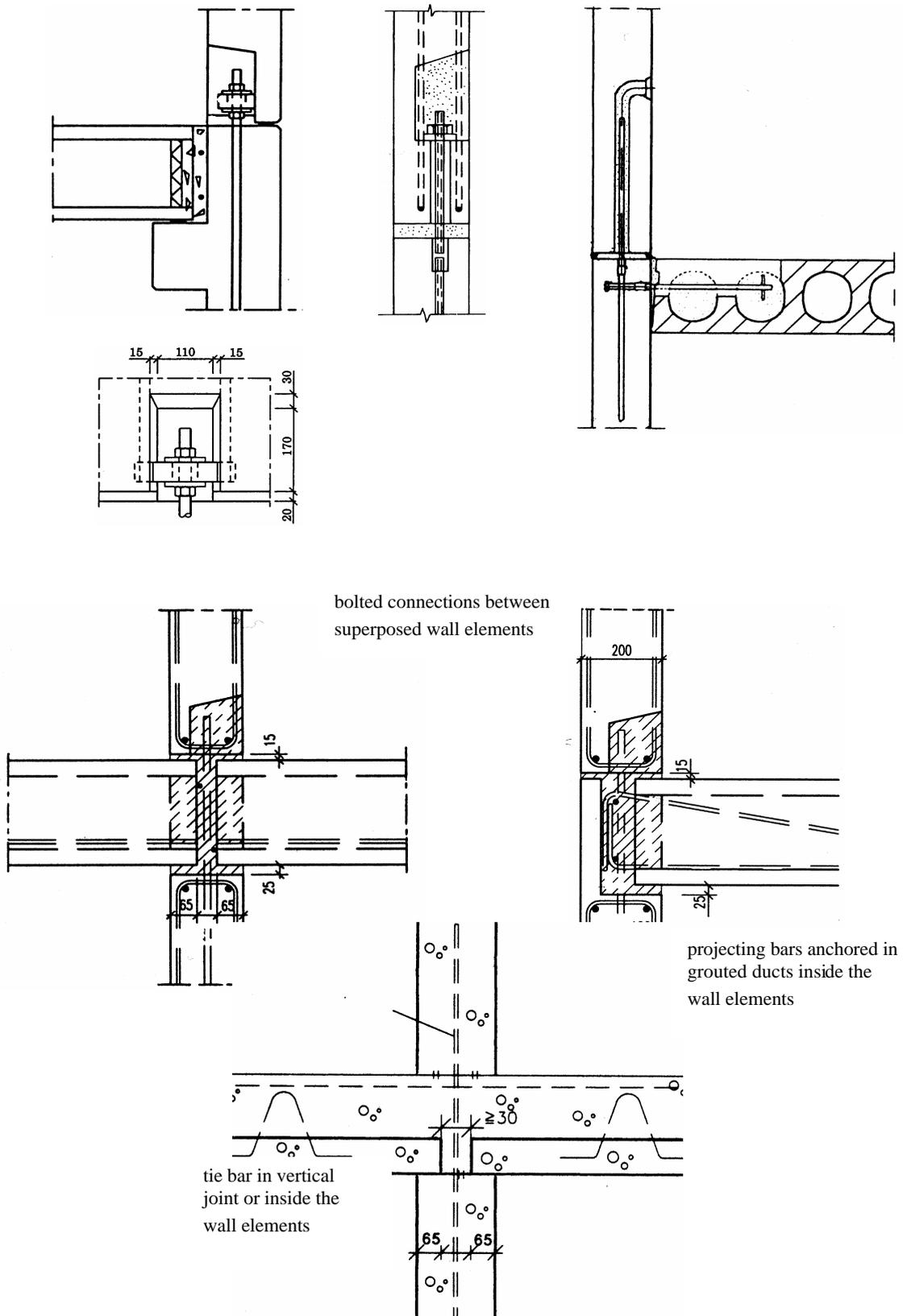


Figura 7.22 tipos de ligações entre painéis verticais

Capítulo 8: Painéis de Fachada em Concreto Arquitetônico

8.1. Geral

O termo “Concreto Arquitetônico” se refere aos elementos pré-moldados, os quais são planejados para contribuir com o efeito arquitetônico da construção através do projeto, acabamento, forma, cor, textura e qualidade de execução. Concreto arquitetônico é um material de construção com alta qualidade, o qual oferece uma gama de acabamentos de excelente qualidade como pedra calcária ou granito, detalhamentos complexos com apliques de alvenaria ou pedra aparente (pedra reconstruída ou imitação de pedra), cujas características seriam extremamente caras se fossem conseguidas dentro de uma construção que se utiliza de métodos convencionais. O concreto arquitetônico pode ser aplicado em fachadas para todos os tipos de edifícios: apartamentos; escritórios; comerciais; educacionais e culturais.

8.2. Sistemas Pré-Moldados para Fachadas

Dependendo das suas funções dentro da edificação, os sistemas de fechamento para fachadas podem ser projetados como sistemas portantes ou sistemas não-portantes, podendo ser compostos por painéis maciços (com uma camada) ou painéis tipo sanduíche (com duas camadas). Os sistemas estruturais mais comuns são descritos a diante.

8.2.1. Sistemas de Painéis Portantes para Fachadas

Os sistemas de painéis portantes para fachadas suportam as cargas verticais dos pavimentos e da estrutura superiores. Estes sistemas também podem contribuir para a estabilidade horizontal do edifício. O exemplo clássico para aplicação desses sistemas é o que se de painéis sanduíches, os quais empregam duas camadas de concreto com uma camada intermediária com isolamento térmico. Na figura 8.1 é ilustrado como é alcançada a função portante do painel. A figura apresenta elementos estruturais de fachada servindo de apoio para a carga vertical integral dos pavimentos e dos painéis superiores, o que podem ser executados com painéis sanduíches ou com sistema de fachada com dupla camada (ver item 8.2.3).

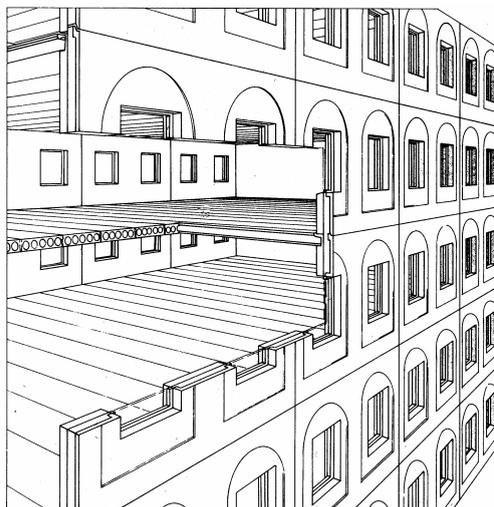


Figura. 8.1 – Painéis portantes do tipo sanduíche

Como mencionado anteriormente, os sistemas de fachadas acima podem, em princípio, desempenhar uma função de estabilização horizontal, como qualquer outra parede de cisalhamento (de contraventamento) em concreto pré-moldado. Nestes casos, podem ser necessários ligações de cisalhamento entre os elementos de painéis.

A fachada também pode ser composta por um painel portante tipo “spandrel”, como ilustrado na Figura 8.2. Neste caso, os painéis tipo “spandrel” atuam como vigas, transferindo as cargas verticais para os pilares,

podendo ser executados como elementos sanduíche, com o fechamento externo em concreto arquitetônico. Uma outra possibilidade é empregar concreto pré-moldado apenas na camada interna da viga "spandrel" e adicionar na obra qualquer outro material de acabamento na camada externa.

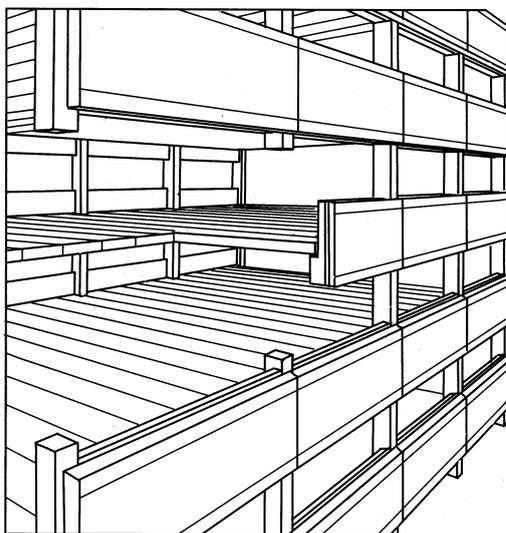


Figura 8.2. Painéis portantes do tipo "spandrel"

8.2.2. Painéis Não-Portantes para Fachadas

Painéis não-portantes para fachadas desempenham apenas a função de fechamento. Neste caso, os elementos painéis podem ser fixados individualmente na estrutura ou os mesmos podem ser auto-portantes. No primeiro caso, os pilares e vigas de extremidade suportam o peso próprio dos painéis da fachada. No segundo caso, os painéis de fachada se apoiam uns sobre os outros, formando uma parede em cortina, que geralmente é apoiada em uma viga baldrame externo ao eixo da estrutura de esqueleto, sendo que as ligações entre os painéis e a estrutura neste caso possuem apenas a função de travar horizontalmente a parede da fachada. A princípio, não existe nenhuma restrição de projeto para a forma dos elementos de fachada. Painéis não portantes do tipo sanduíche (com duas camadas de concreto) são geralmente empregados em conjunto com estruturas de esqueleto ou como paredes laterais para fachadas estruturais, enquanto os painéis maciços (com apenas uma camada de concreto) são mais empregados para revestimentos de pilares e para painéis tipo "spandrel".

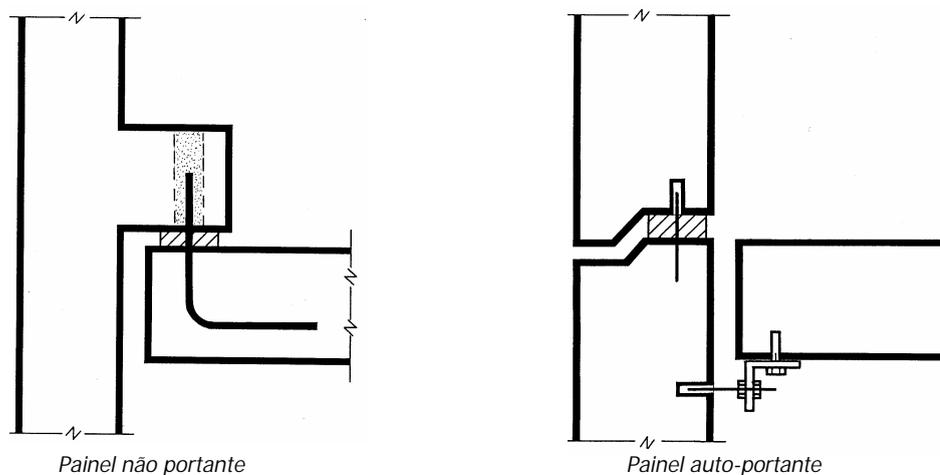


Figura 8.3 – Princípio de fachadas auto-portante e não portante

8.2.3 Elementos com “Pele Dupla” para Fachadas

Este sistema de painéis refere-se às fachadas tipo “sanduíche” nas quais as duas camadas de concreto, isto é a camada interna e a camada externa, são produzidas e posicionadas de forma separada. A camada portante da fachada consiste de painéis estruturais simples com o lado liso acabamento voltado para a parte interna da construção, onde os elementos pré-moldados de piso são apoiados sobre esses elementos. No passo seguinte, aplicam-se as juntas selantes entre os painéis e a camada intermediária de isolamento térmico é anexada na face externa dos painéis estruturais. Finalmente, a camada externa da fachada é posicionada, podendo ser produzida com concreto pré-moldado ou por um outro material para fechamento (como por exemplo em GFRC).

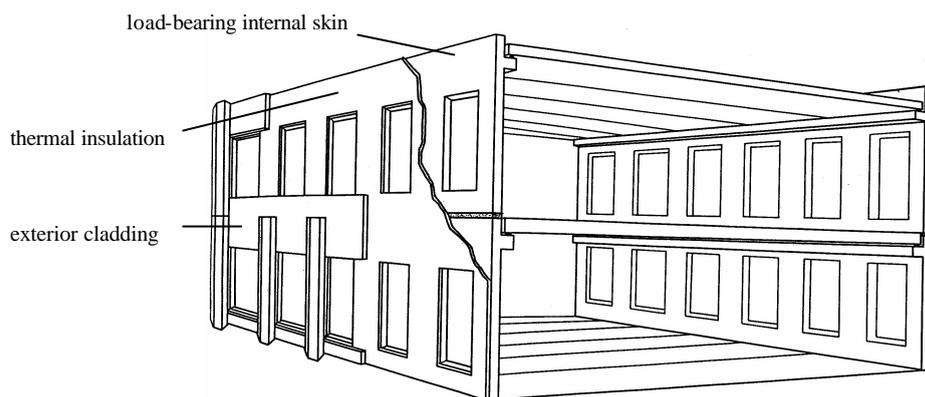


Figura 8.4 – Princípio de sistemas com “pele dupla” para fachadas

Esta solução apresenta várias vantagens em relação aos demais tipos de painéis sanduíche:

- Grande flexibilidade no projeto da fachada. Completa liberdade com relação ao tamanho, à forma e aos materiais empregados;
- Possibilidade de utilização de outros materiais para o fechamento externo;
- Os elementos pré-moldados são simples. Os painéis internos são retangulares, com altura dos pavimentos e com grande repetição na produção. O fechamento externo é normalmente constituído por painéis planos. As ligações também são bastante simples.
- O isolamento térmico é contínuo sobre toda a fachada, sem a presença de pontes térmicas, inclusive nas juntas entre os painéis.
- A fachada contém uma cavidade ventilada entre o fechamento externo e o isolamento térmico.
- A aparência externa da fachada pode ser totalmente diferente de um edifício para o outro, sem haver diferenças na estrutura e nos elementos internos.
- A configuração das juntas na fachada é discreta (ou a estampa, ou paginação, dos painéis na fachada é discreta).

A desvantagem desta solução construtiva é a necessidade de um número maior de elementos pré-moldados, o que significa um aumento do manuseio, da capacidade de estocagem, de transporte, das ligações, etc. Todavia, estes fatores podem ser compensados pelo fato de se ter uma produção mais simples dos elementos individuais.

8.2.4 Elementos Especiais

O concreto arquitetônico também pode ser utilizado para propósitos decorativos no interior dos edifícios. De fato, todos os elementos pré-moldados podem ser produzidos em concreto arquitetônico quando isto for necessário. Existem inúmeros exemplos de construções com tais detalhamentos, como por exemplo, com elementos de sacadas, parapeitos, cornijas, colunas especiais em grandes saguões de entrada,

elementos de piso com superfície decorativa na face inferior, forros suspensos decorativos, paredes internas, núcleos centrais, escadas polidas etc.

8.3. Estabilidade Estrutural

As fachadas arquitetônicas são usualmente projetadas como painéis apenas para fechamento vertical, sem a contribuição dos mesmos para a estabilidade estrutural do edifício, o qual é conseguido pela ação dos núcleos de centrais de contraventamento e/ou pela ação de paredes de cisalhamento (contraventamento). Todavia, quando se emprega uma fachada tipo “pele dupla”, a camada interna da fachada pode ser projetada para resistir no seu plano as forças do vento, ações sísmicas ou outras ações.

8.3.1 Estabilidade fornecida por núcleos centrais e paredes de contraventamento

Os painéis portantes para fachadas suportam apenas as cargas dos pisos e dos painéis superiores. As forças horizontais atuantes nas fachadas são transferidas pelos elementos enrijecedores (como núcleos, paredes de contraventamento) por meio da ação de diafragma do pavimento. As ligações entre os elementos de fachada e os pisos são projetadas como sendo rotuladas na direção perpendicular ao seu plano.

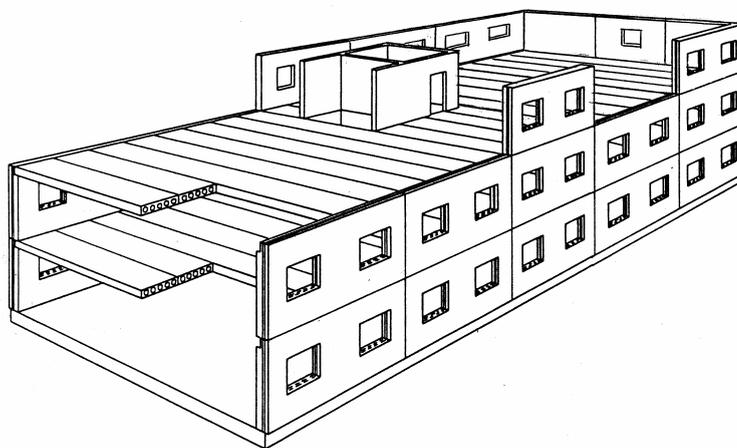


Figura 8.5 – Princípio de estabilidade horizontal para edifícios com núcleos de contraventamento

8.3.2 Estabilidade fornecida pela fachada

Quando a fachada é composta por painéis portantes com suficiente rigidez no seu plano, esses painéis podem garantir a estabilidade horizontal do edifício. Os pisos pré-moldados funcionam como diafragmas entre as paredes frontais e as paredes laterais, assegurando a amarração do sistema. As juntas verticais entre os painéis de concreto devem ser capazes de transferir as forças de cisalhamento. Isto pode ser conseguido através de preenchimento com graute ou por meio de ligações soldadas.

8.4. Outros aspectos de projeto

8.4.1 Movimentação Diferencial

Deformações devidas às diferenças de temperatura entre as partes da construção devem ser estudadas cuidadosamente. Tais diferenças de temperatura podem aparecer, por exemplo, entre as partes da estrutura situadas dentro do edifício, as quais estão à uma temperatura quase que constante, e as partes da estrutura na fachada e na cobertura, as quais estão expostas às condições climáticas. Estes movimentos irão variar grandemente de acordo com o tipo de estrutura, com o tamanho de painel e com o tipo de clima. Para evitar empenamento (encurvamento) dos painéis maiores e concentrações de tensões, as ligações dos elementos de fachada devem ser projetadas de tal modo que fosse possível ocorrer os movimentos térmicos entre os elementos de fachada e a estrutura. Para combater os efeitos causados por tais movimentos, a fixação deve manter o painel em sua posição e não ser afetada estruturalmente. Arruelas sintéticas,

espaçadores e furações maiores são os meios normais para combater estes movimentos. Para painéis sanduíches, as ligações entre as duas camadas de concreto devem permitir a movimentação diferencial entre os planos dessas camadas (ver 8.7).

A variação de temperatura que deve ser considerada irá depender da cor da camada externa do painel e da orientação dos elementos. A temperatura das superfícies externas pode variar de - 20 °C no inverno (no caso da Europa) até + 60 °C no verão para acabamentos escuros, enquanto a temperatura interna de ocupação em edifícios pode variar de + 5 °C no inverno até + 30 °C no verão. Para climas moderados devem ser consideradas no cálculo dos movimentos (deslocamentos) diferenciais as seguintes diferenças de temperaturas.

- 60 °C entre a máxima temperatura média de verão e a mínima temperatura de inverno para os elementos na fachada e na cobertura, levando em consideração que o levantamento (içamento) e a montagem não serão realizados durante temperaturas externas abaixo de 0°C
- 40 °C para a máxima diferença entre as camadas internas e externas dos painéis sanduíche.

8.4.2 Aparências das Juntas

As juntas são inerentes às estruturas pré-moldadas. Assim como em fechamentos com pedra natural, as juntas devem ficar aparentes devem ficar aparentes como parte lógica do próprio projeto das fachadas arquitetônicas. Muitas soluções alternativas estão disponíveis para que se possa obter um bom efeito estético na fachada, assim como juntas falsas, com os frisos das juntas mais ou menos pronunciados.

Uma outra proposta consiste em ocultar as juntas nas fachadas. Existem várias possibilidades para isto. As juntas são menos evidentes quando formam um canto ou quando elas estão situadas em uma linha divisória entre dois materiais. Uma outra técnica bastante empregada consiste de juntas contínuas sem interrupção por meio de sobreposição entre os elementos nas juntas ou por meio da utilização de apliques decorativos sobre as juntas, etc.

Existem muitos exemplos bem sucedidos de juntas sendo incorporadas suavemente. Isto requer um estudo completo durante a etapa do projeto dos elementos, o que foi negligenciado no passado. Geralmente, faz-se apenas o cálculo para as dimensões mínimas para garantir a estanqueidade, sem a preocupação com o aspecto visual, o qual é aceito como sendo inevitável em fachadas pré-fabricadas.

8.5 Formas e Dimensões dos Elementos

8.5.1. Formas em relação aos moldes (fôrmas)

Uma propriedade importante do concreto é a sua capacidade de ser moldado em qualquer forma, possibilitando uma grande variabilidade arquitetônica. As formas dos elementos de concreto não estão limitadas às superfícies planas, mas também podem assumir superfícies arredondadas. Os contornos dos painéis podem apresentar formas simples e elegantes para um edifício moderno ou mesmo contornos clássicos para compor fachadas tradicionais com pedra natural. As fôrmas para a pré-moldagem podem ser feitas de materiais plásticos ou mesmo uma forma de borracha sintética moldada a partir de um protótipo em escala real.

8.5.2. Dimensões Preferenciais

As dimensões preferenciais dos painéis de fachada são a altura do painel como sendo igual à altura do pavimento e a largura como sendo um múltiplo da modulação básica (por exemplo 300 m). A largura do painel também é influenciada pela grade estrutural do edifício. Todas as dimensões dos painéis portantes e não portantes são governadas pela possibilidade de manuseio e transporte. Como regra geral, o peso dos elementos não deve ultrapassar a 10 toneladas. Isto corresponde a uma capacidade normal de içamento na maior parte das fábricas. Todavia, deve-se também considerar a movimentação dos elementos para posicionamento na obra, a qual é determinado pelo local e pela capacidade do guindaste. Por exemplo, para guindastes posicionados em um local central da construção, os elementos nos cantos da fachada estão geralmente na maior distância e o peso pode ser limitado pela capacidade de içamento do guindaste.

Como regra geral para o transporte, uma das duas dimensões principais dos elementos não deve exceder a 3.60 m.

A espessura do painel é influenciada pelo projeto estrutural, pelos requisitos de recobrimento mínimo de concreto para a armadura e pela necessidade de uma segurança adequada contra fissuração no momento da desforma (ou desmoldagem). Para assegurar uma boa compactação e para garantir um posicionamento adequado da armadura, com espaçamento adequado para o seu cobrimento, no caso particular para resistência ao fogo e durabilidade, a espessura dos elementos estruturais deve estar entre $h/10$ e $h/15$, onde h é a altura total do elemento. Também no caso de painéis maciços de concreto, deve-se respeitar uma espessura mínima de modo a evitar a fissuração e deformações durante a fabricação (ver Capítulo 7).

8.5.3. Modulação

Como já foi explicada no Capítulo 1, a modulação é um fator importante no projeto e na construção dos edifícios. No caso dos elementos de fachada, este ponto de vista já é mais moderado. Modulação é certamente desejável mas não deve se constituir em um obstáculo para a concepção arquitetônica da edificação. Modulação no contexto da produção industrial não é imperativa, mas pode ter uma influência nos custos dos elementos.

Os eixos modulares devem preferencialmente ser mantidos do lado de dentro das fachadas. Na Figura 8.6 são apresentados exemplos de soluções para cantos de fachadas: painel com canto integrado (a), elemento de canto separado (b) e (c), ou interseção de painéis em diagonais (d). Esta última solução é menos utilizada por causa da fragilidade das bordas dos painéis e pela dificuldade de obter uma junta reta e regular.

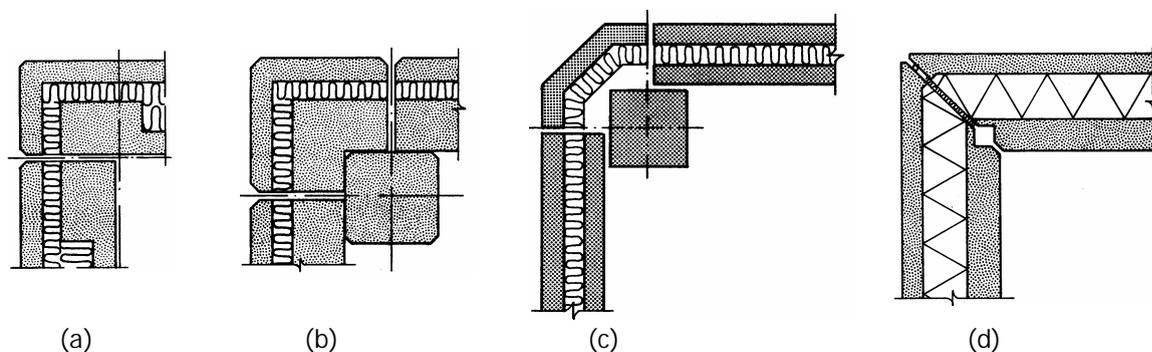


Fig. 8.6 Soluções possíveis para cantos de fachadas

8.6 Acabamentos para Superfícies

O concreto não precisa ser sempre cinza e rugoso. A indústria de pré-fabricados tem desenvolvido várias misturas para concretos, bem como diferentes técnicas para moldagem e acabamento para superfícies, as quais possibilitam fornecer um aspecto altamente refinado aos elementos de concreto. O material é denominado de concreto arquitetônico para indicar que tanto o material quanto a forma da produção e da aplicação contribuem de modo substancial para a função arquitetônica e estética do projeto.

8.6.1 Textura

As superfícies de concreto podem ser produzidas com uma grande variação de texturas, dentro de uma faixa com uma superfície lisa para muito áspera. Existem várias técnicas, dependendo do grau desejado de fineza e da aparência externa da superfície.

Estampa por jato de água forte ou entalhe é empregado para se obter a textura de pedra natural. A textura de concreto é completamente plana, mas não é brilhante. A granulação grossa do concreto não é visível. A utilização de ácido, incorporado ao jato de água, não é um processo muito amigável do meio ambiente. Em alguns países Europeus, existem restrições impostas com relação ao acordo do meio ambiente.

A utilização de jato de água para lavagem da superfície com retardador e a aplicação de jato de areia para desgastar a superfície por abrasão são técnicas utilizadas para se conseguir superfícies com agregados expostos. Essas técnicas possibilitam uma superfície lisa e os agregados finos do concreto são

visíveis. No primeiro caso, com uso de retardador, os agregados permanecem lisos, enquanto no caso da aplicação de jato de areia os agregados se tornam um pouco foscos (opacos). O acabamento da superfície pode portanto variar desde fracamente até completamente opaco. O jateamento com areia é utilizado geralmente para acabamento com pedra reconstruída em painéis arquitetônicos para fachadas.

Acabamentos com agregados bastante expostos apresentam a estrutura característica do concreto. Esta aparência é obtida por meio de lavagem da superfície com jato de água. Quando a superfície do agregado exposto fica para o lado de cima da forma, o jateamento é aplicado antes do endurecimento do concreto. Quando a superfície com agregado exposto estão em contato com a forma, emprega-se um retardador (o qual é geralmente aplicado por meio de rolo no fundo da forma, como se fosse uma pintura) e, após a desmoldagem, o concreto é lavado. Obviamente, a textura depende do tamanho e do tipo de agregado empregado, com muitas variações possíveis entre agregados com formas arredondadas e trituradas (britadas).

O desgaste e o polimento molhados são correntemente utilizados para um acabamento excelente para o concreto arquitetônico. Este tipo de material tem se tornado um sério concorrente para a pedra natural polida e oferece muitas vantagens sobre este último, não apenas em relação ao custo inferior, mas também quando se requer um projeto especial. As superfícies desgastadas por abrasão são divididas em três categorias: opacas; polidas e brilhantes. O processo de polimento é realizado com modernos equipamentos automáticos ou semi-automáticos.

8.6.2. Cor

A variedade de cores naturais, as quais podem ser utilizadas no concreto arquitetônico são virtualmente as mesmas que são utilizadas para a pedra natural. No caso de texturas finas, a cor é principalmente influenciada pelos agregados finos, enquanto para estruturas granulares mais opacas, o leque de cores dos agregados opacos irá assumir uma importância maior.

Também é possível adicionar pigmentos coloridos ao concreto para criar efeitos especiais. Pigmentos inorgânicos são mais estáveis do que os pigmentos orgânicos. Uma série de cores de pigmentos está disponível no mercado. A intensidade da cor na superfície do concreto pode ser influenciada pelas condições de moldagem e de endurecimento: a umidade do concreto, vibração etc. Como consequência, podem aparecer pequenas variações nas cores, especialmente quando se utilizam tons mais escuros.

8.6.3. Painéis Revestidos

Painéis pré-moldados para fachada também podem ser revestidos com outros materiais, assim como pedra natural, tijolos e revestimentos cerâmicos, etc. Estes materiais são colocados no fundo da forma e moldados juntamente com o elemento.

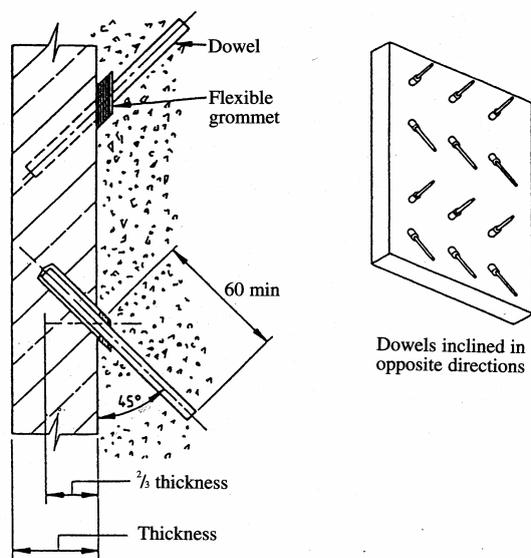


Figura 8.7 - Exemplo de fixadores e layout de painel com aplicação de granito

Para dimensões pequenas (isto é, para dimensões máximas de 300 x 300 mm), como no caso de revestimentos cerâmicos, a aderência com o concreto é suficiente para assegurar que os materiais estão fixados de uma maneira durável. Para tamanhos maiores, usualmente no caso da pedra natural, é necessário empregar fixadores especiais. A pedra é fixada por meio de um conector de aço inoxidável e uma proteção não aderente é utilizada para permitir a expansão diferencial entre os dois materiais. A pedra natural sempre possui um coeficiente de expansão diferente ao do concreto. Além disso, a temperatura da pedra será maior que a temperatura do concreto devido ao fato de constituir a pele externa da fachada.

8.6 Isolamento Térmico

Existem várias soluções para o isolamento térmico de fachadas pré-moldadas em concreto arquitetônico. A primeira solução é fornecida pelo painel tipo “sanduíche”, conforme indicado na Figura 8.8, onde o isolamento é incorporado dentro do painel de concreto. A forma dos elementos é relativamente plana. A espessura é geralmente entre 70 e 90 mm para a camada externa e de 120 a 160 mm para a camada interna, dependendo se for painel portante ou não portante.

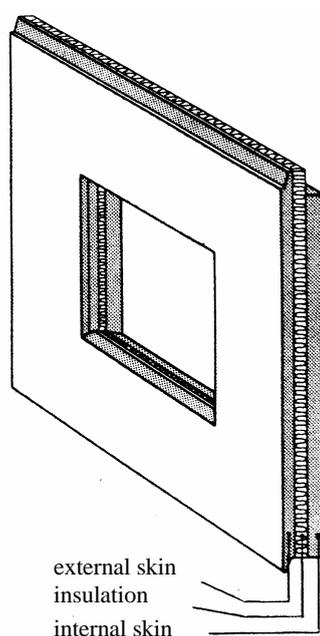


Figura 8.8 – Princípio de painel sanduíche para fachada em concreto arquitetônico

Também é possível incorporar uma *cavidade* (ver outra terminologia melhor) de ventilação entre a camada externa e a camada de isolamento térmico. O papel principal desta cavidade é evitar a penetração de água de chuva dentro do isolamento e da superfície interna. A água que penetra é evaporada dentro da cavidade de ventilação ou é eliminada na junta horizontal.

A camada externa deve ser fixada na camada interna de tal modo que a camada externa seja livre para se expandir e contrair. Com exceção dos requisitos mecânicos, as ligações entre as duas camadas de concreto devem satisfazer um número de critérios relativos à ductilidade e à durabilidade. Existem duas soluções básicas: sistemas de conectores especiais e armaduras diagonais entre as camadas.

Os sistemas de conectores especiais são usualmente compostos por conectores de apoio, conectores de torção e espaçadores. Os conectores de apoio (ver Fig. 8.10.a e 8.10.b) suportam o peso da camada externa de concreto e a ação do vento. Os conectores de torção são necessários quando os conectores não possuem rigidez suficiente na direção transversal (tipo a). O papel dos espaçadores (tipo c) é resistir às ações horizontais e manter a distância correta entre as duas camadas de concreto, sem impor restrições aos movimentos laterais.

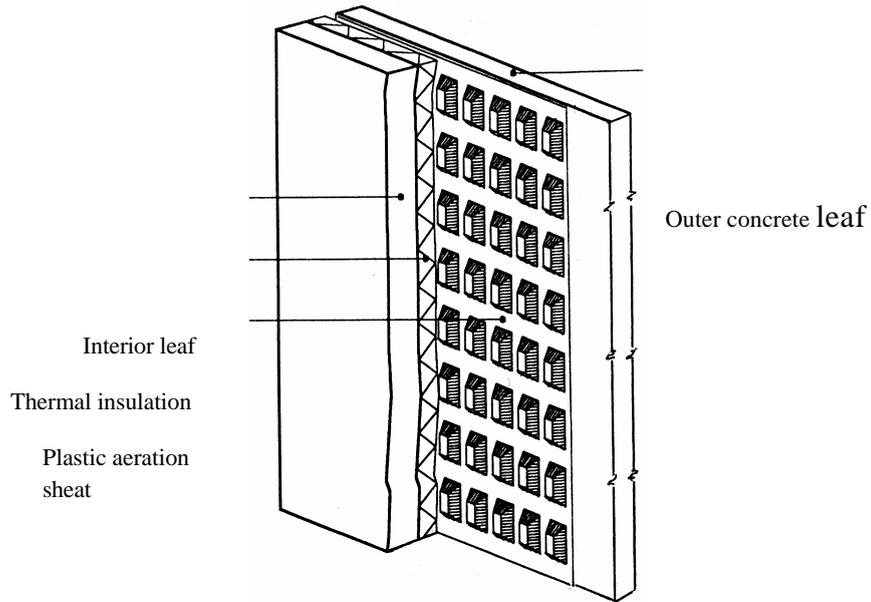


Figura 8.9 - Painel sanduiche com cavidade aerado

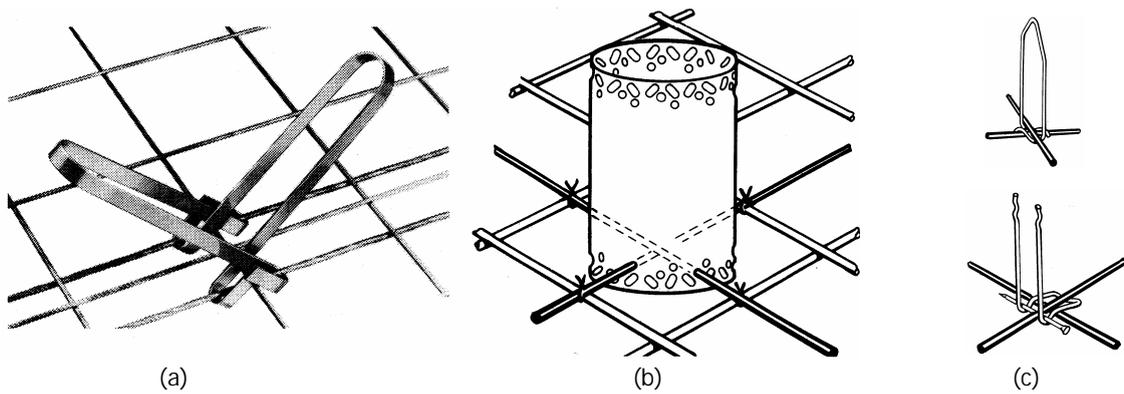


Figura 8.10 - Conectores típicos para painéis sanduiche

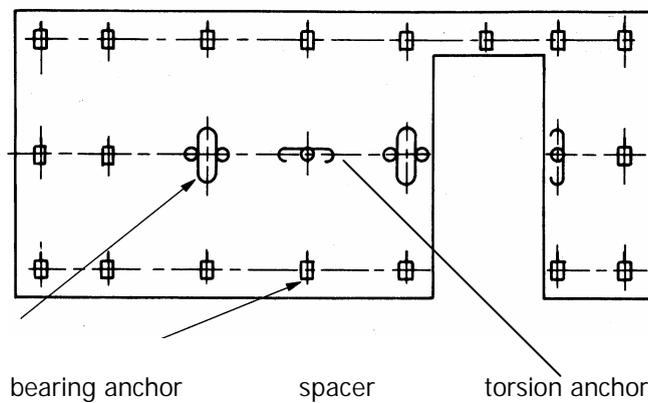


Figura 8.11 – Posição dos diferentes tipos de conectores em painéis sanduiche

A aplicação de conectores especiais é normalmente empregada para painéis sanduíche com pouca distância entre as camadas de concreto (até 100 mm). Diretrizes para projeto e aplicação de painéis sanduíche podem ser encontrados em catálogos de fabricantes.

- a) A armadura diagonal entre duas camadas de concreto é principalmente utilizada em painéis sanduíche com camadas espessas de isolamento (150 mm). As armaduras de estribos diagonais em aço inoxidável são colocadas na posição vertical em intervalos retangulares de 600 mm até 1200 mm, dependendo do peso da camada de concreto suspensa e da capacidade das armaduras diagonais, as quais são utilizadas em diferentes diâmetros e comprimentos (ver Fig.8.12). Barras complementares são posicionadas no perímetro do painel sanduíche, para fortalecer a ligação entre as duas camadas, garantindo um comportamento composto entre as mesmas. O sistema de ligações é capaz de absorver as deformações devido à expansão térmica e a contração por causa do diâmetro pequeno das barras e do espaçamento suficiente entre as duas camadas.

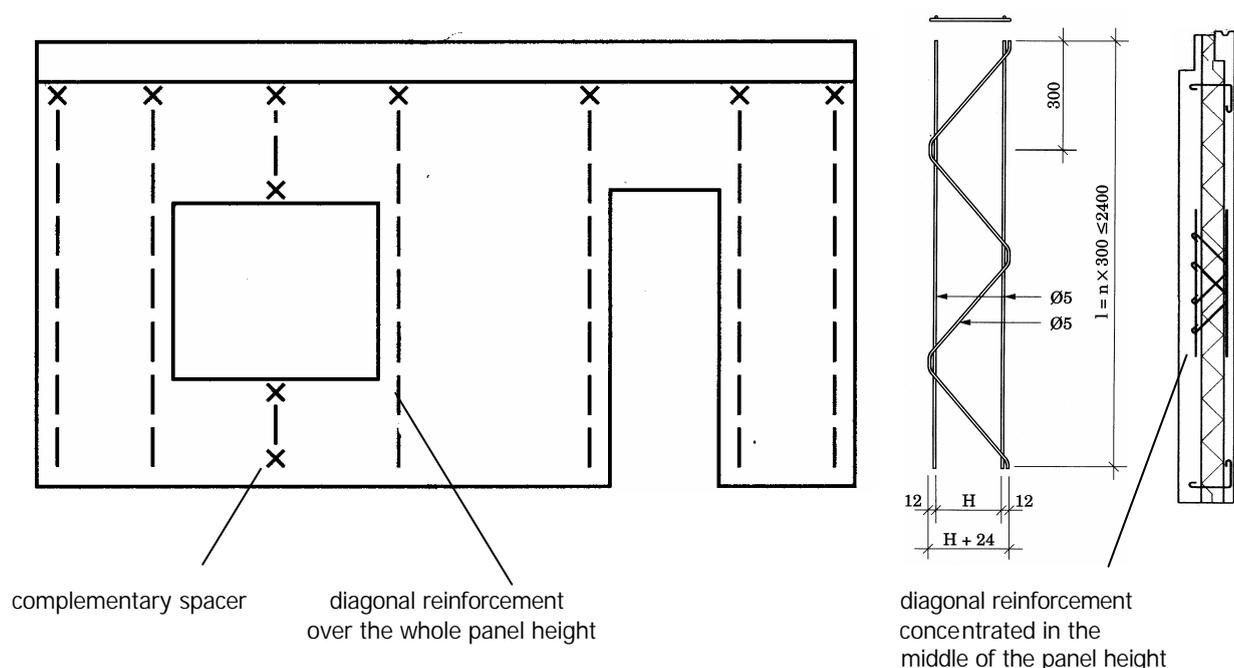


Figura 8.12 – Fixadores do painel sanduíche por meio de armadura

Um método construtivo variante para painéis sanduíche para fachadas é o método de “pele dupla”. O princípio deste método foi descrito na sessão 8.2.3 e está ilustrado na Figura 8.13.

Primeiro passo:

Levantamento e posicionamento do painel interno da fachada, com o lado de acabamento liso no lado interno. Os elementos de piso são posicionados quer sobre o topo dos painéis ou sobre um consolo. Após o levantamento dos pavimentos, a camada de isolamento é fixada no lado externo desses painéis por meio de conectores mecânicos.

Segundo passo:

Levantamento e posicionamento da camada externa da fachada. Quando esta camada é executada em concreto arquitetônico, o fechamento pode ser auto-portante ou fixado na camada interna. Desde que o projeto da camada externa é independente da camada interna, as dimensões das camadas internas podem ser completamente diferentes. Por exemplo, a altura do painel pode cobrir a altura de dois pavimentos.

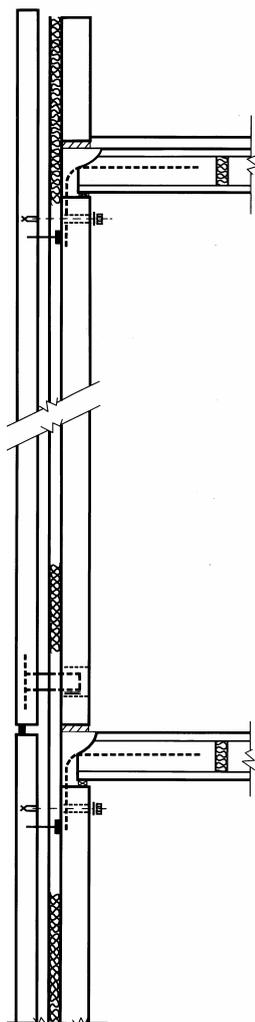


Figura 8.13 – Passos de montagem para sistemas de “pele dupla” para fachadas

Uma Segunda solução possível para o isolamento de painéis arquitetônicos de fachadas consiste na aplicação de uma camada de isolante dentro dos elementos de fechamento. Depois disto, um revestimento é feito sobre o isolamento, como por exemplo com placas cimentícias ou em gesso acartonado, alvenaria de tijolos ou outros materiais.

8.8. Fixadores de Painéis

Os fixadores formam uma parte vital das construções pré-moldadas de concreto. Existe uma boa literatura que trata dos detalhes de ligações e fixadores para elementos pré-moldados de fachadas arquitetônicas, com um número de exemplos de aplicações. A seguir, são descritas as ligações e fixadores mais típicos para painéis em concreto arquitetônico.

8.8.1. Tipos de fixadores e suas aplicações

Ligações por sobreposição de armaduras de espera (armaduras deixadas para fora do elemento) O mecanismo neste tipo de ligação é totalmente baseado no princípio de transferência de forças entre o traspasse de armaduras e pelo efeito de pino. Os elementos a serem conectados possuem barras de armadura deixadas para fora do concreto, as quais possuem detalhes adequados com dobras ou ganchos

para promover a sobreposição entre armaduras na região da ligação a ser preenchida com concreto ou graute no local.

Exemplos de ligações com sobreposição de armaduras salientes são apresentados na Fig. 8.14. Este tipo de ligação é geralmente empregado para conectar painéis portantes para fachadas e pisos. Esta solução também é adequada para conectar elementos não portantes. As vantagens específicas com este tipo de ligação, comparadas com outras ligações, são: grandes tolerâncias, custo reduzido, resistência à corrosão (durabilidade) e resistência ao fogo. A grande desvantagem com este tipo de ligação é que os sistemas de fixação não fornecem estabilidade imediata para o sistema estrutural e, portanto, deve-se utilizar escoras temporárias ou outros fixadores durante a construção.

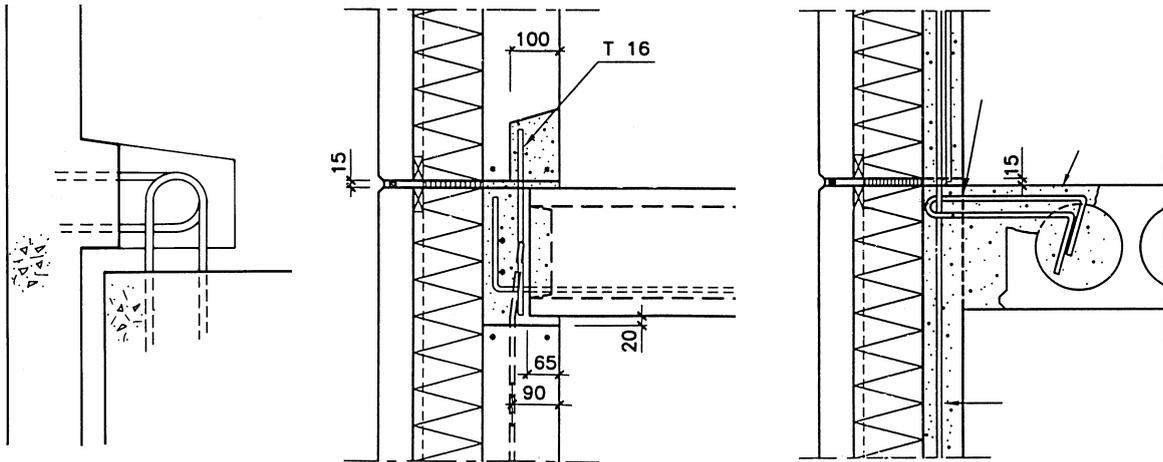


Fig. 8.14 Exemplos de ligações com armaduras de sobreposição e concreto de preenchimento no local

Ligações Parafusadas

As ligações parafusadas são utilizadas normalmente em painéis não portantes. Existem várias possibilidades de se fazer uso dos fixadores existentes como parafusos inseridos no concreto, trilhos para conectores inseridos no concreto, barras rosqueadas inseridas no concreto, etc. Na Fig. 8.15 são apresentadas algumas destas soluções. As ligações parafusadas podem ser desmontadas e promovem uma fixação imediata. Todavia, para superar os problemas causados pelos desvios construtivos, devem ser previstas tolerâncias em todas as direções para possíveis ajustes.

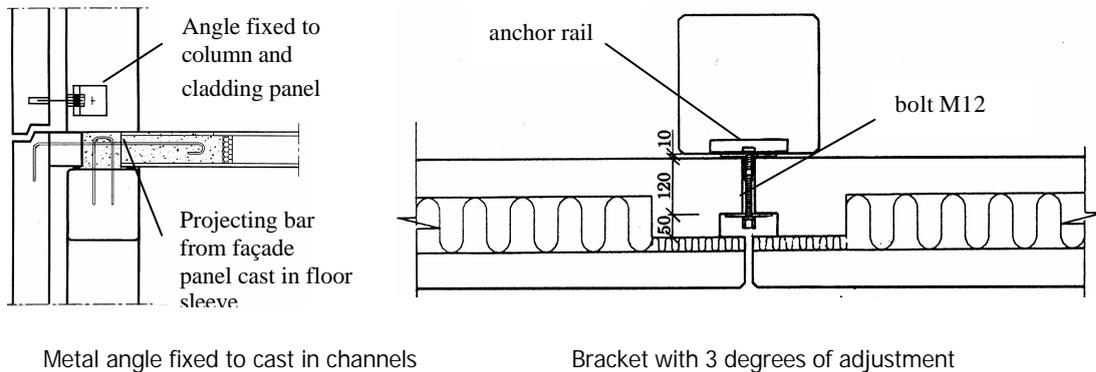


Fig. 8.15.a. Exemplos de ligações parafusadas

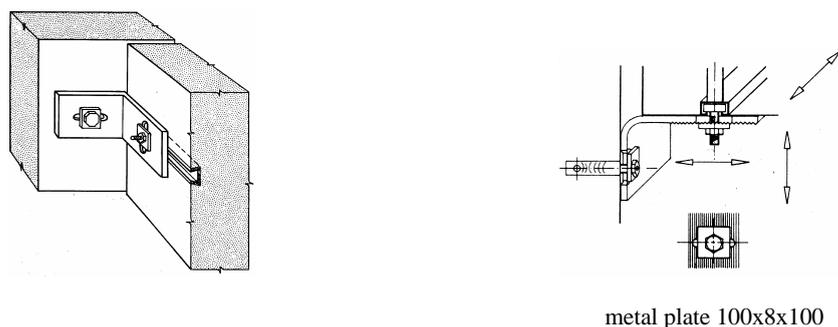


Fig. 8.15.b Exemplos de ligações parafusadas

Ligações soldadas

A ligação soldada é muito empregada na EUA e Canadá, mas raramente na Europa. Essas ligações são eficientes e podem ser facilmente ajustadas para condições variadas no campo. Todavia, o desempenho quanto à sua resistência e mesmo a sua confiabilidade estrutural depende da qualidade da mão de obra. Na Europa, as regulamentações exigentes para aplicação de solda em canteiro, somadas com os riscos de condições climáticas desfavoráveis, limitam bastante a aplicação deste tipo de solução.

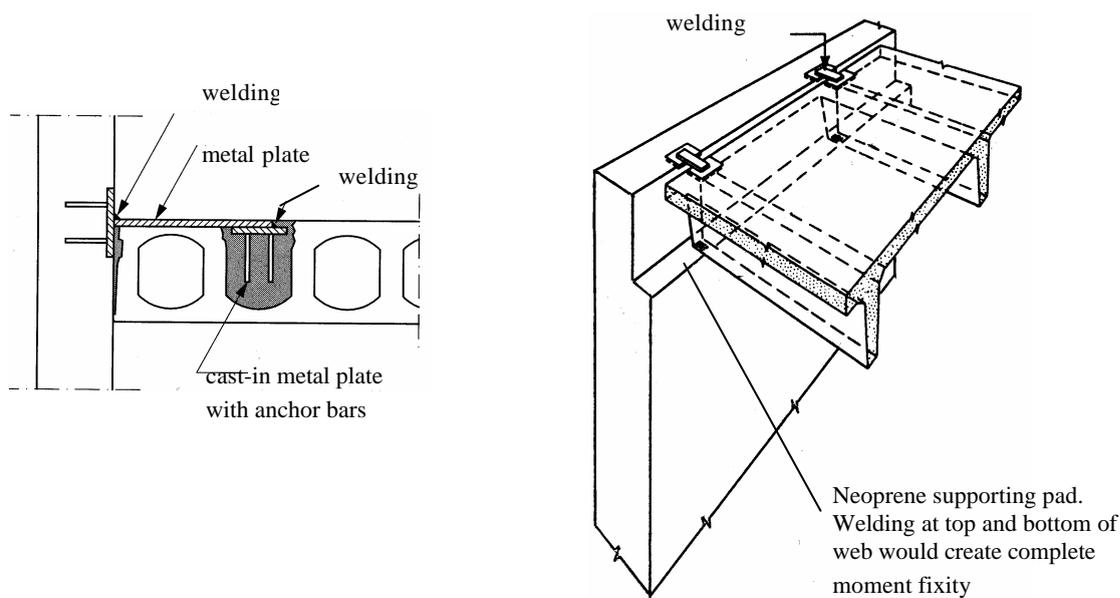


Fig. 8.16 Exemplos de conectores soldados

Os conectores por chapas metálicas são largamente utilizados para ligações soldadas em combinação com tiras metálicas, barras de armaduras ou pinos soldados na chapa metálica. A superfície externa da chapa metálica é normalmente faceada com a superfície do concreto e fornece uma área de solda para a ligação com o sistema de apoio do painel.

A ancoragem dos elementos em balanço para sacadas em concreto arquitetônico, para a estrutura de piso, pode ser realizada com sistemas que possibilitam interromper as "pontes térmicas" com os pisos. A armadura superior e as bielas de compressão na parte inferior resistem as ações do balanço. Esse sistema é correntemente disponível no mercado.

8.8.2. Durabilidade

A maior parte dos fixadores para painéis em concreto arquitetônico não pode ser inspecionada uma vez instalada. Portanto, além dos requisitos relativos à resistência mecânica e à ductilidade, os materiais dos fixadores devem apresentar uma boa resistência contra a deterioração física e química quando expostos aos agentes agressivos no meio ambiente.

Os métodos e tipos de metais a serem empregados dependem da importância do fixador e da possibilidade de inspeção e subsequente reparo. Os fixadores, os quais estão embutidos (inseridos) no concreto e estão em condições de atmosfera seca, somente necessitam de ter um recobrimento mínimo de concreto conforme prescrito nas normas para a durabilidade em concreto armado. Quando o concreto é exposto às condições de agressividade e o cobrimento de concreto é muito pequeno para garantir a proteção contra o contato com a água, então os materiais dos fixadores devem ser livres de corrosão (anticorrosivos).

Os apoios para carregamentos verticais e fixadores de travamento, os quais não estão inseridos (embutidos) no concreto, são geralmente produzidos com um dos seguintes metais resistentes à corrosão: cobre, liga de bronze e alumínio, liga de bronze e fósforo ou aço inoxidável. A AISI-316 (a norma americana equivalente para a DIN-12371) e os tipos AISI-316 podem ser utilizados. Cuidados devem ser tomados para se evitar os contatos bi-metálicos prejudiciais, os quais podem causar a corrosão galvânica (catódica). O risco de contato bi-metálico pode ser evitado por meio de arruelas e luvas. Além dos requisitos de estabilidade e de durabilidade, para se obter ligações com desempenhos satisfatórios, deve-se empregar no projeto alguns critérios construtivos importantes:

- Deve-se adotar o mesmo tipo de ancoragem para todo o sistema de fechamento sempre que possível e também se o dimensionamento em certos casos é maior que o necessário. O trabalho repetitivo promove a redução de custos e melhora a qualidade da execução.
- As barras de espera para traspasse devem ser posicionadas na parte superior da forma (durante a moldagem) com o objetivo de evitar dificuldades de moldagem.
- Os fixadores devem levar em conta as tolerâncias da estrutura na edificação e a fabricação dos elementos pré-moldados.
- Todos os fixadores, de qualquer tipo, devem permitir ajustes nas três dimensões para permitir que os painéis sejam facilmente alinhados e nivelados.
- Deve-se permitir um espaçamento adequado entre os elementos da fachada e da estrutura, normalmente com um mínimo de 25 a 30 mm. Estes espaços vazios não são normalmente visíveis na construção acabada e, portanto, como não impõem limites sensíveis, esses espaços podem ser tão grandes quanto for necessário para atender as exigências práticas de montagem.

8.9. Juntas de Vedação

Nos sistemas de fachadas em concreto pré-moldado, a impermeabilidade às intempéries (às condições climáticas) é uma função que depende da eficiência dos materiais selantes nas juntas entre os painéis individuais e entre os painéis de fechamento e os outros elementos na fachada. A função principal do selante na junta é promover uma ligação impermeável e flexível entre os painéis, para permitir a expansão e a contração entre os próprios painéis, bem como os movimentos ao longo de toda a estrutura.

A forma e as dimensões do perfil da junta devem ser projetado de maneira tal que a junta não venha a se tornar em um ponto fraco nos elementos e não haja riscos de danos nas bordas. As juntas, as quais possuem formas muito complicadas, são também difíceis de execução e isto pode reduzir a impermeabilidade da estrutura.

8.9.1 Tipos de juntas

Dois tipos de juntas à prova de água que têm sido utilizadas com sucesso são:

- Juntas com faces seladas: neste tipo de junta a penetração tanto de água quanto de ar é prevenida por meio de um selante fechado na face dos painéis. O método mais efetivo e mais comum é empregar os selantes de silicone, os quais são aplicados com pistola. O material selante deve aderir nas duas faces

da junta e deve ser suficientemente flexível para acomodar os movimentos, sem haver deslizamento ou perda de adesão.

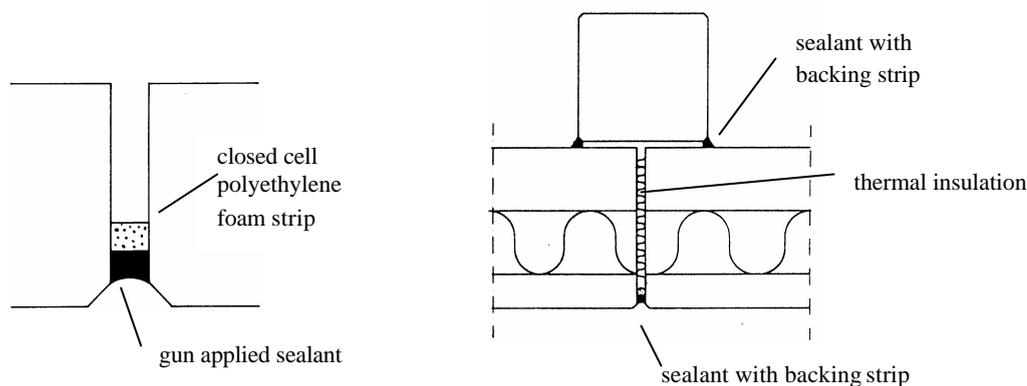


Fig. 8.17 Exemplos de junta com face selada

- A junta com dreno aberto é também conhecida como junta de dois estágios (Figura 8.18). Este tipo de junta possui características separadas para prevenir a penetração de ar e de água. Nesses sistemas, a primeira barreira é projetada para prevenir a penetração bruta (principal) de modo que somente uma quantidade limitada de água poderá passar para a zona entre a barreira primária e o selante de ar na parte de trás da junta. A proteção fornecida pela barreira primária para o efeito da força dinâmica do vento de modo que a água não é projetada (lançada) para o selante de ar. O selante de ar desempenha um papel vital no funcionamento da junta e qualquer quebra na integridade do selante pode levar à penetração de água. Por esta razão, vedações ou fendas de espuma podem ser inadequadas por causa do risco de ocorrência de descontinuidade ou de vazios nas juntas devido aos defeitos nas superfícies (faces) da junta, os quais podem permitir a passagem livre para a penetração de ar e de água. Os selantes aplicados com pistolas proporcionam os métodos mais seguros para se conseguir a vedação ao ar.

A primeira barreira na junta vertical contém uma câmara de expansão para diminuir a pressão do vento e uma chicana para drenar a água da chuva. A junta horizontal é arranjada com uma sobreposição de painéis para proporcionar a barreira primária. A altura do dente na junta horizontal deve ser entre 50 e 70 mm para evitar a penetração de água por pressão do vento. Uma folha metálica (um rufo ou outro material à prova de água) é colocada sobre a junta vertical, na interseção entre a junta vertical e a junta horizontal. O selante de ar é colocado na parte de trás da junta.

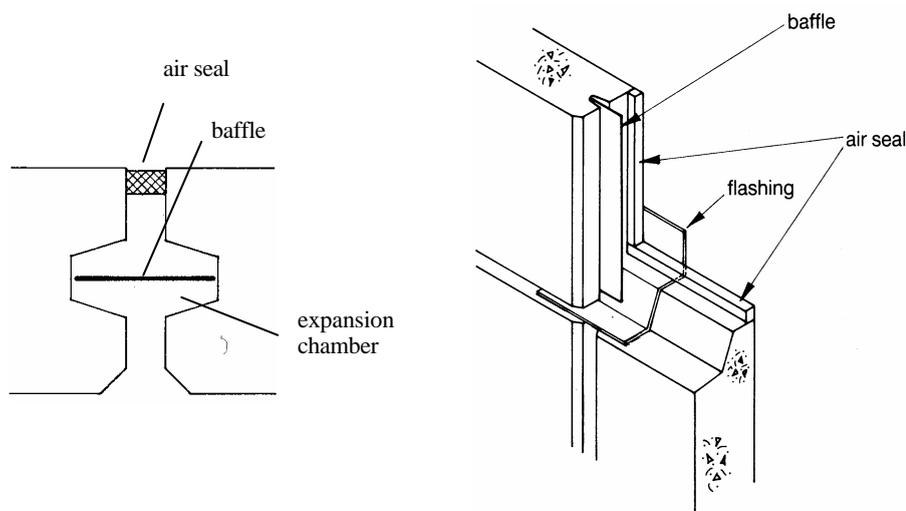


Figura 8.18 – Exemplo de junta com dreno aberto

Uma combinação de ambos os sistemas apresentados acima pode também ser empregada para melhorar o desempenho da junta. A junta horizontal é então arranjada com um “degrau” (ou dente) horizontal contínuo e com um selante de ar. As juntas podem ser deixadas com faces abertas ou seladas. A junta vertical é sempre com faces seladas (ver Fig. 8.19).

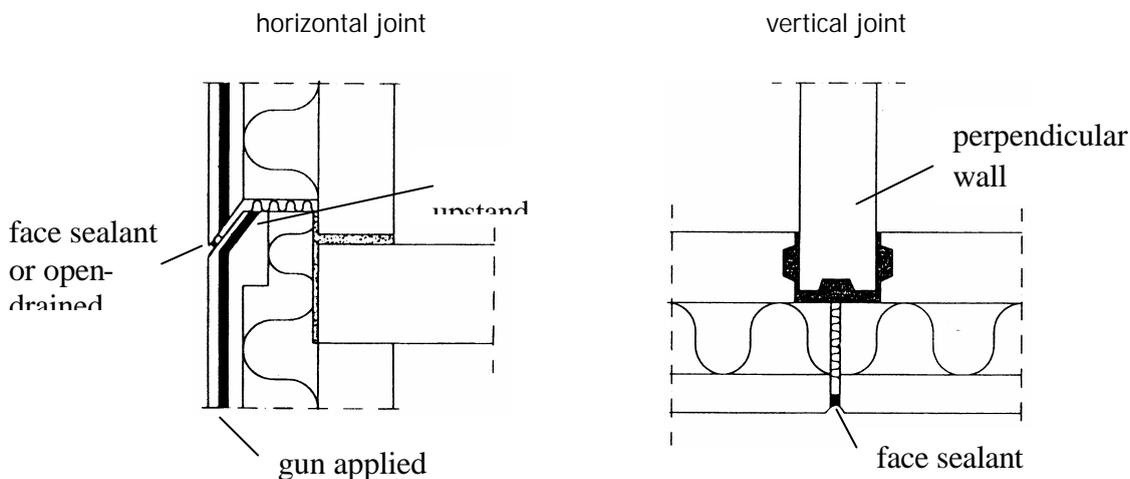


Figura 8.19 – Configuração típica para juntas em painéis tipo sanduiche para fachadas

A maior parte das juntas de vedação nos fechamentos para fachadas é executada com juntas com faces seladas. A princípio, estas juntas são mais suscetíveis aos efeitos do envelhecimento do que as juntas com drenos abertos por causa do fato de que o material selante é exposto ao vento, à chuva e aos raios ultravioleta. Todavia, os selantes aplicados nas faces permitem liberdade de formas para o projeto dos painéis. A eficiência dessas juntas depende da continuidade da aderência ao concreto e da elasticidade do material selante. Isto implica que as bordas da junta devem ser regulares e planas (ou simples), não podendo haver aplicação de agentes retardadores ou de aditivos similares. Recomenda-se colocar o selante levemente para trás na junta para se obter uma melhor proteção contra o vento, água de chuva ou raios ultravioleta. Quando expostas diretamente às intempéries, as propriedades dos materiais selantes irão sofrer alterações ao longo do tempo, devendo ser antecipados serviços de manutenção ou de reparos. Todavia, desde que o material selante está posicionado próximo à face do painel, pode-se executar facilmente a inspeção e a manutenção.

Em juntas com drenos abertos, os posicionamentos dos diferentes estágios das juntas são realizados durante o levantamento dos painéis, o que nem sempre é fácil de ser feito. Deve-se ter um cuidado especial para executar a interseção entre a junta vertical e a junta horizontal, por ser este um ponto fraco do sistema. Os encaixes inclinados nas bordas das juntas verticais devem ser suficientemente paralelos para possibilitar o encaixe da chicana (baffle). Os movimentos devidos às variações na temperatura e na umidade dos painéis geralmente não afetam o desempenho das juntas. A inspeção nas juntas com drenos abertos é mais difícil, especialmente na interseção das juntas horizontais e verticais, onde os reparos de juntas com vazamentos não são tão fáceis. As folhas metálicas (galvanizadas) na interseção das juntas horizontais e verticais são mais inacessíveis e, assim, não podem ser reparadas. O mesmo ocorre para as chicanas (baffles). Os reparos daquelas partes das juntas que são acessíveis do lado externo dos painéis podem ser realizados cobrindo as juntas com selantes ou com tiras adesivas.

Nos sistemas de fachada com “pele dupla”, as juntas de vedação são algumas vezes colocadas entre os painéis internos (na pele interna), antes da colocação dos elementos de fechamento externos (que constituem a pele externa). As juntas entre os elementos no fechamento externo são deixadas abertas. Neste caso, o material de isolamento deve ser à prova de água.

8.9.2 Largura e preenchimento de juntas

Para se determinar a largura adequada na junta para a aplicação de um determinado material selante, é necessário conhecer a quantidade de movimentação que irá ocorrer na junta e quais as tolerâncias são permitidas na produção e na montagem dos componentes na execução da junta.

Geralmente, a principal razão para a movimentação na junta é a expansão e a contração dos componentes resultantes da mudança de temperatura, de umidade ou da retração. A influência da temperatura nas fachadas de concreto é dependente da cor do concreto e da orientação da fachada. Um bom material selante elástico pode se deformar até 25%.

Para permitir uma aplicação correta do selante, a largura efetiva da junta deve ser no mínimo de 8 mm e no máximo de 30 mm. A Tabela 8.20 fornece uma indicação da largura nominal mínima da junta em função da largura do elemento e para um tipo comum de selante (poliuretano ou selantes de silicone). Mais informação sobre tipos de juntas e selantes pode ser obtida na referência [3].

Tabela 8.20 – Largura de junta recomendada para juntas com faces seladas

Largura do elemento (m)	largura nominal mínima da junta (mm)
Component width (m)	Minimum nominal joint width (mm)
1.80	12
2.40	12
3.60	14
4.80	15
6.00	16

Bibliografia

- Shear At The Interface Of Precast And In Situ Concrete*; FIP Guide to good practice, January 1982, ISBN 0 907862 02 0 (Manual da FIP: Cisalhamento na interface de elementos de concreto pré-moldado e moldado no local)
- EUROCODE 2: *Design Of Concrete Structures - Part 1: General Rules And Rules For Buildings*. EN 1992-1-1, October 2002 (Norma Européia para Concreto: Projeto de Estruturas de Concreto, Parte 1: Regras Gerais e Regras para Edifícios)
- British Standards Institution (1985) *The Structural Use of Concrete*. BSI, London, BS 8110 (Norma Inglesa para Concreto: O Uso Estrutural do Concreto)
- Elliott, K.S. (1996) *Multi-Storey Precast Concrete Framed Structures*. Blackwell Science Ltd, London. ISBN 0-632-03415-7 (Estruturas de Concreto Pré-Moldado para Edifícios de Múltiplos Pavimentos - Livro do Prof. Kim Elliott da Universidade Nottingham - UK)
- Éléments en Béton Architectonique - Recommendations Techniques; Precast Concrete Federation FeBe Belgium
- La prefabbricazione in calcestruzzo; Guida all'utilizzo nella progettazione - Henrice Dassori - Assobeton Italy, 2001 BE-MA Editrice, Via Teocrito, 50 - 20128 Milano
- Precast concrete cladding, edited by HPJ Taylor, Edward Arnold, London 1992. ISBN 0-340-54475-9.