

Mounir  
Khalil  
El Debs

# concreto pré-moldado

## fundamentos e aplicações

2ª edição | revista e  
ampliada

Apoio:



Mounir  
Khalil  
El Debs

# concreto pré-moldado

fundamentos e aplicações

Copyright © 2017 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

**Conselho editorial** Arthur Pinto Chaves; Cylon Gonçalves da Silva;  
Doris C. C. Kowaltowski; José Galizia Tundisi;  
Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene; Rozely Ferreira  
dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano.

**Capa** Malu Vallim

**Projeto gráfico** Alexandre Babadobulos

**Diagramação** Alexandre Babadobulos e Douglas da Rocha Yoshida

**Preparação de figuras** Alexandre Babadobulos

**Preparação de textos** Hélio Hideki Iraha

**Revisão de textos** Ana Paula Ribeiro

**Impressão e acabamento** Prol gráfica e editora

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

---

El Debs, Mounir Khalil

Concreto pré-moldado : fundamentos e aplicações /  
Mounir Khalil El Debs. -- 2. ed. -- São Paulo :  
Oficina de Textos, 2017.

Bibliografia

ISBN: 978-85-7975-279-7

1. Concreto pré-moldado 2. Construção de concreto  
pré-moldado 3. Engenharia 4. Estruturas de concreto  
5. Pavimentos de concreto I. Título.

17-06509

CDD-624.1834

---

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Concreto pré-moldado : Engenharia 624.1834

Todos os direitos reservados à Editora **Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 798

CEP 04013-003 São Paulo SP

tel. (11) 3085 7933

[www.ofitexto.com.br](http://www.ofitexto.com.br)

[atend@ofitexto.com.br](mailto:atend@ofitexto.com.br)

## PREFÁCIO

Esta é a segunda edição, revista e ampliada, deste livro, cuja primeira edição foi publicada pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), por meio do chamado Projeto Reenge, em 2000.

Pretendia-se fazer uma nova edição após dez anos de seu lançamento, revisando assuntos que ficaram desatualizados em virtude das pesquisas desenvolvidas, como o cálculo de cálice de fundação, e incorporando ou reforçando aspectos que foram ganhando importância, como as questões relacionadas à sustentabilidade. Porém, em razão de diversos fatores, profissionais e pessoais, somente no momento, após 17 anos, esta nova edição está sendo finalizada. Por outro lado, o momento é oportuno, pois está sendo possível levar em conta a última atualização da principal norma brasileira sobre o assunto, a NBR 9062 – *Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A denominação *concreto pré-moldado* corresponde ao emprego de elementos pré-moldados de concreto, ou seja, de elementos de concreto moldados fora de sua posição definitiva de utilização, na construção.

O uso do concreto pré-moldado apresenta duas diretrizes. Uma aponta para a industrialização da construção, a outra para a racionalização da execução de estruturas de

concreto. Neste livro procurou-se tratar o concreto pré-moldado no contexto dessas duas diretrizes.

Embora o concreto pré-moldado tenha acompanhado a evolução da tecnologia do concreto do final do século XIX até o início da Segunda Guerra Mundial, seu desenvolvimento é geralmente relacionado com o grande impulso no quarto de século que se seguiu à Segunda Guerra Mundial.

Hoje em dia já não há a euforia daquele período, mas o concreto pré-moldado tem ainda avançado, com o que pode ser chamado de *novo concreto pré-moldado*. Com essa nova filosofia, procuram-se soluções personalizadas, a fim de fugir das criticadas mesmices arquitetônicas das construções feitas de concreto pré-moldado nas décadas passadas, e maior flexibilidade de projeto e de produção.

Apesar dos avanços desde a primeira edição do livro, o concreto pré-moldado poderia ser mais explorado no Brasil. As principais razões que têm sido atribuídas para ele ser subutilizado são: o sistema tributário, que penaliza o emprego de elementos pré-moldados de fábricas; a instabilidade econômica, que dificulta o planejamento e os investimentos a longo prazo; o conservadorismo dos agentes e de procedimentos envolvidos na construção civil; o pouco conhecimento de alternativas em concreto pré-moldado; a oferta limitada de equipamentos; e a pouca

disponibilidade comercial de dispositivos auxiliares para realizar as ligações e para manusear elementos. As duas primeiras razões são de natureza macroeconômica. As restantes são culturais ou consequência das primeiras.

Essa conjunção de fatores alimenta um círculo vicioso, responsável, em grande parte, pela não exploração da potencialidade do concreto pré-moldado, que é o de que não se constrói porque não se têm insumos tecnológicos (conhecimentos, experiência, equipamentos e dispositivos auxiliares) e não se têm os insumos tecnológicos porque não se constrói. Com este livro, pretende-se contribuir para minimizar os efeitos desse círculo, por meio do fornecimento de conhecimentos técnicos estruturados para profissionais da área da construção civil.

Nesta obra, procura-se motivar os leitores para a aplicação do concreto pré-moldado, sem deixar de alertar para as dificuldades inerentes ao processo. De fato, essas dificuldades fazem com que o concreto pré-moldado deva ser encarado com o “pé no chão”. Mas, por outro lado, deve-se ter o “olho no futuro”, pois, embora possam existir condições desfavoráveis, não se pode deixar de ter em vista que, à medida que aumenta o desenvolvimento tecnológico e social do país, aumentam as chances de emprego do concreto pré-moldado.

Este livro é direcionado a alunos e profissionais de Engenharia Civil, com ênfase no projeto das estruturas formadas por elementos pré-moldados. Também alunos de Arquitetura e arquitetos podem fazer uso de boa parte do material apresentado.

O livro nasceu de notas de aulas de uma disciplina de concreto pré-moldado do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP. Procurou-se abordar a maior parte dos assuntos relacionados com o concreto pré-moldado, mas, devido a essa origem, houve aprofundamentos apenas em assuntos relacionados ao projeto estrutural.

Um dos objetivos desta obra é motivar os leitores para estudos sobre o concreto pré-moldado. Em razão desse objetivo, são fornecidas referências bibliográficas, em quantidade e qualidade, para facilitar o trabalho dos leitores interessados em aprofundar o conhecimento em tópicos de interesse. Também se procurou apresentar, além das alternativas construtivas usuais, outras pouco empregadas, de forma a varrer as possibilidades existentes, pois julga-se que o conhecimento das diversas alternativas e de suas características é importante para a escolha de soluções mais apropriadas em função das circunstâncias de cada obra, bem como para a concepção de alternativas inovadoras.

Outro objetivo desta edição é incorporar as pesquisas desenvolvidas junto ao programa de pós-graduação, sob a orientação do autor, de forma a disponibilizar os prin-

cipais resultados para os profissionais envolvidos. Isso é feito ao longo do texto principal e de forma concentrada nos Anexos D e F.

Além disso, esta edição do livro traz também resultados das três edições do Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, realizadas em 2005 (1PPP), 2009 (2PPP) e 2013 (3PPP) na EESC/USP, sob a coordenação do autor. Esses encontros tiveram o objetivo de promover a integração entre o setor acadêmico e o setor produtivo, muito importante para os dois setores. Por um lado, o setor produtivo toma conhecimento das pesquisas em desenvolvimento pelo setor acadêmico. Por outro lado, o setor acadêmico toma conhecimento das necessidades do setor produtivo. Dessa forma, as pesquisas geradas pelo setor acadêmico estariam em melhores condições de serem transferidas para o setor produtivo, com um grande benefício para a indústria nacional ou regional, conforme o caso.

Neste livro, considera-se que o leitor tenha conhecimentos básicos do concreto armado e protendido e de análise estrutural, que são tratados nos cursos de Engenharia Civil. Como esse conhecimento é bem menos comum no concreto protendido do que no concreto armado, foi incluído nesta edição um anexo com uma introdução ao assunto (Anexo F).

A maioria das aplicações do concreto pré-moldado apresentadas neste livro foram realizadas nos Estados Unidos e na Europa, que permaneceram da primeira edição. Nesta segunda edição foram incluídos vários exemplos de aplicações no Brasil, resultado dos citados encontros PPP e do fato de ter havido maior divulgação após a primeira edição. Nesse sentido, merece destacar as publicações da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (Abcic), em particular a revista *Industrializar em concreto*.

Cabe salientar que as informações sobre os produtos aqui apresentadas servem de referência, uma vez que os valores mudam em função do mercado, e, além disso, uma parte das informações é oriunda de referências estrangeiras. Portanto, recomenda-se consultar os fabricantes para informações atualizadas dos produtos disponíveis no mercado nacional ou internacional, se for o caso.

O autor gostaria ainda de esclarecer e justificar os seguintes aspectos: a) nos símbolos utilizados, procurou-se seguir a NBR 6118 – *Projeto de estruturas de concreto: procedimento*, o que tornou necessário realizar ajustes em relação aos símbolos empregados na NBR 9062 – *Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*; b) na localização das referências bibliográficas, no final do livro, pode ser necessário, no caso de publicação feita por entidade, consultar primeiro a sigla na lista de símbolos e siglas; c) embora se tenha procurado utilizar as versões mais recentes das normas e códigos, não foi possível em certos casos usar

a última versão, por isso, em determinadas situações, nas referências bibliográficas, foi colocado um aviso da existência de versão mais recente, mas naturalmente, pela dinâmica das atualizações, recomenda-se ao leitor verificar a possível existência de versões mais recentes; e d) o termo *deformação* é utilizado neste livro tanto para designar a mudança da configuração geométrica de uma estrutura ou elemento estrutural, conforme o sentido etimológico da palavra, quanto para designar a relação entre tensão e módulo de elasticidade, que tem sido comumente utilizada na grande maioria das publicações, devendo-se acrescentar para este último caso, se necessário, o complemento *específica*.

O livro está dividido em três partes. Na primeira parte, englobando a introdução e os cinco primeiros capítulos, estão apresentados os fundamentos do concreto pré-mol-

dato, em que são fornecidas indicações gerais e específicas para o projeto, principalmente em relação às ligações entre os elementos. Na segunda parte, dos Caps. 6 a 12, estão incluídas as aplicações em edifícios, pontes e outras construções civis. Na terceira parte, com quatro capítulos, são tratados os elementos de produção especializada. O que está sendo aqui denominado *elementos de produção especializada* são elementos pré-moldados de uso intensivo na construção civil, disponíveis facilmente no mercado, em alguns casos podendo até ser encontrados para pronta entrega. Os tipos de elementos em questão são: vigotas pré-moldadas para lajes, painéis alveolares para lajes e paredes, tubos circulares de concreto, aduelas (galerias de seção retangular), estacas, postes, dormentes e barreiras. No final do livro são apresentados os anexos, que, entre outros assuntos, incluem exemplos numéricos.

São Carlos, fevereiro de 2017

*Mounir Khalil El Debs*

Professor Sênior

Departamento de Engenharia de Estruturas

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo

# APRESENTAÇÃO

## Da primeira edição

O presente livro abre um novo campo em nossa literatura técnica. Pela primeira vez, no Brasil, alguém se sente disposto a escrever algo sobre a maravilhosa técnica do pré-moldado.

A intenção não é introduzir o leitor no cálculo das estruturas pré-moldadas, que, na verdade, não é um cálculo diferente do que se faz para as estruturas de concreto moldadas no local. Os carregamentos são determinados do mesmo modo e os esforços solicitantes também. O dimensionamento é regido pelas mesmas regras, podendo ser usados os mesmos critérios e os mesmos *softwares*. Certas particularidades, entretanto, são acrescentadas. Os elementos pré-moldados são feitos em local diferente de sua utilização. Precisam, portanto, ser transportados até lá e depois montados em sua posição definitiva. Nessa fase, os elementos estão sujeitos a esforços não atuantes nas estruturas moldadas no local. Os cuidados e os controles de execução são, em geral, mais perfeitos do que nas estruturas tradicionais, porém a resistência deve ser admitida com seu valor prematuro, pois a execução em série, quer no canteiro de obra, quer na indústria, exige uma certa produtividade e reutilizações frequentes dos equipamentos e fôrmas. São particularidades muito bem explicadas e desenvolvidas no texto. As normas brasileiras que regulamentam a utilização dos elementos pré-moldados são explicadas e comentadas em cada citação, permitindo ao leitor familiarizar-se com elas. Tudo isso é abordado de modo simples e espontâneo, uma vez que o autor domina totalmente a matéria.

São colecionados exemplos de estruturas executadas em todo o mundo, abrangendo os tipos mais variados, como edifícios de um pavimento (galpões), edifícios de múltiplos pavimentos, coberturas (em cascas, folhas poliédricas e similares), pontes, galerias, canais de drenagem, muros de arrimo, reservatórios, arquibancadas e estádios, silos e torres. O leitor deve usar este livro não com o objetivo de dimensionar e detalhar um projeto, mas de concebê-lo. O principal objetivo deste livro é fornecer ao leitor subsídios para que possa criar uma estrutura nova. Entre as diversas alternativas possíveis, o leitor deverá escolher a mais fácil de ser executada, a mais econômica, a mais atraente e a mais segura. O livro ensina os cuidados que devem ser tomados na execução e na escolha das ligações, mostrando que, em certos casos, o uso da protensão pode ser indispensável.

---

Não obstante todas as maravilhosas sugestões mostradas no decorrer das mais de 400 páginas, com pouco texto e muitas ilustrações, o leitor deve ter sempre em mente que a melhor maneira de aprender é fazer. Nem sempre aquilo que teve sucesso em outro país, com outra mentalidade, outro apoio industrial e outras estradas para transporte pesado, terá igual sucesso no Brasil. O contrário também é verdadeiro: soluções aqui realizadas e adotadas com vantagem não teriam a menor chance de sucesso em países como a Holanda ou os Estados Unidos. A época é outro fator a ser considerado: soluções adotadas há 50 anos podem não ser mais válidas em nossos dias. A decisão deverá ser exclusivamente do leitor e seu sucesso dependerá de sua capacidade de saber usar o que aqui se descreve com grande maestria.

Além de tudo isso, o leitor encontrará em cada capítulo uma coletânea de referências que podem e devem ser consultadas, pois é impossível explicar tudo em detalhes em um livro tão abrangente como este.

Cumprimento o autor por esta iniciativa, em que ele tenta – com sucesso – colocar uma infinidade de ideias úteis na mente de qualquer engenheiro ainda não iniciado na técnica do pré-moldado e que ainda tem algum receio de não conseguir conceber algo exequível e seguro. Sugiro que o autor se estimule e continue a escrever esta obra, transformando cada capítulo em um livro especializado.

São Paulo, janeiro de 2000

*Dr. Eng. Augusto Carlos de Vasconcelos*

### Da segunda edição

Já havia feito o prefácio da primeira edição deste livro em 2000. Agora, foi aceita minha sugestão de ampliar a edição, acrescentando outros tópicos ainda não desenvolvidos. Não sei se foi após essa sugestão que o autor decidiu aumentar o livro com novos acréscimos, que vieram a tornar a leitura muito mais útil e fácil de aplicar.

A intenção continua a mesma: esclarecer certas particularidades que não ocorrem no concreto armado executado no local, isto é, cura, transporte da peça pronta, montagem e execução das ligações.

As normas brasileiras atualizadas são explicadas e comentadas em cada item, facilitando o leitor a se familiarizar com elas.

Além disso, foram acrescentados vários capítulos com assuntos antes não abordados, incluindo uma parte com exemplos numéricos.

O Cap. 3 apresenta uma série de novidades resultantes de pesquisas feitas na Escola de Engenharia de São Carlos e publicadas em dissertações, como a introdução de apoios em almofadas de argamassa, com a adição de látex e fibras curtas.

O Cap. 5 aborda, como novidade não incluída na primeira edição, os casos especiais de estabilidade global, estabilidade lateral e tópicos esclarecedores para todos os engenheiros de décadas anteriores ainda não familiarizados com as alterações.

Enfim, trata-se de um livro útil não somente para as aplicações práticas, mas também para esclarecimentos das modificações introduzidas e das novidades descobertas. Em resumo, é um livro que todo profissional interessado no progresso deve ler com atenção e cuidado.

São Paulo, abril de 2017

*Dr. Eng. Augusto Carlos de Vasconcelos*

# SUMÁRIO

<b>Parte 1 - Fundamentos .....</b>	<b>15</b>
<b>I</b> INTRODUÇÃO .....	17
<b>1.1</b> Considerações iniciais.....	17
<b>1.2</b> Formas de aplicação do CPM .....	29
<b>1.3</b> Materiais.....	31
<b>1.4</b> Particularidades do projeto de CPM.....	37
<b>1.5</b> Características do CPM.....	39
<b>1.6</b> Aceno histórico, situação atual e perspectivas.....	44
<b>1</b> PRODUÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO.....	49
<b>1.1</b> Execução dos elementos .....	49
<b>1.2</b> Transporte.....	63
<b>1.3</b> Montagem.....	65
<b>2</b> PROJETO DOS ELEMENTOS E DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO .....	71
<b>2.1</b> Princípios e recomendações gerais .....	71
<b>2.2</b> Forma dos elementos pré-moldados.....	76
<b>2.3</b> Elementos para a análise estrutural.....	79
<b>2.4</b> Recomendações para o projeto estrutural.....	83
<b>2.5</b> Tolerâncias e folgas .....	90
<b>2.6</b> Cobrimento da armadura .....	95
<b>2.7</b> Situações transitórias.....	97
<b>2.8</b> Análise da estabilidade global .....	102
<b>3</b> LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS.....	107
<b>3.1</b> Considerações iniciais.....	107
<b>3.2</b> Princípios gerais .....	111
<b>3.3</b> Elementos para a análise estrutural.....	113
<b>3.4</b> Recomendações e detalhes construtivos .....	117
<b>3.5</b> Componentes das ligações .....	125
<b>3.6</b> Tipologia das ligações .....	145
<b>3.7</b> Análise de alguns tipos de ligação.....	157

---

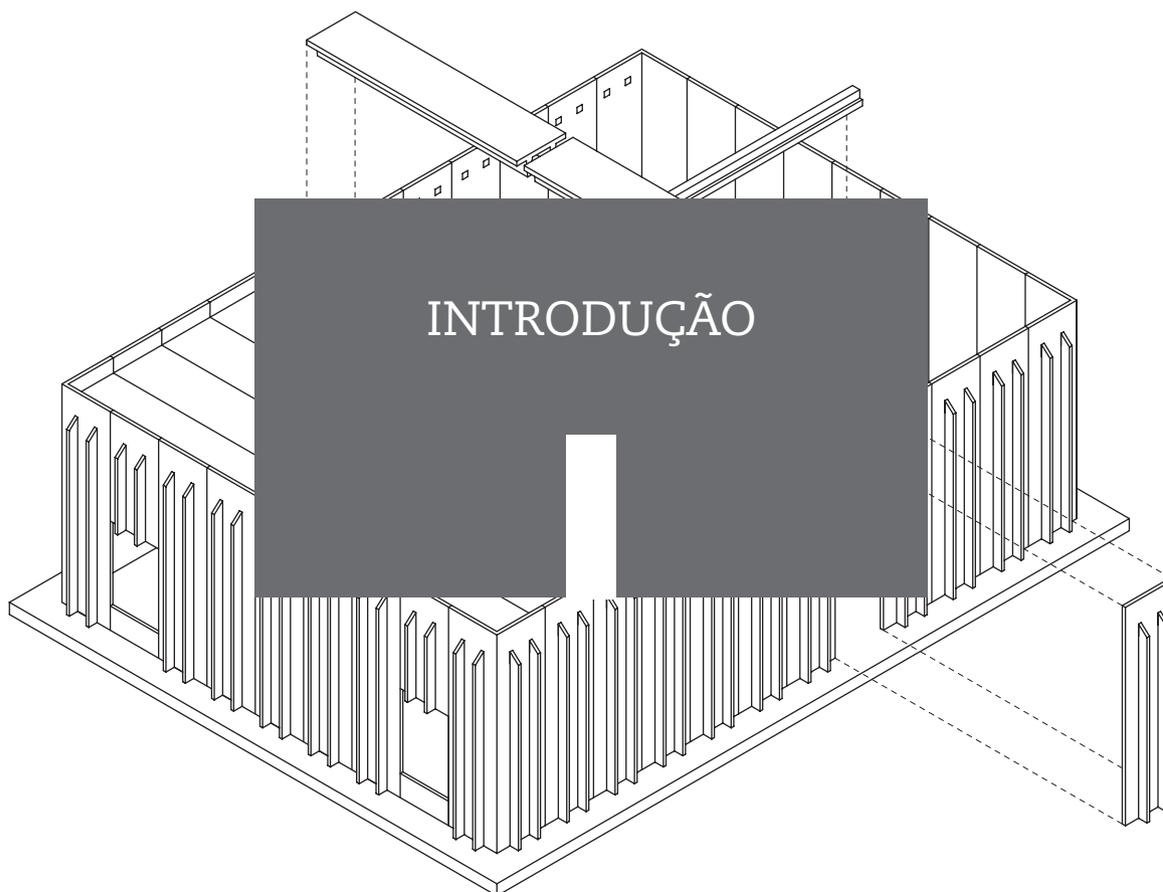
<b>4</b>	<b>ELEMENTOS COMPOSTOS</b> .....	173
4.1	Considerações iniciais.....	173
4.2	Comportamento estrutural .....	174
4.3	Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos fletidos .....	176
4.4	Recomendações para o projeto e a execução .....	188
<b>5</b>	<b>TÓPICOS ESPECIAIS</b> .....	193
5.1	Colapso progressivo.....	193
5.2	Análise de estruturas com ligações semirrígidas .....	199
5.3	Estabilidade lateral de elementos pré-moldados.....	208
5.4	Comportamento do sistema de pavimento como diafragma .....	213
5.5	Dimensionamento de vigas delgadas de seção L.....	216
5.6	Outros tópicos de interesse .....	218
<b>Parte 2 - Aplicações</b> .....		<b>221</b>
<b>6</b>	<b>COMPONENTES DE EDIFICAÇÕES</b> .....	223
6.1	Componentes de sistemas de esqueleto.....	223
6.2	Componentes de sistemas de pavimentos.....	226
6.3	Componentes de sistemas de paredes.....	230
6.4	Componentes de cobertura .....	232
6.5	Outros componentes .....	233
<b>7</b>	<b>EDIFÍCIOS DE UM PAVIMENTO</b> .....	237
7.1	Considerações iniciais .....	237
7.2	Sistemas estruturais de esqueleto .....	238
7.3	Sistemas estruturais de parede portante .....	242
<b>8</b>	<b>EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS</b> .....	247
8.1	Considerações iniciais.....	247
8.2	Sistemas estruturais de esqueleto .....	248
8.3	Sistemas estruturais de parede portante .....	256
8.4	Sistemas estruturais mistos .....	259
<b>9</b>	<b>COBERTURAS EM CASCAS, FOLHAS POLIÉDRICAS E SIMILARES</b> .....	261
9.1	Considerações iniciais.....	261
9.2	Coberturas em casca .....	263
9.3	Coberturas em folha poliédrica .....	268
9.4	Coberturas com elementos lineares em forma de casca ou de folha poliédrica.....	268
9.5	Coberturas em pórticos e arcos.....	271
9.6	Coberturas com cabos de aço e elementos pré-moldados .....	272
<b>10</b>	<b>PONTES</b> .....	275
10.1	Considerações iniciais.....	275
10.2	Superestrutura .....	278
10.3	Infraestrutura .....	286
10.4	Tópicos adicionais sobre o assunto.....	287
<b>11</b>	<b>GALERIAS, CANAIS, MUROS DE ARRIMO E RESERVATÓRIOS</b> .....	291
11.1	Galerias .....	292

11.2	Canais de drenagem .....	300
11.3	Muros de arrimo.....	304
11.4	Reservatórios .....	307
<b>12</b>	<b>APLICAÇÕES</b>	
	DIVERSAS.....	313
12.1	Arquibancadas e estádios.....	313
12.2	Silos .....	314
12.3	Torres .....	317
12.4	Revestimento de túneis .....	319
12.5	Metrôs e similares .....	319
12.6	Obras hidráulicas .....	321
12.7	Obras Industriais.....	321
12.8	Elementos complementares de estradas .....	321
12.9	Construções habitacionais .....	322
12.10	Mobiliário urbano.....	322
12.11	Construções rurais .....	323
	<b>Parte 3 - Elementos de produção especializada.....</b>	<b>325</b>
<b>13</b>	<b>LAJES FORMADAS POR</b>	
	<b>VIGOTAS PRÉ-MOLDADAS .....</b>	<b>327</b>
13.1	Considerações iniciais.....	327
13.2	Comportamento estrutural e indicações para o projeto .....	328
13.3	Particularidades das lajes com vigotas treliçadas.....	331
13.4	Particularidades das lajes com vigotas protendidas.....	333
13.5	Considerações adicionais .....	334
<b>14</b>	<b>LAJES FORMADAS POR</b>	
	<b>PAINÉIS ALVEOLARES .....</b>	<b>335</b>
14.1	Considerações iniciais.....	335
14.2	Comportamento estrutural e diretrizes de projeto.....	337
14.3	Outros aspectos específicos .....	339
<b>15</b>	<b>ELEMENTOS ENTERRADOS: TUBOS CIRCULARES E</b>	
	<b>GALERIAS CELULARES.....</b>	<b>343</b>
15.1	Considerações iniciais.....	343
15.2	Tubos circulares .....	343
15.3	Galerias celulares.....	350
15.4	Considerações adicionais .....	351
<b>16</b>	<b>OUTROS ELEMENTOS: ESTACAS, POSTES,</b>	
	<b>DORMENTES E BARREIRAS .....</b>	<b>353</b>
16.1	Considerações iniciais.....	353
16.2	Estacas .....	353
16.3	Postes .....	355
16.4	Dormentes .....	358
16.5	Barreiras de obras rodoviárias .....	359
<b>A</b>	<b>EXEMPLOS</b>	
	<b>NUMÉRICOS.....</b>	<b>363</b>
A.1	Tolerâncias e folgas .....	363
A.2	Estabilidade global .....	365
A.3	Consolo e dente de concreto.....	369
A.4	Cálice de fundação .....	372

<b>B</b>	PRINCÍPIOS E VALORES DA CONSIDERAÇÃO DA SEGURANÇA DO PCI.....	379
<b>C</b>	DIMENSIONAMENTO DE APOIO DE ELASTÔMERO.....	381
<b>C.1</b>	Limite de tensão de compressão .....	382
<b>C.2</b>	Limite de tensão de cisalhamento .....	382
<b>C.3</b>	Limite de deformação de compressão (afundamento).....	382
<b>C.4</b>	Verificação da deformação por cisalhamento .....	382
<b>C.5</b>	Verificação da segurança contra o deslizamento .....	383
<b>C.6</b>	Verificação da condição de não levantamento da borda menos comprimida .....	383
<b>C.7</b>	Verificação da estabilidade .....	383
<b>C.8</b>	Outras recomendações.....	383
<b>D</b>	ALMOFADAS DE ARGAMASSA MODIFICADA .....	385
<b>D.1</b>	Considerações iniciais.....	385
<b>D.2</b>	Composição do material .....	386
<b>D.3</b>	Comportamento em relação à força uniformemente distribuída .....	388
<b>D.4</b>	Outros ensaios da almofada .....	390
<b>D.5</b>	Considerações finais .....	392
<b>E</b>	LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS: DESENVOLVIMENTO E PESQUISAS .....	393
<b>E.1</b>	Considerações iniciais.....	393
<b>E.2</b>	Ligação CAS (com armadura superior) .....	393
<b>E.3</b>	Ligação SAS (sem armadura superior).....	404
<b>E.4</b>	Quadro-síntese das pesquisas .....	405
<b>F</b>	INTRODUÇÃO AO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE CONCRETO PROTENDIDO COM PRÉ-TRAÇÃO.....	407
<b>F.1</b>	Considerações iniciais.....	407
<b>F.2</b>	Materiais e processos .....	408
<b>F.3</b>	Critérios de projeto .....	409
<b>F.4</b>	Estados-limite de serviço e determinação da força de protensão .....	412
<b>F.5</b>	Estados-limite últimos .....	415
<b>F.6</b>	Outros aspectos e considerações finais.....	417
	LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	419
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	423
	ÍNDICE REMISSIVO.....	438
	AGRADECIMENTOS E CRÉDITOS .....	453

# Parte I

FUNDAMENTOS



## 1.1 Considerações iniciais

A construção civil tem sido considerada uma indústria atrasada quando comparada a outros ramos industriais. A razão de assim considerá-la é baseada no fato de ela apresentar, de maneira geral, baixa produtividade, grande desperdício de materiais, morosidade e baixo controle de qualidade.

Uma das formas de buscar a redução desse atraso é com técnicas associadas à utilização de elementos pré-moldados de concreto. O emprego dessas técnicas recebe a denominação de *concreto pré-moldado* (CPM), e as estruturas formadas pelos elementos pré-moldados são chamadas de *estruturas de concreto pré-moldado*. Desse modo, partes da construção seriam feitas em melhores condições que as do local e depois montadas, como parte do processo construtivo.

As características do CPM possibilitam benefícios bastante importantes para a construção, tais como: diminuição do tempo de construção, melhor controle dos componentes pré-moldados e redução do desperdício de materiais na construção.

Em princípio, o seu emprego aumenta com o grau de desenvolvimento tecnológico e social do país, pois acarreta as seguintes condições favoráveis: valorização da mão de obra e maior oferta de equipamentos.

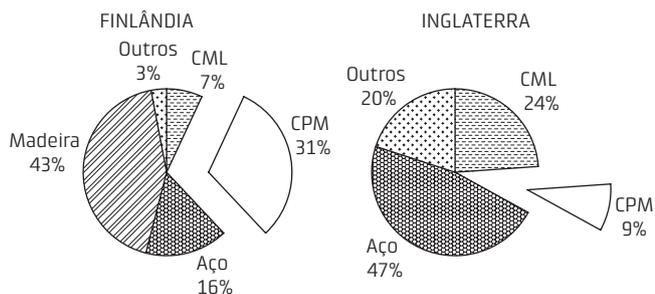
De fato, isso pode ser constatado ao comparar o custo da hora de operário de regiões mais desenvolvidas e menos

desenvolvidas. Por exemplo, o custo da hora de operário em canteiro de obra de alguns países da Europa chega a valer até cinco vezes o custo da hora de operário do Brasil. Outra comparação que ilustra essa questão é a relação do custo de um dia de trabalho especializado com o custo do metro cúbico de concreto em regiões mais desenvolvidas e menos desenvolvidas. Essa relação passa de 1,3 na Escandinávia para 0,2-0,3 em países do sudeste asiático, como a Malásia (Elliott, 2007). No Brasil, essa relação é da ordem de 0,4-0,6. Nesse sentido, vale também comparar a relação de custos de um dia de aluguel de um guindaste típico com o valor do dia de trabalho de um operário. Segundo Elliott (2007), comparando a Escandinávia com a Malásia, essa relação passa de 4-6 para 25-30. No Brasil, a relação está, *grosso modo*, na faixa de 20-30.

Merece destaque ainda o fato de que, com o CPM, estariam sendo melhoradas as condições de trabalho na construção civil. Esse aspecto afeta sobretudo os países mais desenvolvidos socialmente, e tem sido associada a essas condições de trabalho a chamada *síndrome dos três Ds*, dos termos em inglês *dirty* (sujo), *difficult* (difícil) e *dangerous* (perigoso). Mesmo em países em desenvolvimento, como o Brasil, existe uma acentuada tendência de escassez de mão de obra qualificada ou que se sujeitaria às condições de trabalho da construção civil tradicional.

Há ainda de considerar que o desenvolvimento tecnológico e social faz que as exigências da sociedade em relação

edifícios de múltiplos pavimentos apresentadas no Painel dos Projetistas do 2º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado (2PPP): o Boulevard Shopping, em Belo Horizonte (MG) (Santos, 2009), e o prédio do bacharelado em Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal (RN) (Marranhão, 2009). As apresentações com informações e detalhes dessas obras podem ser acessadas na parte *Painel dos Projetistas* do site do 2PPP (2009).



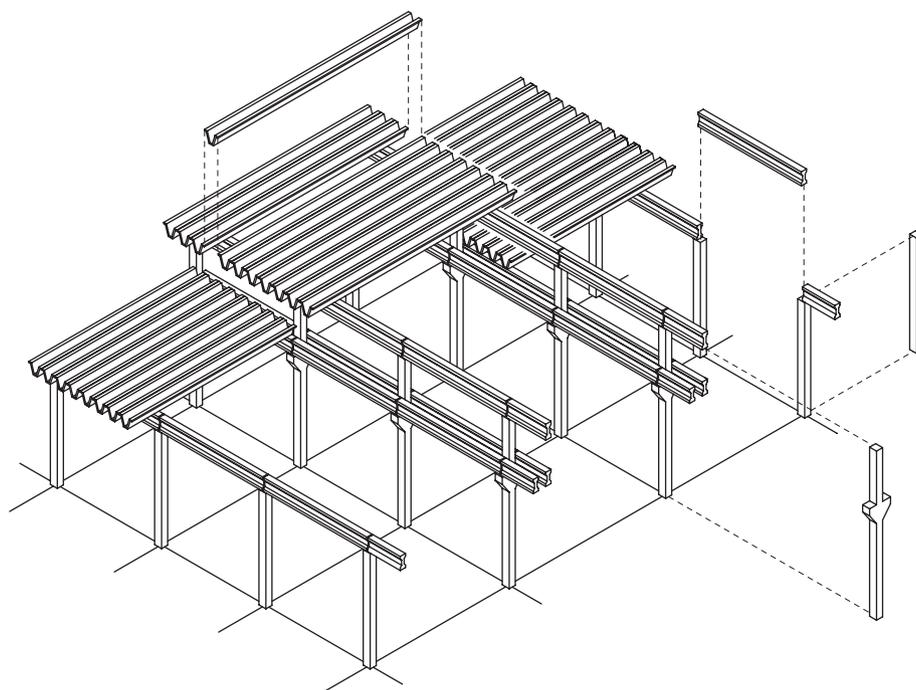
**Fig. I.2** Utilização do CPM e de outros materiais na construção de edifícios novos na Finlândia e na Inglaterra  
Fonte dos dados: Janhunen (1996) e Elliott (1996).

As construções escolares com sistemas estruturais de CPM têm sido bastante comuns no Brasil. Nessa linha, merecem destaque: a) as escolas feitas pela Fábrica de Equipamentos Comunitários (Faec), em Salvador (BA) (Latorraca, 1999), b) as construções dos Centros Integrados de Educação Pública (CIEPs), no Estado do Rio de Janeiro, c) as construções dos Centros de Atenção Integral à Criança e ao Adolescente (conhecidos pela sigla Ciac e depois Caic), em nível nacional, d) parte das construções dos Centros Educacionais Unificados (CEUs), em São Paulo (SP), e, mais recentemente, e) as construções da Fábrica de Escolas do Amanhã Governador Leonel Brizola, no Rio de Janeiro (RJ). A Fig. I.10 mostra este último caso, cujos detalhes podem ser obtidos em Importância... (2015).

Ainda como parte das aplicações em edificações, merece registro o emprego de elementos pré-moldados em coberturas. Na Fig. I.11 é apresentado um exemplo de construção com a aplicação de elementos pré-moldados com forma especial na cobertura. Trata-se dos terminais rodoviários urbanos de integração do BRT-BH, descritos em Rocha (2014).

**Quadro I.1** DENOMINAÇÃO DOS ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS DE USO MAIS COMUM

Lajes e paredes		Vigas e pilares	
	Painel alveolar		Seção retangular
	Painel pi ou TT		Seção I
	Painel U		Seção T invertido (somente vigas)



Esse tipo de edificação, correntemente denominado *galpão*, é normalmente utilizado com fins industriais ou comerciais. O sistema estrutural mostrado consiste em pilares engastados na fundação e vigas simplesmente apoiadas nos pilares, com ou sem o auxílio de consolos. A cobertura mostrada é em CPM. O fechamento pode ser também de painéis pré-moldados

**Fig. I.3** Aplicação do CPM em estrutura de esqueleto para edificação de um pavimento  
Fonte: adaptado de ABCI (1986).

fechado tem sido abandonada por limitar as demandas por uma arquitetura mais aberta. Em virtude disso, a industrialização tem sido praticada com o emprego de elementos ou produtos de catálogo, mas com uma flexibilização para atender às exigências de uma arquitetura mais aberta ou à exigência dos clientes. Por outro lado, o uso de produtos de CPM em projetos estruturais, como o da Fig. I.18, pode propiciar interessantes alternativas construtivas. Para isso, os profissionais envolvidos na construção devem encarar o emprego do CPM sem preconceito e procurar explorar o potencial das técnicas associadas à sua utilização.

Cabe destacar ainda que o uso de componentes de CPM pode acarretar importantes implicações em relação à responsabilidade sobre a construção. Embora não sejam voltadas para a situação nacional, indicações sobre o assunto podem ser vistas no manual do PCI (2010, seção 14.5) e no manual de CPM da Associação Australiana do Concreto Pré-Moldado (NPCAA, 2002, Cap. 12).

## 1.2 Formas de aplicação do CPM

Dependendo da forma como os elementos são concebidos e produzidos, o CPM pode ser enquadrado como mostra o Quadro I.3.

**Quadro I.3** FORMAS DE APLICAÇÃO DO CPM

	Formas de aplicação do CPM	
Quanto ao local de produção dos elementos	Pré-moldado de fábrica	Pré-moldado de canteiro
Quanto à incorporação de CML para ampliar a seção resistente no local de utilização definitivo	Pré-moldado de seção completa	Pré-moldado de seção parcial
Quanto à categoria do peso dos elementos	Pré-moldado pesado	Pré-moldado leve
Quanto ao papel desempenhado pela aparência	Pré-moldado normal	Pré-moldado arquitetônico

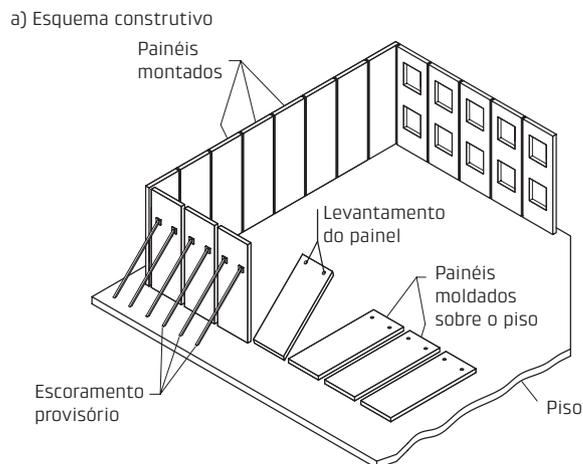
O *pré-moldado de fábrica* é aquele executado em instalações permanentes distantes da obra. Esse tipo de pré-moldado pode ou não atingir o nível de pré-fabricado, segundo o critério da NBR 9062 (ABNT, 2017a) relacionado com o controle de qualidade. A capacidade de produção da fábrica e a produtividade do processo, que dependem sobretudo dos investimentos em fôrmas e equipamentos, podem ser pequenas ou grandes, com tendência maior para o último caso. Nessa situação, deve-se considerar a questão do transporte da fábrica até a obra, no que se refere tanto ao custo dessa atividade como, principalmente, à obediência aos gabaritos de transporte e às facilidades de transporte.

Em contrapartida ao tipo anterior, o *pré-moldado de canteiro* é executado em instalações temporárias nas proximidades da obra. Essas instalações podem ser mais ou menos sofisticadas, dependendo da produção e da produtividade desejadas. Em geral, existe certa propensão à baixa

capacidade de produção e, conseqüentemente, à pequena produtividade. Para esse tipo de elemento não se tem o transporte a longa distância e, portanto, as facilidades de transporte e a obediência a gabaritos de transporte não são condicionantes para o seu emprego.

No Brasil, ao contrário do pré-moldado de canteiro, o pré-moldado de fábrica está sujeito a tributação específica, o que penaliza o seu uso e desestimula, assim, a industrialização da construção. Um estudo quantificando a tributação em caso de construção habitacional pode ser visto em FGV (2013).

Existe um tipo particular de pré-moldado de canteiro que é moldado junto ao local de utilização definitivo. Nessa situação, depois de o concreto atingir a resistência necessária, o elemento é montado com o auxílio de equipamento. Um caso representativo desse tipo de CPM é o processo chamado de *tilt-up*, em que as paredes são executadas na posição horizontal e, após o concreto atingir a resistência prevista, são levantadas para a sua posição definitiva. A Fig. I.20 ilustra esse processo, que é objeto de recomendações específicas na seção 5.6.



b) Levantamento do painel



**Fig. I.20** Processo construtivo *tilt-up*  
Fonte: b) cortesia de Vendramini Engenharia.



A produção das estruturas de concreto pré-moldado (CPM) engloba todas as atividades compreendidas entre a execução dos elementos pré-moldados e a realização das ligações definitivas.

As etapas envolvidas na produção dependem da forma de aplicação do CPM. No caso de pré-moldado de fábrica, a produção envolve as seguintes etapas: execução do elemento, transporte da fábrica à obra, montagem e realização das ligações. Em relação aos pré-moldados de canteiro, pode ser feita uma distinção entre dois casos. O primeiro corresponde à execução dos elementos literalmente ao pé da obra e para o qual a produção se resume praticamente à execução e à montagem. O segundo é aquele em que a execução é feita em local apropriado e para o qual, em comparação ao pré-moldado de fábrica, apenas não se inclui a etapa de transporte da fábrica à obra.

Por se tratar de assunto específico, o detalhamento da execução das ligações será apresentado no Cap. 3. Também as especificações das tolerâncias de execução e montagem, que afetam a produção das estruturas de CPM, serão tratadas posteriormente, no Cap. 2.

A produção das estruturas é aqui abordada de maneira relativamente superficial, pois o objetivo principal de sua apresentação é fornecer subsídios para a elaboração do projeto das estruturas de CPM.

## 1.1 Execução dos elementos

### 1.1.1 Atividades envolvidas

No caso de pré-moldado de fábrica, a execução dos elementos pré-moldados pode, em linhas gerais, ser subdividida em três fases – atividades preliminares, execução propriamente dita, e atividades posteriores –, cada qual englobando as etapas descritas a seguir (Fig. 1.1).

#### *Atividades preliminares*

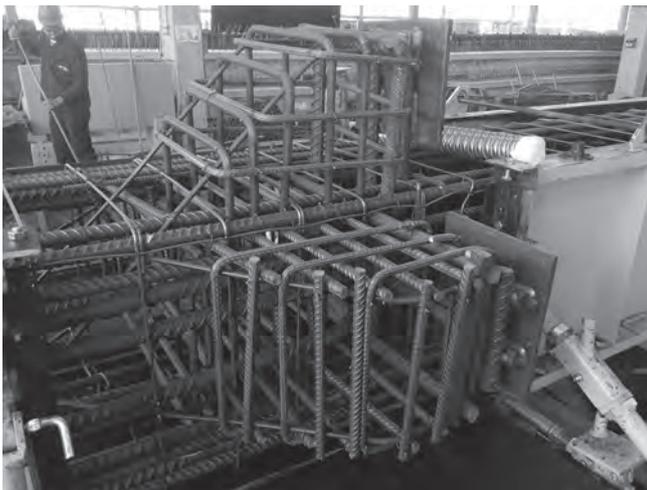
- *Preparação dos materiais:* incluem-se nessa fase o armazenamento das matérias-primas, a dosagem e a mistura do concreto, o preparo da armadura (corte e dobramento) e a sua montagem, quando for o caso.
- *Transporte dos materiais ao local de trabalho:* transporte do concreto recém-misturado e da armadura, montada ou não, até o local da moldagem.

#### *Execução propriamente dita*

- *Preparação da fôrma e da armadura:* limpeza da fôrma, aplicação de desmoldante, colocação da armadura montada ou montagem da armadura, colocação de peças complementares, como insertos metálicos, fechamento da fôrma, e aplicação da pré-tração na armadura, quando for o caso.

execução de corte e de dobra de fios, barras e telas, com maior ou menor grau de automatização. Existem também equipamentos para a retificação de fios, para o caso de fornecimento do produto em bobina.

Destaca-se também a viabilidade de empregar solda para facilitar a armação e possibilitar ancoragens mecânicas, como na ancoragem da armadura principal de consolos, apresentada no Cap. 3. Em virtude das condições em fábricas, esse recurso é bem mais confiável que a solda de campo, mas sua qualidade deve ser verificada periodicamente. Esse tipo de recurso é também adotado para a fixação dos insertos metálicos utilizados nas ligações. A Fig. 1.10 mostra o emprego de solda na ancoragem da armadura principal e na fixação de chapa metálica em armação de consolo.



**Fig. 1.10** Armação de consolo com o emprego de solda

Sempre que possível, a montagem da armadura é feita em bancadas com o auxílio de gabaritos, sendo a armadura posteriormente colocada nas fôrmas (ver Fig. 1.2a). Nesse caso, devem ser tomadas as devidas precauções no armazenamento e no manuseio das armações prontas, para que o ajuste na fôrma não seja prejudicado.

No caso de elementos grandes, em que o procedimento descrito anteriormente seria trabalhoso devido ao peso e ao manuseio da armação, a montagem é realizada na própria fôrma ou junto a ela, com certo prejuízo na racionalização dos trabalhos.

### Armadura protendida

A protensão em elementos pré-moldados de fábrica é, via de regra, com pré-tração da armadura, resultando no chamado concreto protendido com aderência inicial (CPAI). Geralmente, utilizam-se pistas de protensão de 80 m a 200 m de comprimento para a execução de vários elementos, com blocos de reação independentes ou usando a própria fôrma como estrutura de reação. Na Fig. 1.11 está esquematizado o caso típico de pista de protensão com blocos independentes.

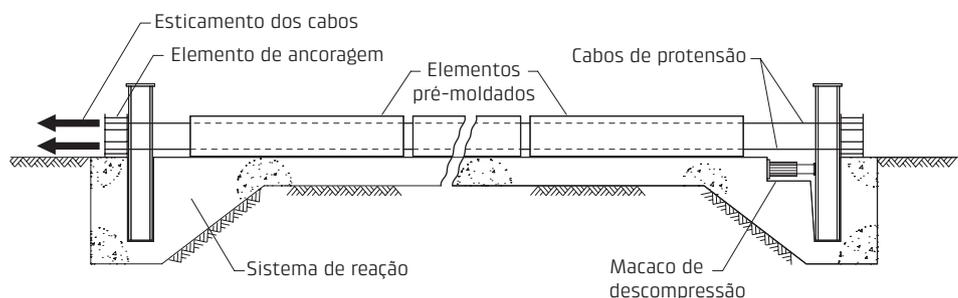
Como indicado nessa figura, nas pistas de protensão é mais comum o emprego de cabos retos. Para essas situações, uma redução da força de protensão pode ser feita nas proximidades do apoio por meio do isolamento dos cabos com mangueira plástica. Outra possibilidade, menos usual, é a combinação de cabos retos com poligonais para reduzir o efeito dos momentos fletores da protensão junto aos apoios, com um trabalho adicional para desviar a trajetória dos cabos. No Anexo F são apresentadas mais informações sobre o assunto.

Além da execução em pistas de protensão (*long line pretensioning method*), tem-se o emprego do processo de execução com fôrma móvel (*flow line pretensioning method*), já comentado anteriormente. Nesse caso, a protensão é feita para os elementos individualmente, utilizando-se a fôrma para aplicar a força de protensão. Esse modo de execução tem sido utilizado sobretudo na Europa e na Ásia, na execução de lajes, postes, estacas, dormentes etc.

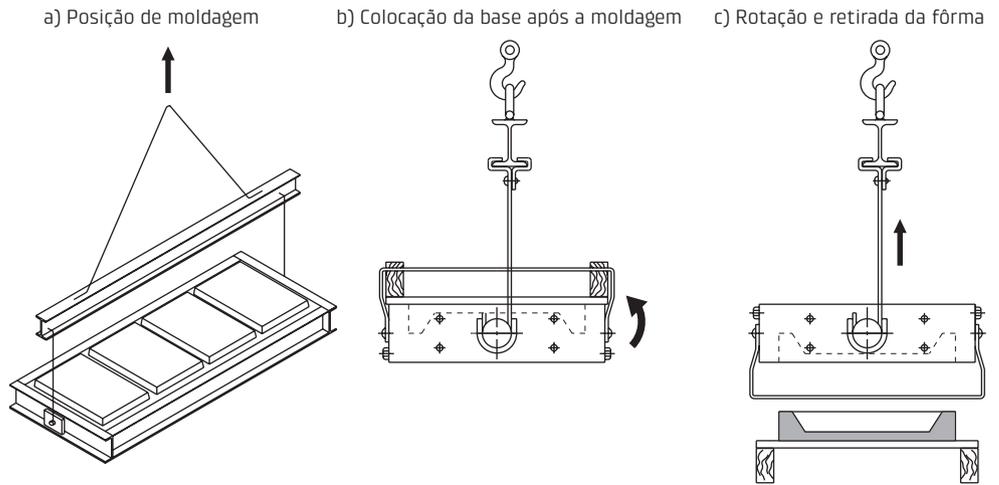
Cabe salientar ainda a utilização, pouco usual, de armaduras pré-tracionadas por cintamento contínuo, processo desenvolvido na ex-União Soviética que possibilita conformar a armadura de protensão num plano (mesa de protensão) de diversas maneiras, sendo adotado na execução de lajes e treliças.

O emprego da pós-tração praticamente se restringe ao caso de pré-moldados de canteiro de grandes dimensões, como vigas de pontes.

A pós-tração também é utilizada para solidarizar segmentos pré-moldados ou antes da montagem, ou para fazer a ligação entre os elementos no local de utilização definitivo, como pode ser visto no Cap. 3.



**Fig. 1.11** Esquema de pista de protensão com blocos independentes



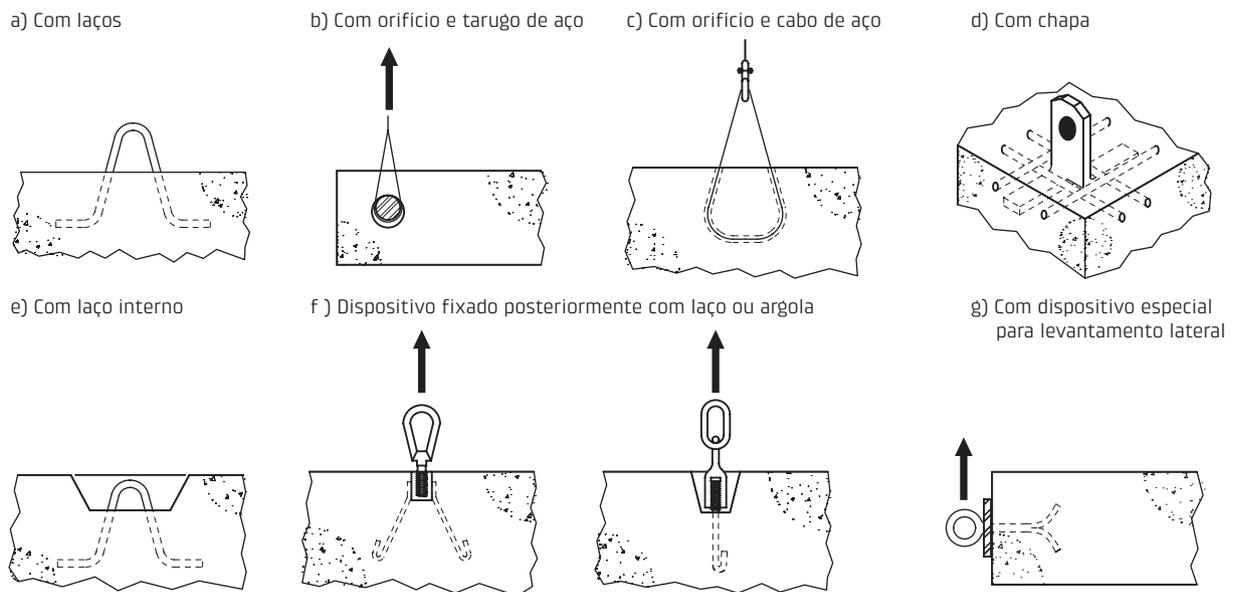
**Fig. 1.16** Exemplo de desmoldagem imediatamente após a moldagem  
 Fonte: adaptado de Dyachenko e Mirotvorsky (s.d.).

### 1.1.8 Dispositivos auxiliares para o manuseio

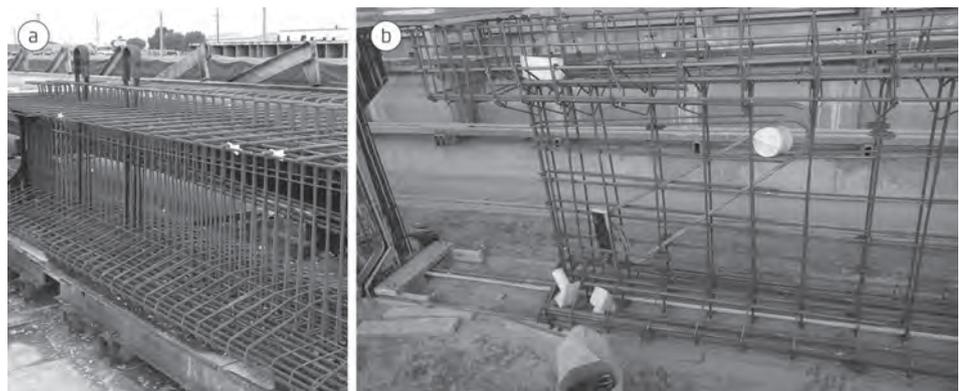
Da desmoldagem à sua colocação no local definitivo de utilização, os elementos estão sujeitos a movimentação. Para realizar essa movimentação, são necessários equipamentos e dispositivos auxiliares, exceto nos casos de elementos muito pequenos, em que essa operação é feita manualmente. Os equipamentos para transporte e monta-

gem serão vistos na sequência deste capítulo, limitando-se esta seção a apresentar os dispositivos auxiliares.

Os dispositivos auxiliares empregados para o manuseio dos elementos são, na maior parte das vezes, destinados ao içamento. Esses dispositivos são divididos em internos e externos. Os internos, mostrados nas Figs. 1.17 e 1.18, podem ser dos seguintes tipos:



**Fig. 1.17** Exemplos de dispositivos internos para o manuseio dos elementos



**Fig. 1.18** Exemplos de dispositivos internos: a) alça de içamento com cordalhas de protensão e b) com orifício para posterior colocação de tarugo

na obra, em geral, em posição diferente da de serviço. Nesse caso, é comum ter que fazer a rotação do elemento à medida que ele é levantado. Algumas formas de realizar a rotação estão indicadas na Fig. 1.37.

Uma regra geral que se deve ter em mente no manuseio é que os pontos de içamento devem ficar acima do centro de gravidade dos elementos, para que o seu equilíbrio seja estável.

Os sistemas estruturais de paredes portantes apresentam características especiais de montagem, pois, via de regra, é necessário prever escoramentos para os painéis. Esse procedimento é esquematizado na Fig. 1.38. Os painéis devem permanecer escorados até a efetivação das ligações.

Para edifícios de múltiplos pavimentos, essa sequência se repete para cada andar.

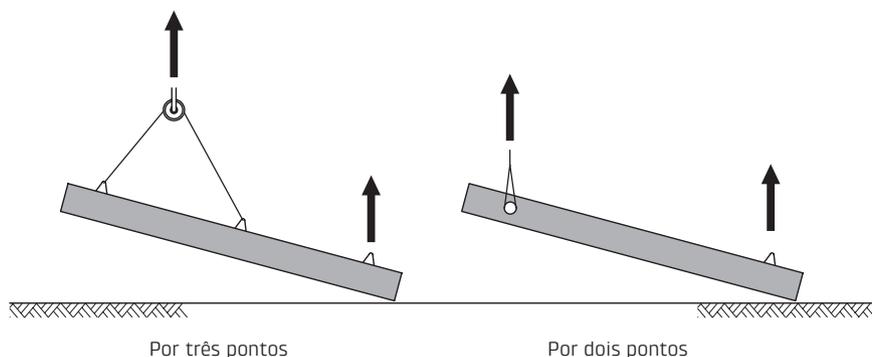
A montagem de painéis alveolares, feitos por extrusão ou fôrma deslizante, constitui um caso à parte, pelo fato de os dispositivos internos de manuseio serem evitados.

Cabe registrar ainda que em determinadas situações é feita, no canteiro, a montagem de elementos estruturais a partir de segmentos. Posteriormente, esses elementos são colocados na posição de utilização definitiva.

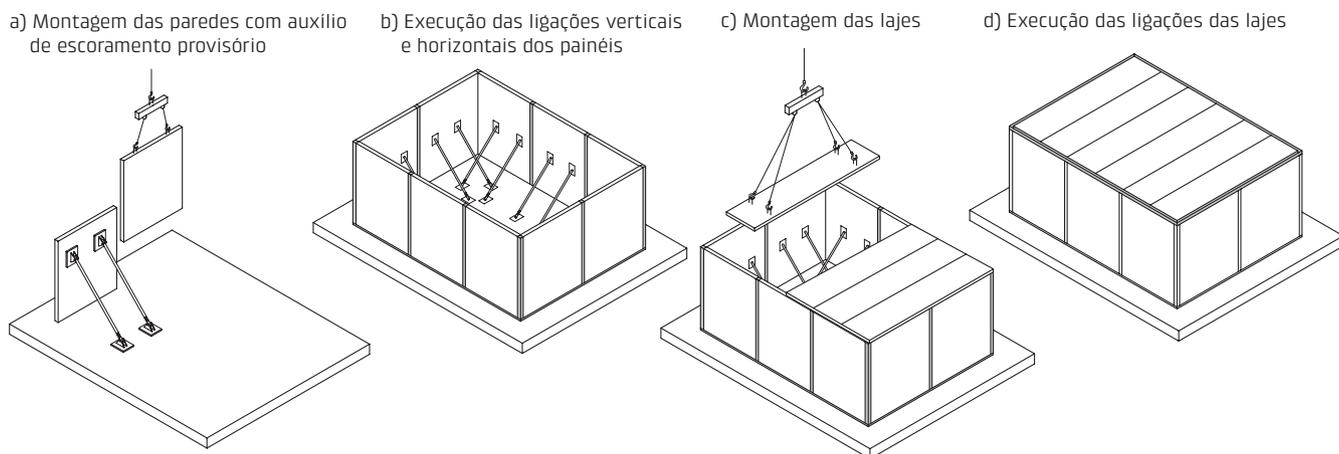
Naturalmente, existem situações que não se enquadram nas anteriores e que exigem estudos específicos, como a mostrada em Isozaki et al. (1999), sobre a montagem de painéis curvos.



**Fig. 1.36** Exemplo de dispositivo auxiliar de montagem de pilar: a) montagem com o dispositivo e b) montagem com o dispositivo fixado



**Fig. 1.37** Possibilidades de levantamento e rotação de elementos



**Fig. 1.38** Sequência de montagem de um andar de estrutura de parede portante



# PROJETO DOS ELEMENTOS E DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO



Este capítulo trata das indicações para o projeto dos elementos e das estruturas de concreto pré-moldado (CPM), abordando inicialmente tópicos gerais e posteriormente tópicos específicos. Nesse sentido, são fornecidas indicações enfocando os seguintes tópicos gerais: princípios gerais, forma dos elementos pré-moldados, elementos para a análise estrutural e recomendações para o projeto estrutural. Nos tópicos específicos são tratados dos seguintes assuntos: tolerâncias e folgas, cobertura da armadura, situações transitórias e procedimentos para a análise da estabilidade global das estruturas de CPM de edifícios. Outros tópicos específicos são ainda apresentados no Cap. 5.

## 2.1 Princípios e recomendações gerais

### 2.1.1 Princípios gerais

Os princípios gerais que devem nortear o projeto das estruturas formadas por elementos pré-moldados são exibidos no Quadro 2.1. A discussão de cada um deles é realizada nas seções que se seguem.

Deve-se encarar os princípios apresentados não como metas, mas sim como diretrizes gerais, pois devem ser analisadas as situações específicas de cada caso. A não obediência a alguns deles não resulta necessariamente numa

solução inadequada nem inviabiliza o emprego do CPM. No entanto, não levá-los em conta fará com que o emprego do CPM seja provavelmente muito difícil de ser viabilizado.

Destaca-se também que esses princípios estão direcionados para a industrialização da construção. Por esse motivo, eles deixam de ser importantes no caso de empregar-se o CPM como uma forma de racionalizar a construção.

#### Quadro 2.1 PRINCÍPIOS GERAIS PARA O PROJETO DE ESTRUTURAS DE CPM

Conceber o projeto da obra visando à utilização do CPM

Resolver as interações da estrutura com as outras partes da construção

Minimizar o número de ligações

Minimizar o número de tipos de elemento

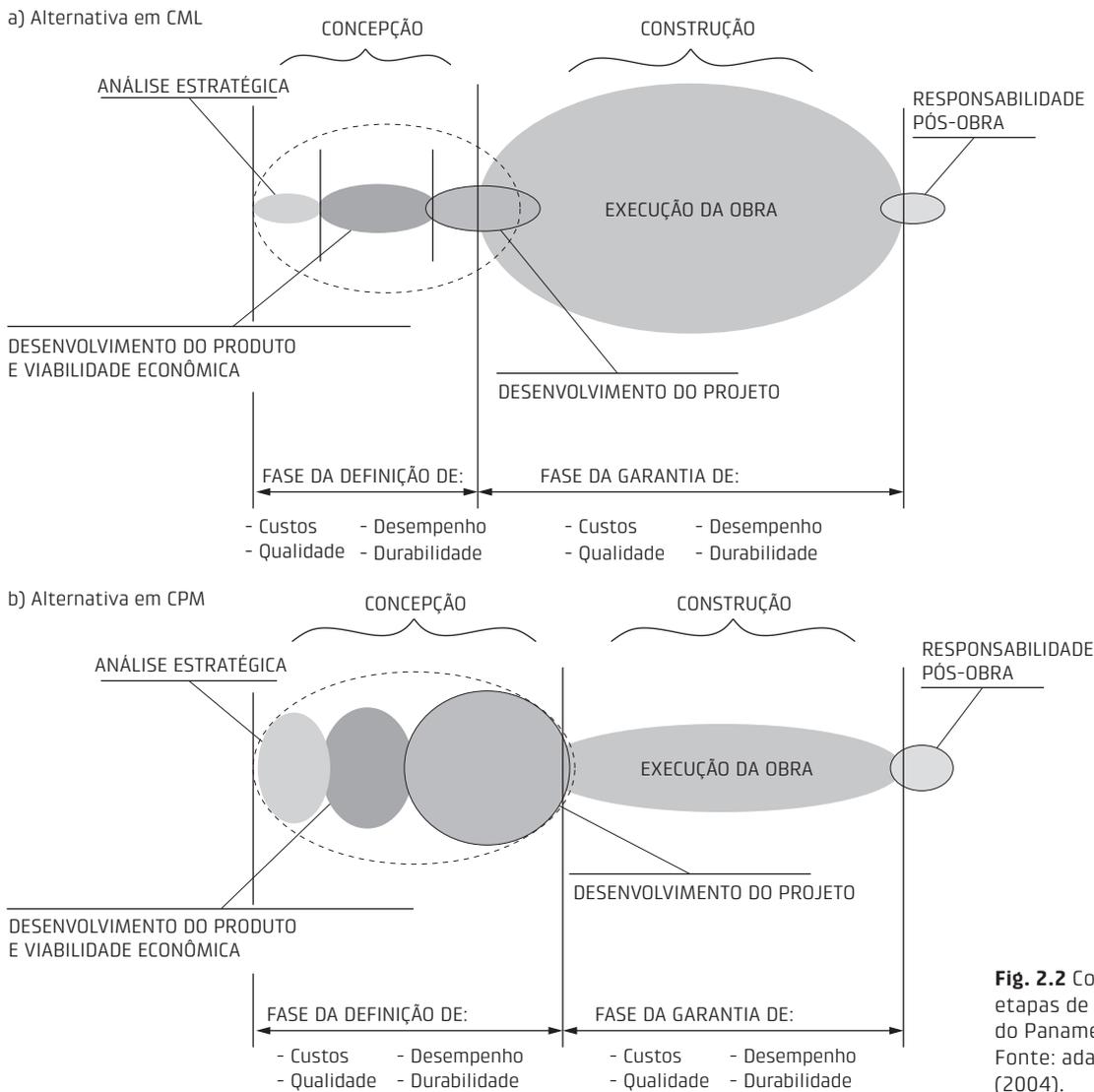
Utilizar elementos de mesma faixa de peso

*Conceber o projeto da obra visando à utilização do CPM*  
O ideal seria que a construção fosse projetada, desde a sua fase inicial, já prevendo a aplicação do CPM. Dessa forma, em função das características da obra, como vãos, alturas e cargas de utilização, seria possível tirar melhor partido da potencialidade do CPM.

Nesse princípio está implícito que na concepção do projeto da construção deve ser considerada a forma da sua

tura em elementos. Evidentemente, isso está vinculado às limitações de transporte, quando houver, à disponibilidade de equipamento de montagem e aos custos relacionados a essas etapas. Nesse princípio, deve-se ter também em conta

o tipo de ligação. De forma geral, as ligações articuladas são mais simples, mas é necessário aumentar a rigidez dos elementos pré-moldados, ao passo que as ligações que transmitem momento fletor são mais trabalhosas.



**Fig. 2.2** Comparação entre as etapas de concepção e construção do Panamerica Park  
Fonte: adaptado de Prelorentzou (2004).

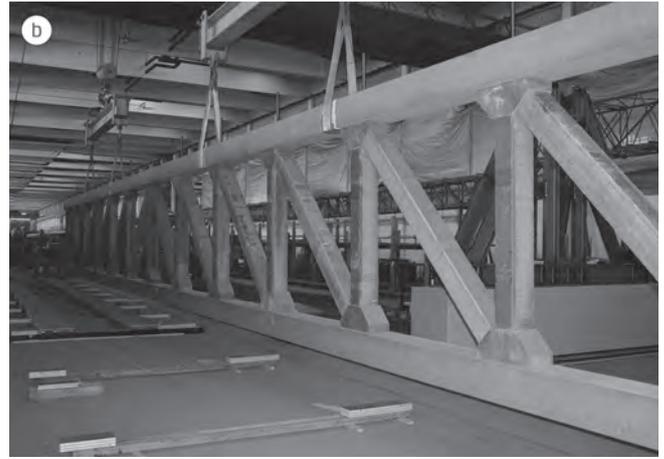
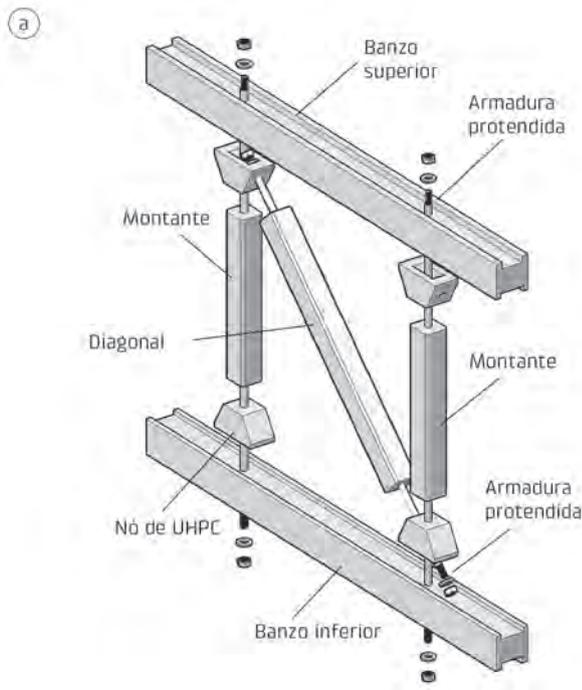
a) Inicial – 30/6/2000



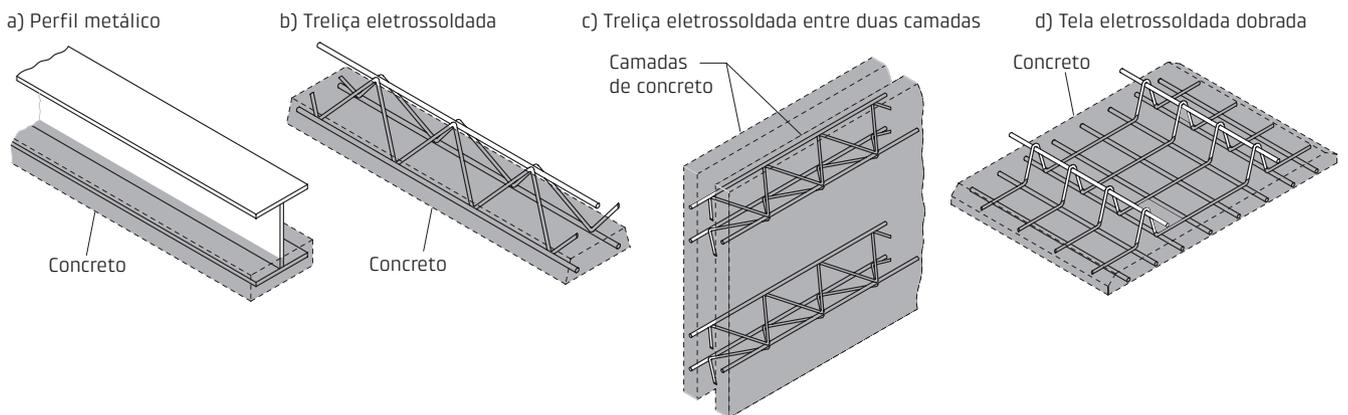
b) Final – 31/3/2001



**Fig. 2.3** Fases inicial e final da execução da estrutura do Panamerica Park  
Fonte: Prelorentzou (2004).



**Fig. 2.13** Exemplo de vigas com abertura entre banzos de UHPC: a) componentes e b) treliça montada para ensaios  
Fonte: a) adaptado de Tue (2009) e b) Tue (2009).



**Fig. 2.14** Exemplos de aplicação de armadura externa rígida em elementos pré-moldados

Esse assunto ainda tem grande importância quando se levam em conta aspectos da sustentabilidade das construções, pois está diretamente relacionado com a redução do consumo de materiais. Assim, o que se discute nesta seção vai além do custo direto e indica um efeito favorável para o CPM em relação à sustentabilidade da construção.

## 2.3 Elementos para a análise estrutural

No projeto e na análise das estruturas formadas de elementos pré-moldados, devem ser considerados os aspectos apresentados no Quadro 2.2, que serão discutidos nas seções a seguir.

### 2.3.1 Análise do comportamento da estrutura pronta

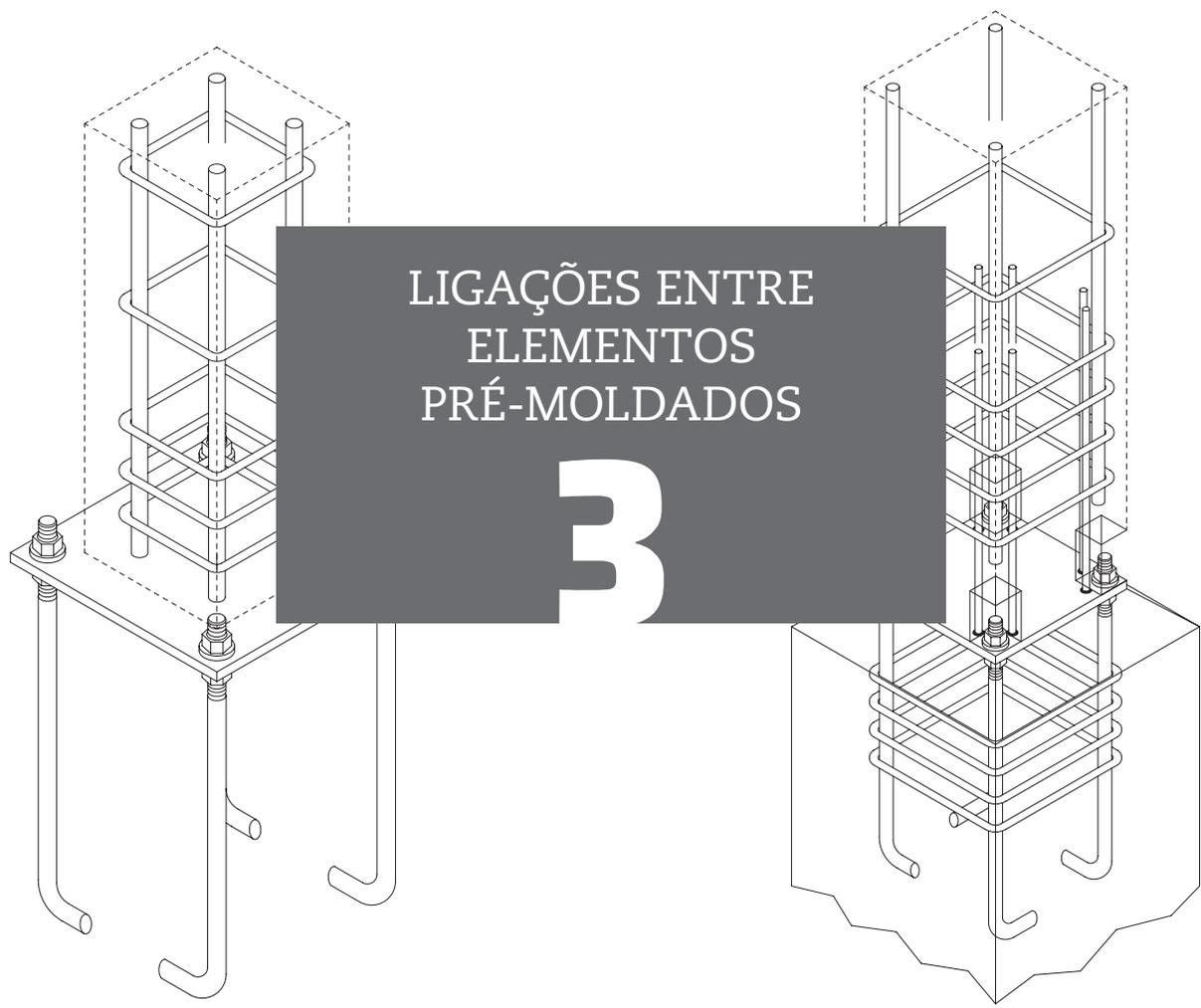
Após as ligações definitivas serem efetivadas, dois aspectos merecem ser comentados: a modelagem do comportamento da estrutura e a modelagem das ligações.

#### Quadro 2.2 ASPECTOS QUE DEVEM SER CONSIDERADOS NO PROJETO E NA ANÁLISE ESTRUTURAIIS

Análise do comportamento da estrutura pronta
Incertezas na transmissão de forças nas ligações
Ajustes na introdução de coeficientes de segurança
Disposições construtivas específicas
Possíveis mudanças do esquema estático
Situações transitórias

No cálculo da estrutura pronta, aplicam-se os mesmos procedimentos adotados para as estruturas de CML, levando em conta a presença de ligações. Normalmente, são feitas análises considerando o comportamento elástico linear do material. Assim como nas estruturas de CML, a análise estrutural considerando a não linearidade física do material pode ser empregada, mas não é usual.

Em geral, as ligações são idealizadas com vinculação ideal, como articulações e ligações perfeitamente rígidas.



### 3.1 Considerações iniciais

As estruturas de concreto pré-moldado (CPM) caracterizam-se por apresentar facilidade de execução e de controle de qualidade dos elementos pré-moldados. Por outro lado, a necessidade de realizar as ligações entre os elementos constitui um dos principais problemas a serem enfrentados no seu emprego.

Em geral, as ligações são as partes mais importantes no projeto das estruturas de CPM. Elas são de fundamental importância tanto para a produção da estrutura (execução de parte dos elementos adjacentes às ligações, montagem da estrutura e execução das ligações propriamente ditas) como para o comportamento da estrutura finalizada, e ainda para a manutenção.

Conforme dito anteriormente, ligações mais simples normalmente acarretam estruturas mais solicitadas aos momentos fletores. Em contrapartida, ligações que tendem a reproduzir o comportamento das estruturas de concreto moldado no local (CML), pela transmissão de momentos fletores entre os elementos, requerem mais trabalho, reduzindo em parte as vantagens do CPM. As dificuldades da execução deste último tipo de ligação são devidas às necessidades de fazer a ligação tanto do concreto como do aço, pelo fato de o concreto armado ser um material composto, de ter que aco-

modar as tolerâncias que intervêm nas várias fases e, ainda, pelo fato de o concreto ser um material relativamente frágil.

As ligações têm recebido uma abordagem distinta das principais entidades que promovem o CPM, o PCI e a Comissão 6 da fib. O PCI tem uma publicação específica sobre o assunto, o manual de ligações (PCI, 2008), que mostra ligações típicas, com algumas indicações de cálculo, sendo a parte conceitual exibida no seu manual de CPM (PCI, 2010). Já a Comissão 6 da fib apresenta uma forte conceitualização do assunto no boletim 43 (fib, 2008), mas não tem uma publicação sobre ligações típicas. De certa forma, a publicação da Society for Studies on the Use of Precast Concrete (Stupré, 1978) preenche a lacuna dos detalhes das ligações junto à comunidade europeia.

Neste livro apresenta-se tanto a conceitualização do assunto como algumas ligações típicas, com maior ênfase na conceitualização, que é tratada na parte inicial deste capítulo.

No sentido de fornecer uma primeira noção dos vários tipos de ligação, bem como de introduzir certas denominações, são mostradas a seguir algumas formas de classificar as ligações.

- a. Quanto ao tipo de vinculação com o momento fletor
  - *ligação articulada*: não transmite momento fletor;
  - *ligação rígida*: transmite momento fletor;

**Tab. 3.1** VALORES DO COEFICIENTE DE ATRITO DO MODELO DE ATRITO-CISALHAMENTO

Tipos de interface	$\mu$ recomendado	$\mu_{ef}$ máximo	$V_u/\phi$ (força última em kN)
Concreto $\times$ concreto, moldados monoliticamente	$1,4\lambda$	3,4	$0,30\lambda f_{ck} A_{Cr} \leq 6.904\lambda A_{Cr}$
Concreto $\times$ concreto endurecido, com superfície rugosa	$1,0\lambda$	2,9	$0,25\lambda f_{ck} A_{Cr} \leq 6.904\lambda A_{Cr}$
Concreto $\times$ concreto endurecido, com superfície não rugosa	$0,6\lambda$	Não aplicável	$0,20\lambda f_{ck} A_{Cr} \leq 5.523\lambda A_{Cr}$
Concreto $\times$ aço	$0,7\lambda$	Não aplicável	$0,30\lambda f_{ck} A_{Cr} \leq 5.523\lambda A_{Cr}$

Fonte: adaptado de PCI (2010).

No desenvolvimento, principalmente, e no aperfeiçoamento das ligações, os modelos físicos e os ensaios em protótipos são ferramentas extremamente importantes. A Fig. 3.20 mostra o ensaio de protótipos de ligação pilar-fundação por meio de cálice de fundação. Nesse ensaio, o pilar está submetido à flexocompressão aplicada pelo atuador e pela estrutura de reação. O ensaio foi empregado em um extenso programa experimental realizado no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, cujos principais resultados são apresentados na seção 3.7.1.

Nas pesquisas, sobretudo, e no projeto, pode-se associar modelos numéricos e físicos para validar ou aprimorar modelos para o projeto, como o modelo de biela e tirante, tanto para a transferência de esforços localizados como para as ligações.

## 3.4 Recomendações e detalhes construtivos

### 3.4.1 Diretrizes para o projeto e a execução

As publicações específicas sobre ligações de CPM, como o manual do PCI (2010), a publicação da Stupré (1978) sobre

detalhes das ligações de CPM e o boletim 43 da fib (2008), trazem uma série de recomendações e detalhes para o projeto e a execução das ligações, incluindo as partes dos elementos adjacentes a elas.

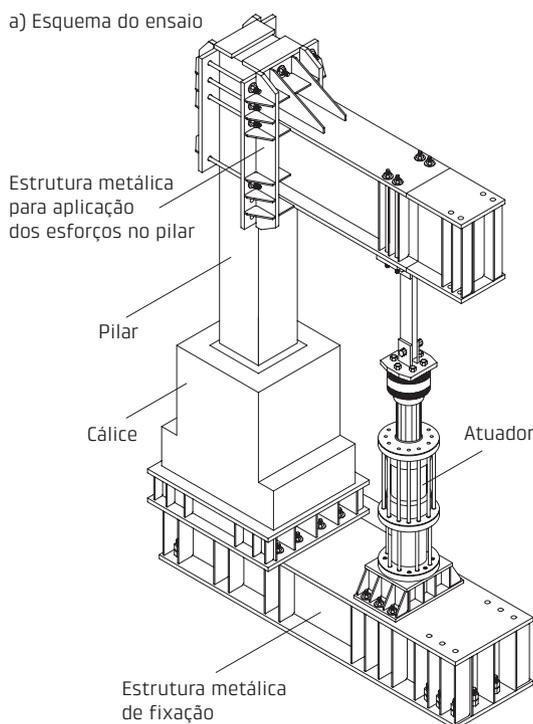
Com base principalmente nessas publicações, esse assunto é colocado na forma das diretrizes descritas a seguir.

- Padronizar os tipos de ligação e dispositivo nelas utilizados e usar poucas variações deles

A padronização das ligações é recomendada como parte da padronização do sistema construtivo industrializado, cuja importância já foi destacada no Cap. 2.

- Evitar congestionamento da armadura e dos dispositivos metálicos junto às ligações

Em geral, na região das ligações ocorre uma concentração de armadura. Caso não se tomem precauções, pode haver um congestionamento de armadura e dispositivos metálicos, quando for o caso. Esse congestionamento pode dificultar a concretagem do local, podendo acarretar falhas. Esse problema é menos grave com o emprego do concreto autoadensável (CAA), mas mesmo assim deve ser levado em conta. Para evitar o congestionamento, é necessário fazer



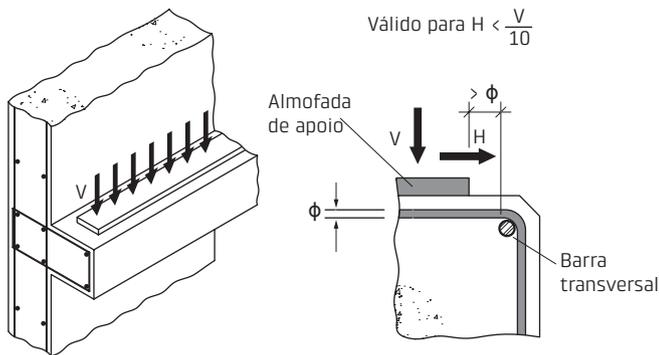
b) Vista geral do ensaio



**Fig. 3.20** Exemplo de ensaio de ligação de pilar em cálice de fundação

f. Detalhes construtivos

Devem ser tomados os devidos cuidados no detalhamento da almofada de apoio e da armadura dos consolos. A NBR 9062 (ABNT, 2017a) fornece uma série de indicações a esse respeito.



**Fig. 3.44** Ancoragem da armadura do tirante dobrando a armadura para baixo (com exceção para consolos muito largos e força horizontal de pequena magnitude)  
Fonte: adaptado de Leonhardt e Mönning (1978b).

3.5.2 Dentes de concreto

Assim como os consolos, o emprego de dentes de concreto é bastante comum no CPM. Esse tipo de elemento também é chamado de dente Gerber e apoio em viga com recorte. Alguns casos de dentes de concreto são mostrados na Fig. 3.45.

Nesses casos, ocorrem elevadas tensões de cisalhamento devido à redução da altura do elemento na região do apoio, resultando em um complexo mecanismo de transferência, bem como uma elevada concentração de armadura.

O comportamento dos dentes pode ser considerado, numa primeira aproximação, como o dos consolos mais a parte de transferência dos esforços nas adjacências da viga. No entanto, o apoio da biela de compressão, que sai da posição da força, é de forma diferente, sendo menos rígido se comparado com o consolo. Mas, em geral, aplica-se o mesmo critério de dimensionamento de consolos para a parte saliente do dente.

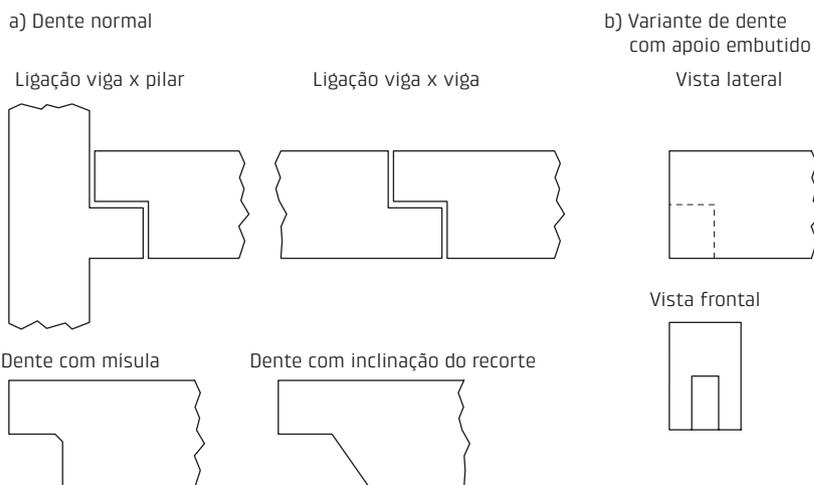
As possibilidades de ruína são praticamente aquelas do consolo, conforme mostrado na seção anterior, mais aquelas junto à viga. Estas últimas são das seguintes formas:

- ruína por escoamento da armadura que cruza a fissura que sai do canto reentrante (Fig. 3.46b);
- ruína segundo a fissura que sai do canto inferior, por falta ou deficiência de ancoragem das armaduras que chegam ao canto inferior (Fig. 3.46c).

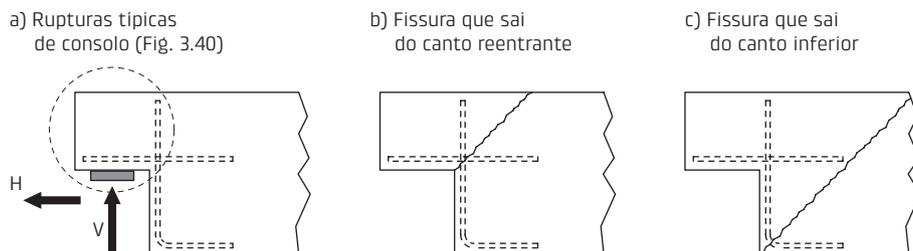
A inclinação dessas fissuras depende da relação entre a altura do consolo ( $h_d$ ) e a altura da viga ( $h_{vig}$ ), conforme indicado na Fig. 3.47. Quanto menor a relação  $h_d/h_{vig}$ , mais as fissuras tendem à direção horizontal. Observa-se também nessa figura que a existência do chanfro no canto reentrante evita a formação de uma fissura principal que sai do canto, além do que a existência do chanfro retarda o aparecimento da fissuração.

Assim como nos consolos, deve ser prevista força horizontal no dimensionamento dos dentes. Também se aplicam as indicações para consolos relativas à introdução de coeficientes adicionais de segurança.

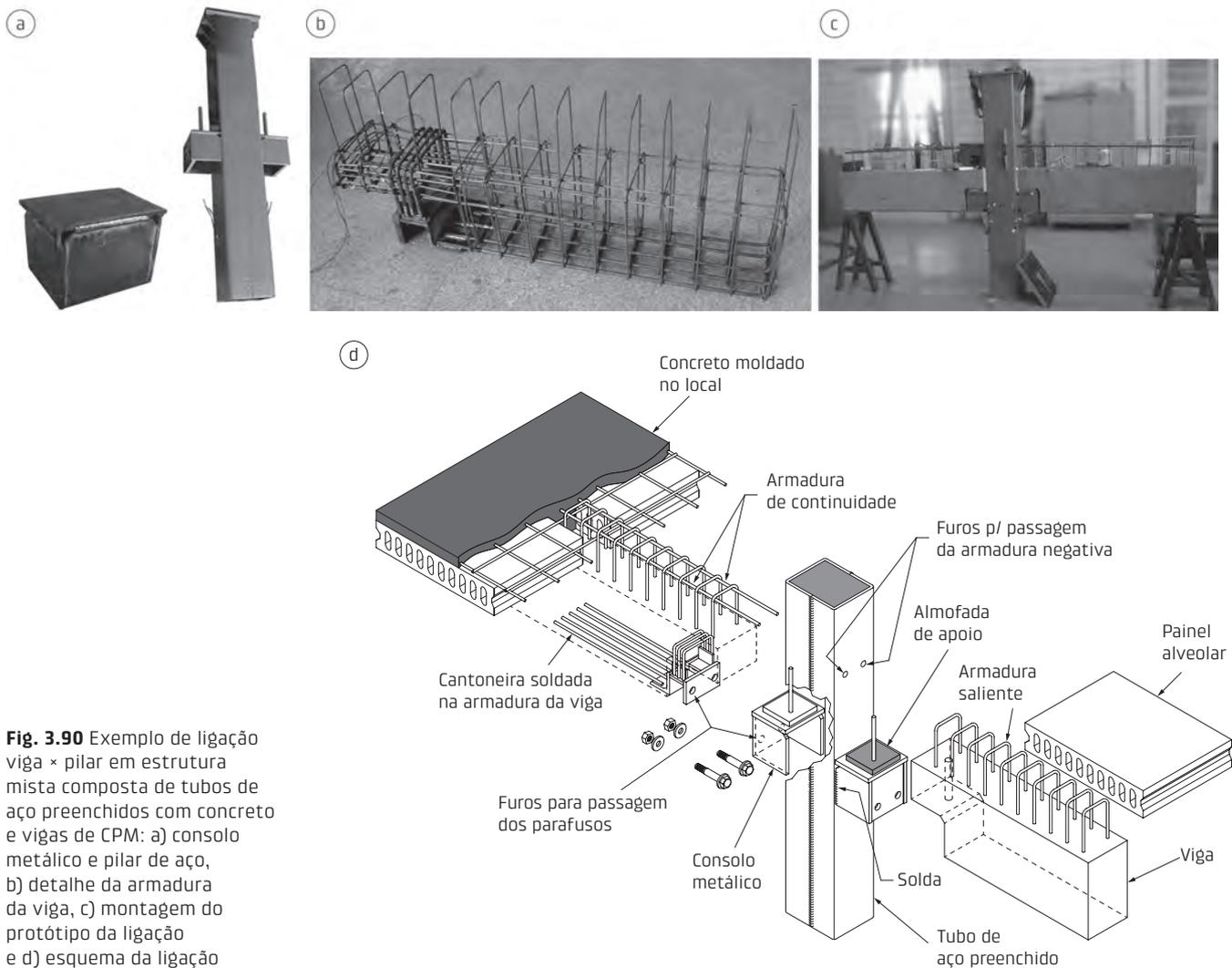
As formas de transmissão dos esforços nos dentes de concreto, bem como a disposição das armaduras, podem



**Fig. 3.45** Formas de dentes de concreto



**Fig. 3.46** Formas de ruína nos dentes de concreto



**Fig. 3.90** Exemplo de ligação viga × pilar em estrutura mista composta de tubos de aço preenchidos com concreto e vigas de CPM: a) consolo metálico e pilar de aço, b) detalhe da armadura da viga, c) montagem do protótipo da ligação e d) esquema da ligação  
 Fonte: adaptado de Bezerra, El Debs e El Debs (2011).

Em algumas alternativas de ligação viga × pilar rígida, são feitos estrangulamentos nos pilares. Com esse artifício, pode-se obter uma ligação viga × pilar com características bastante próximas das de estruturas de CML. Cabe observar, no entanto, que os estrangulamentos devem ser realizados de forma a garantir a resistência do pilar em face das solicitações nas situações transitórias. Algumas alternativas de estrangulamento nos pilares, junto à ligação com as vigas ou as lajes, são mostradas na Fig. 3.91.

Devido à sua utilização em grande número, à importância na montagem e à estética, têm sido constantemente procuradas novas alternativas para a ligação viga × pilar. Essa busca tem resultado, em geral, em dispositivos que visam esconder o consolo e promover uma montagem rápida. Existem várias alternativas para ligações articuladas e para ligações rígidas. Alguns dispositivos podem ser vistos em publicações sobre o assunto, como El-Ghazaly e Al-Zamel (1991), Englekirk (1995), Mohamed (1995), Reinhardt e Stroband (1978) e Walraven (1991). Geralmente, esses dispositivos são patenteados.

### 3.6.2 Ligações em elementos tipo folha

Os elementos tipo folha incluem as placas, as chapas e as cascas. Esse assunto é aqui direcionado para as ligações de elementos de lajes e de paredes.

Essas ligações podem ser classificadas conforme mostrado na Fig. 3.92 e no Quadro 3.4, em que estão indicadas ainda as principais tensões ou esforços transmitidos nas ligações. Essa classificação é direcionada para o caso mais comum de lajes formadas por elementos dispostos em uma direção.

De maneira geral, nesses tipos de ligação são transmitidas tensões de cisalhamento e tensões devidas à força normal. As tensões de cisalhamento podem ser segundo o plano dos elementos ou segundo o plano perpendicular ao dos elementos que concorrem na ligação.

Nas Figs. 3.93 a 3.98 são exibidos exemplos de ligações dos seguintes tipos: parede × fundação, parede × parede na direção horizontal, laje × laje sobre viga, laje × parede, laje × laje na direção longitudinal dos elementos e parede × parede na direção vertical.

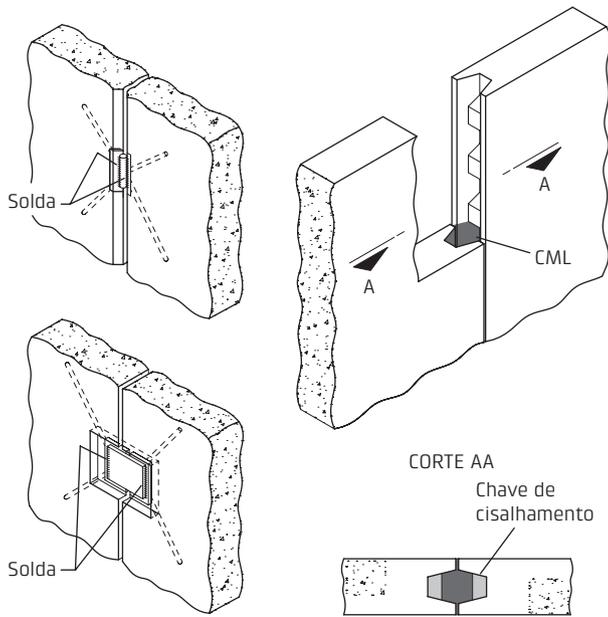


Fig. 3.98 Ligações parede × parede na direção vertical

### 3.6.3 Ligações de elementos não estruturais com a estrutura principal

Nas ligações de elementos não estruturais, tais como painéis de concreto arquitetônico, com a estrutura principal (de CPM, de CML ou metálica), normalmente se recorre a dispositivos metálicos.

As ligações empregadas nesses casos podem ser enquadradas em três tipos básicos:

- ligações de apoio vertical* (Fig. 3.99a): essa ligação é responsável pela transmissão do peso próprio do elemento para a estrutura principal, podendo ou não permitir o movimento horizontal;
- ligações de apoio lateral* (Fig. 3.99b): esse caso corresponde às ligações que transmitem as forças horizontais devido à ação do vento e que permitem, em geral, os movimentos no plano do elemento;
- ligações de alinhamento* (Fig. 3.99c): esse tipo de ligação é empregado para impedir o deslocamento relativo entre os painéis, de forma que o esforço principal transmitido é o cisalhamento.

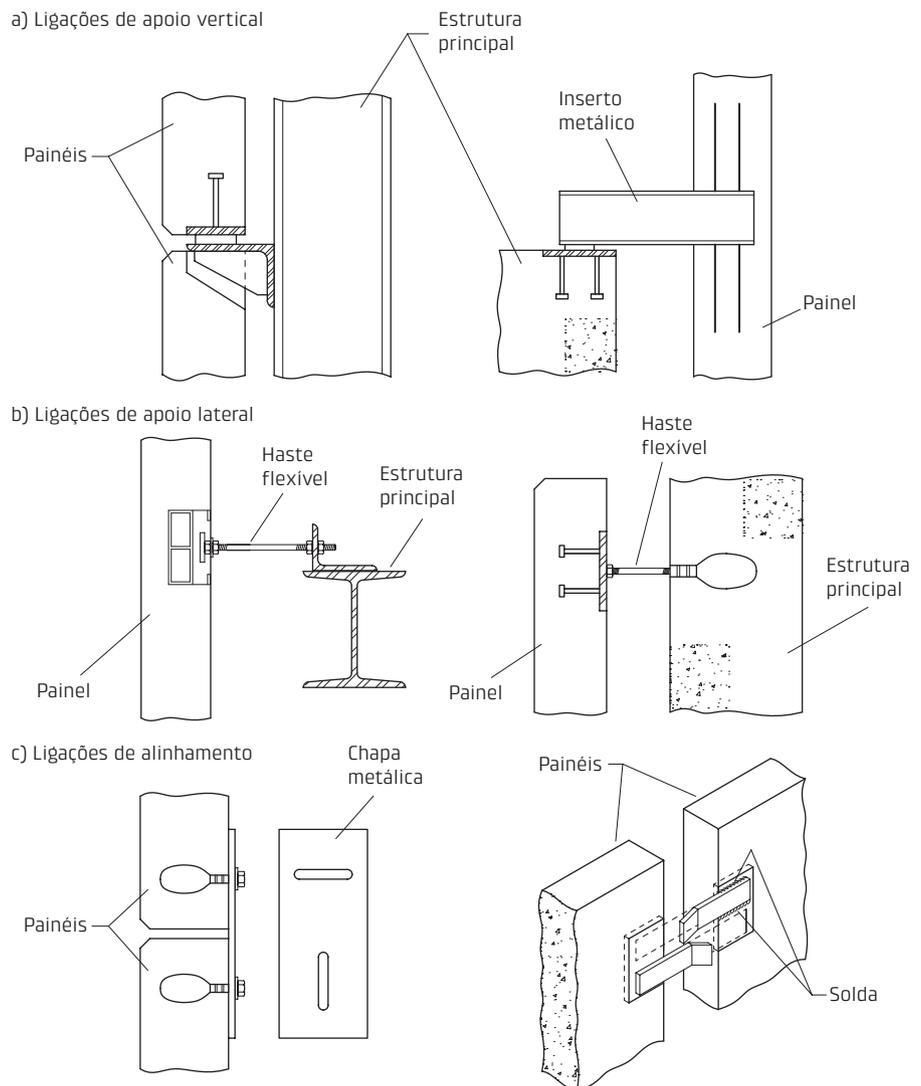
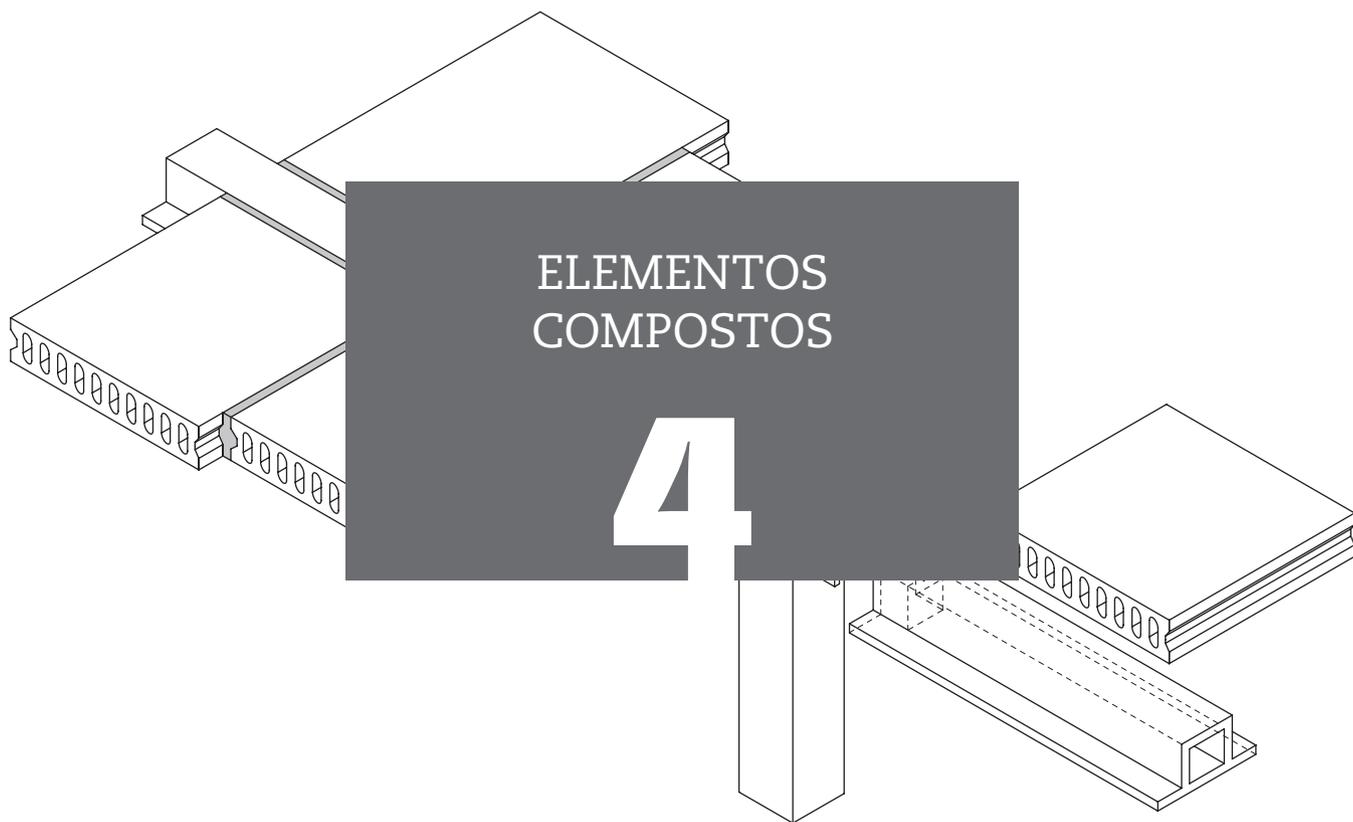


Fig. 3.99 Tipos de ligação de elementos não estruturais com a estrutura principal  
Fonte: adaptado de PCI (1988).



## 4.1 Considerações iniciais

Conforme adiantado na seção I.2, os elementos compostos são aqueles executados com elementos pré-moldados de seção parcial, cuja seção resistente é completada com concreto moldado no local (CML). Exemplos de seções transversais em que essa ideia é utilizada são mostrados na Fig. 4.1.

Em geral, nesses casos o elemento pré-moldado serve de fôrma para o concreto lançado no local, dispensando ou reduzindo drasticamente o uso de fôrmas e cimbramento. Além disso, normalmente a armadura, ou pelo menos grande parte dela, está incorporada no elemento pré-moldado. Desse modo, os serviços de armação no local ficam praticamente eliminados. Mesmo em situações nas quais haja a colocação de armadura negativa para estabelecer continuidade entre vãos adjacentes, esses serviços serão também bastante reduzidos. Assim, a parte executada no local não traz grandes dificuldades e não reduz muito as vantagens do CPM.

Uma característica dos elementos compostos é a possibilidade de utilizar elementos pré-moldados mais leves em comparação com os de seção completa, uma vez que parte da seção é moldada no local.

Outra característica importante é a facilidade de realizar as ligações entre os elementos pré-moldados, devido ao CML. Esse concreto também confere aos elementos compostos um comportamento de conjunto mais efetivo em relação às soluções exclusivamente pré-moldadas, o que justifica a denominação de *estruturas monolíticas de elementos pré-moldados* também encontrada nas publicações sobre o assunto.

Assim, com o emprego dos elementos compostos, é possível se beneficiar de grande parte das vantagens do CPM, como as facilidades de execução dos elementos, e também das vantagens das soluções em CML, sem necessitar de maior trabalho envolvendo fôrmas, cimbramento e armação.

A associação de concreto pré-moldado (CPM) com CML tem sido bastante empregada em pavimentos de edificações e em tabuleiros de pontes. Cabe destacar que existem sistemas construtivos em que essa ideia é levada ao extremo, nos quais todos os componentes da estrutura são de seção parcial, mediante a utilização de pré-laje, pré-viga e pré-pilar.

Naturalmente, ocorrem alguns inconvenientes da execução das estruturas de CML, que devem ser levados em conta na escolha dessa forma de CPM. Em virtude disso, justificam-se alternativas de emprego de tabuleiro de

Levando em conta que a parcela  $\Delta M/z_{c,loc}$  representa a variação da força resultante  $\Delta R_{c,loc}$  no trecho  $\Delta x$ , obtém-se a seguinte expressão:

$$\tau_m = \frac{\Delta R_{c,loc}}{b_{int} \Delta x} \quad (4.7)$$

**Estado fissurado (Fig. 4.13)**

No caso em que as tensões de compressão estão na sua totalidade acima da interface, ou seja, a linha neutra está na parte de concreto moldada no local, conforme mostra a figura, a tensão de cisalhamento pode ser calculada por:

$$\tau = \frac{V}{z b_{int}} \quad (4.8)$$

em que  $z$  pode ser estimado em  $0,85d$  a  $0,9d$ .

Quando a linha neutra se encontra abaixo da interface (Fig. 4.14), deve ser feita uma modificação na expressão anterior, que resulta em:

$$\tau = \frac{V}{z b_{int}} \left( \frac{R_{c,loc}}{R_c} \right) \quad (4.9)$$

O cálculo das tensões médias de cisalhamento na interface, por meio da variação da resultante de compressão da parte de concreto moldada no local, pode ser feito com expressões simples. Um exemplo desse tipo de cálculo é apresentado na Fig. 4.15, na qual são considerados o diagrama retangular de tensões de compressão no concreto e a tensão média de cisalhamento entre o ponto de momento nulo e o ponto de momento máximo ou mínimo.

Vale mencionar que existem outras formas de calcular a tensão solicitante na interface, tais como as apresentadas em Gohnert (2000) e no boletim 43 da fib (2008).

As tensões solicitantes na interface dependem também da sequência construtiva. Assim, por exemplo, se a

capa estrutural for moldada sem que haja cimbramento, o elemento pré-moldado vai se deformar livremente com o peso da capa e vai endurecer sem produzir cisalhamento na interface. Dessa forma, as ações que produzem cisalhamento na interface seriam aquelas que atuariam após o endurecimento da capa estrutural.

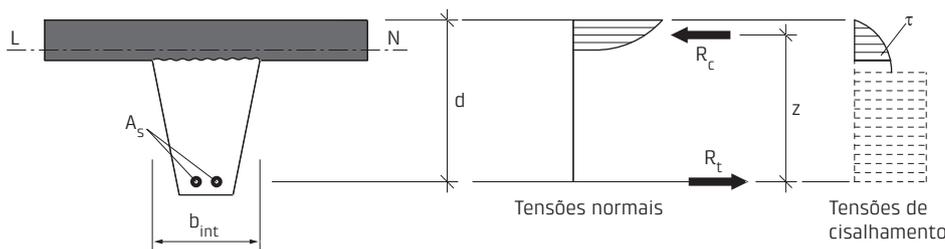
Quando houver cimbramento, a deformação do elemento não será livre. Nesse caso, se o cimbramento for colocado para suportar apenas o concreto da capa, o seu peso (concreto da capa) vai atuar quando o cimbramento for retirado. Por outro lado, se o cimbramento suportar uma parcela do peso próprio do elemento e o peso da capa, essas cargas atuarão após a retirada do cimbramento. Naturalmente, as demais ações que forem aplicadas também solicitarão o cisalhamento na interface.

Cabe destacar que as forças que ocorrem para situações com cimbramento dependem da forma como ele é usado. Na hipótese de o cimbramento ser contínuo, a força seria uniformemente distribuída. Como o cimbramento é normalmente discreto, o efeito da retirada do cimbramento corresponde a forças concentradas nos pontos de ação do cimbramento. Naturalmente, a situação mais crítica seria com um único cimbramento no meio do vão, pois o peso da capa atuaria como uma força concentrada no meio do vão.

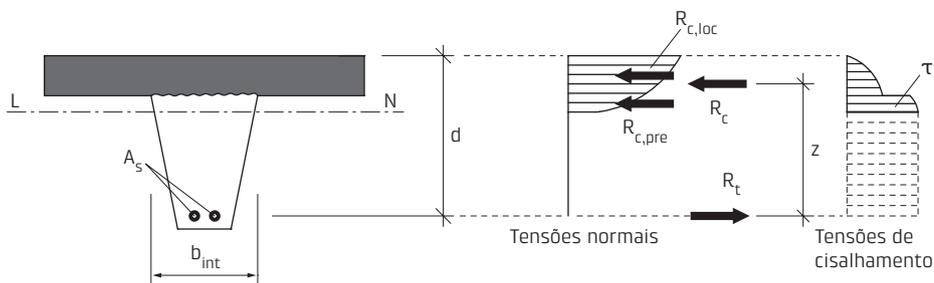
**4.3.4 Resistência ao cisalhamento na interface em elementos fletidos**

*Segundo a FIP*

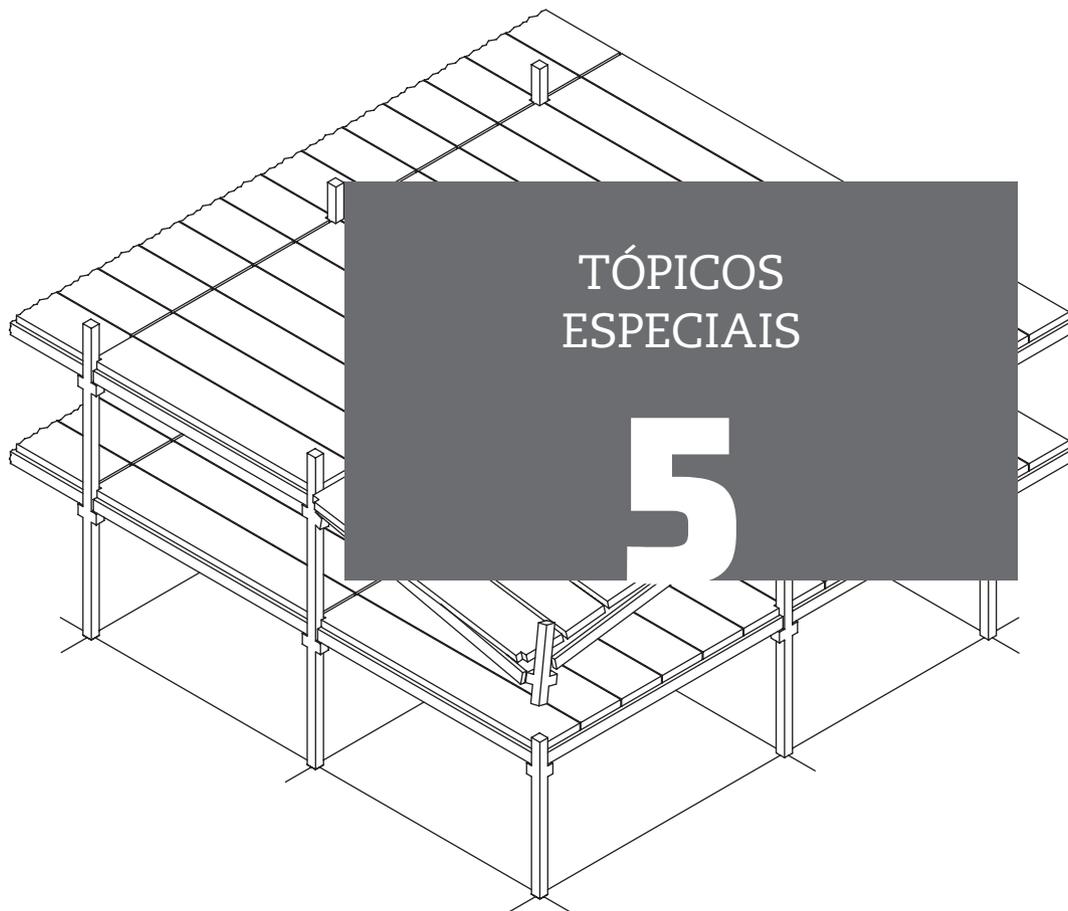
A FIP (1982) fornece indicações para a verificação da resistência ao cisalhamento na interface, as quais são válidas somente para elementos simplesmente apoiados, com seções dentro dos padrões mostrados nas Figs. 4.7 a 4.9.



**Fig. 4.13** Distribuição de tensões no estado fissurado com a linha neutra acima da interface



**Fig. 4.14** Distribuição de tensões no estado fissurado com a linha neutra abaixo da interface



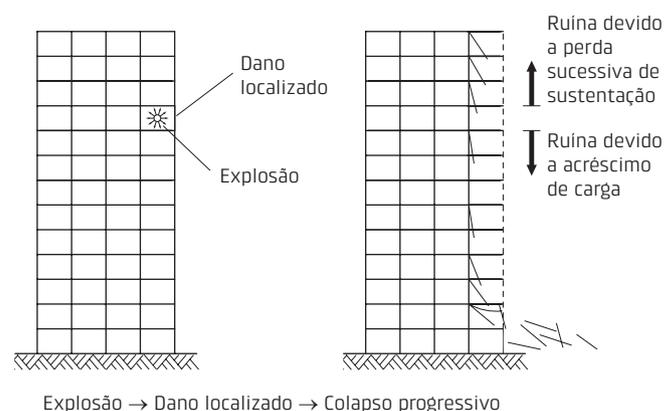
Neste capítulo serão abordados alguns assuntos específicos de interesse no projeto das estruturas de concreto pré-moldado (CPM), no sentido de complementar as informações fornecidas anteriormente. Serão tratados de forma mais detalhada os seguintes tópicos: colapso progressivo, análise de estruturas com ligações semirrígidas, e estabilidade lateral. Outros assuntos a serem vistos de modo mais geral são o comportamento do sistema de pavimento como diafragma e o dimensionamento de vigas delgadas de seção L. Apresenta-se ainda uma seção com outros tópicos de interesse.

## 5.1 Colapso progressivo

### 5.1.1 Conceituação

O colapso progressivo, também chamado de ruína em cadeia, pode ser caracterizado como um tipo de ruína incremental, que se propaga a partir de um dano localizado e provoca danos na estrutura que não são proporcionais à causa inicial.

Na Fig. 5.1 é ilustrada a ocorrência desse fenômeno em uma estrutura de painéis portantes. Uma explosão produz um dano localizado na estrutura, com a ruína de um



**Fig. 5.1** Exemplo de colapso progressivo em uma estrutura de painéis portantes

painel portante. Essa ruína faz com que os outros painéis por ele sustentados caiam sobre a parte da estrutura abaixo da parede, por perdas sucessivas de sustentação. Por outro lado, as paredes abaixo do local do dano sofrem um acréscimo de carga que produz a ruptura dessas paredes. Essa ruptura também se propaga de forma incremental, resultando no colapso da estrutura ou de parte dela.

O National Institute of Standards and Technology (Nist, 2007) descreve o colapso progressivo como a propagação de um dano local de um elemento para outro, causando

### 5.1.4 Estratégias e métodos para combater o colapso progressivo

As estratégias e os métodos dependem das consequências do colapso. Nesse sentido, os edifícios podem ser classificados segundo classes de consequência:

- classe 1: com consequências limitadas, como edifícios habitacionais de até quatro andares;
- classes 2a e 2b: com consequências médias, como edifícios habitacionais com número de andares entre 5 e 15;
- classe 3: com consequências altas, como edifícios habitacionais acima de 16 andares e edifícios públicos com grande concentração de pessoas.

A diferença entre as classes 2a, de menor risco, e 2b, de maior risco, é detalhada no boletim 63 da fib (2012), e contempla não só o tipo de edifício, mas também o nível de aproximação nas recomendações de projeto.

Para reduzir o risco de ocorrência do colapso progressivo são empregados normalmente três procedimentos, que podem ser combinados entre si:

- reduzir o risco de ocorrência de ações anormais;
- prevenir a propagação de uma possível ruína localizada;
- projetar a estrutura ou os elementos para suportar as ações anormais.

O primeiro procedimento é uma medida que deve evidentemente ser tomada. No entanto, o seu alcance é limitado, pois não se elimina a possibilidade de ocorrência das ações anormais. Algumas recomendações para minimizar a ocorrência e os efeitos dessas ações são apresentadas nas publicações sobre o assunto.

No segundo caso, parte-se do pressuposto de que a ruptura dos elementos não é impossível e então se deve prover a estrutura de reforços capazes de propiciar caminhos alternativos para a transferência das forças. Por exemplo, no caso mostrado na Fig. 5.4 pode-se evitar a propagação dos danos devidos à ruptura de um painel mediante tirantes estrategicamente colocados, nos quais ocorrem as forças

de tração, e contar com diagonais de compressão promovidas por outros painéis.

Já o terceiro procedimento é empregado em determinados casos, para elementos de maior responsabilidade estrutural. De qualquer forma, a previsão e a quantificação dessas ações apresentam certas dificuldades.

Os métodos ou alternativas para a prevenção do colapso progressivo são os seguintes:

- método indireto;
- método direto;
- análise do risco sistemático.

O método indireto consiste, em linhas gerais, na colocação de tirantes (amarrações) para prover caminhos alternativos de forças (Fig. 5.4). Assim, para mobilizar os caminhos alternativos de transferência das forças, devem ser utilizadas armaduras adicionais, não previstas no cálculo normal das estruturas. Essas armaduras são tirantes dispostos, em linhas gerais, conforme mostrado na Fig. 5.5. A resistência é considerada indiretamente mediante indicações normativas. O boletim 63 da fib (2012) apresenta uma visão geral das principais recomendações normativas sobre o assunto.

O método direto é com a análise da estrutura para o efeito da ação acidental e pode ter duas alternativas: com a consideração de caminhos alternativos de transferência de forças ou com o cálculo de determinados elementos para a ação acidental. A primeira alternativa será tratada na seção seguinte. A segunda consiste em dimensionar todos os elementos críticos, chamados de elementos-chave, para a ação da carga acidental.

A última alternativa é uma abordagem holística do assunto. O seu propósito é detectar e avaliar o risco potencial de ocorrência de ações anormais e seus efeitos relacionados. Ela deve ser feita nos estágios iniciais do projeto, como na definição da forma da construção, pois existem formas em que o efeito da explosão é amplificado. Essa alternativa é indicada para estruturas nas quais o colapso teria alta consequência.

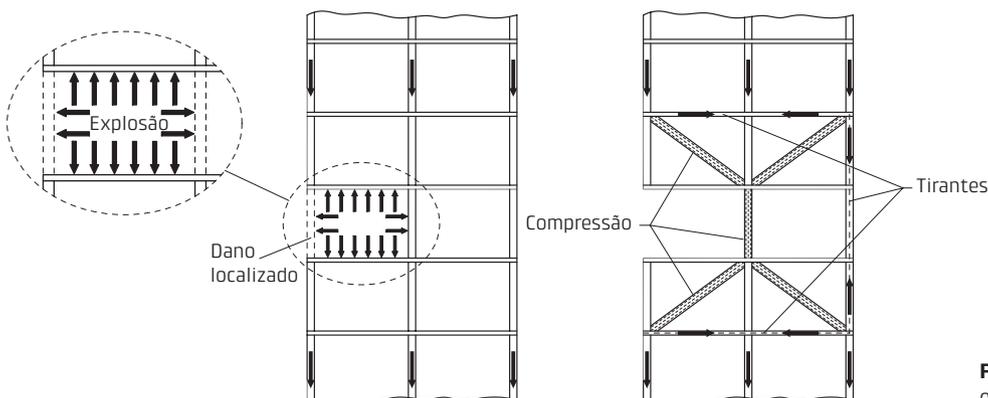


Fig. 5.4 Exemplo de redistribuição de esforços devido a dano localizado

### 5.2.2 Formas de considerar o comportamento semirrígido

A consideração do comportamento semirrígido da ligação na análise estrutural pode ser feita das seguintes formas: a) com a introdução de elementos fictícios e b) com a consideração da deformação da ligação diretamente na formulação.

Na primeira alternativa, a ligação é idealizada a partir da associação de barras reais ou fictícias, como aquela sugerida pelo PCI (1992) para modelar a ligação viga × pilar para uma estrutura de esqueleto submetida às ações laterais (Fig. 5.22).

A segunda forma é mais comum em virtude do desenvolvimento dos programas de análise estrutural. Existem diferentes maneiras de considerar a rigidez da ligação na formulação.

Nas primeiras formulações, a rigidez da ligação era considerada modificando a matriz de rigidez dos elementos que concorrem às ligações. Uma formulação desse tipo pode ser vista em Ferreira (1993), feita com base na apresentada em Monforton e Wu (1963).

Essa formulação é fundamentada nos parâmetros de restrição listados a seguir, tomando como base o sistema de referência e a nomenclatura da Fig. 5.23. Cabe destacar

que a formulação original era somente para a rigidez ao momento fletor. Realizando a adaptação da nomenclatura de Ferreira (1993) para aquela da Fig. 5.23, têm-se as expressões exibidas na sequência.

- Parâmetros relativos à rigidez ao momento fletor

$$\gamma_i = \left[ 1 + \frac{3EI}{K_{mi}\ell} \right]^{-1} \quad (5.8)$$

$$\gamma_j = \left[ 1 + \frac{3EI}{K_{mj}\ell} \right]^{-1} \quad (5.9)$$

- Parâmetros relativos à rigidez à força normal

$$\beta_i = \beta_j = \left[ 1 + \frac{EA}{(K_{ni} + K_{nj})\ell} \right]^{-1} \quad (5.10)$$

Com essas definições, pode-se observar as situações-limite a seguir no que se refere ao momento fletor.

- Para ligação rígida

$$K_m \rightarrow \infty \quad D_m \rightarrow 0 \quad \gamma_{i,j} \rightarrow 1$$

- Para ligação articulada

$$K_m \rightarrow 0 \quad D_m \rightarrow \infty \quad \gamma_{i,j} \rightarrow 0$$

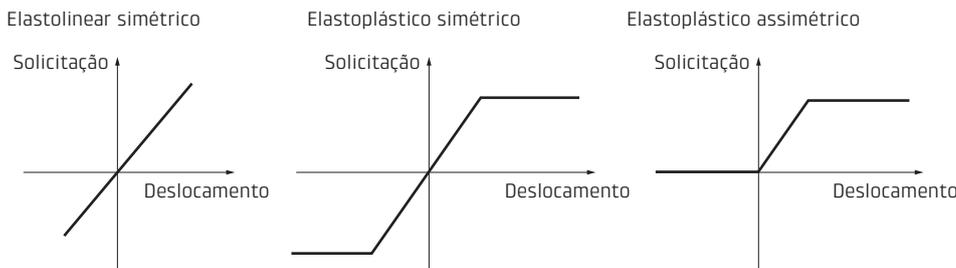


Fig. 5.21 Algumas formas de modelar as rigidezes das ligações

- a) Modelagem usual para as ações verticais      b) Modelagem sugerida para as ações laterais  
Valores baixos para I e A

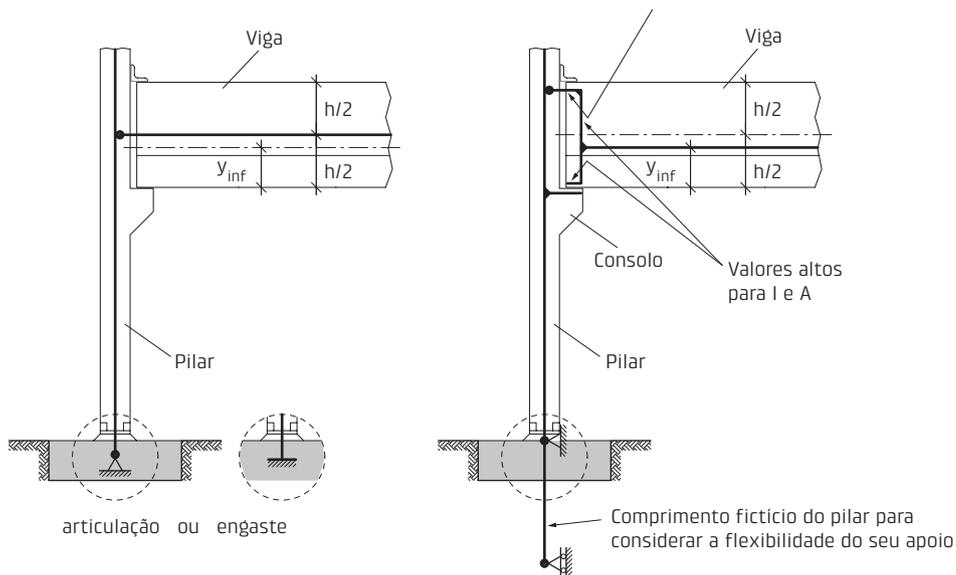


Fig. 5.22 Exemplo de modelagem da estrutura para considerar a deformação da ligação  
Fonte: adaptado de PCI (1992).



**Fig. 5.39** Viga de CPM após incêndio  
Foto: cortesia de Gustavo M. B. Chodraui.

As principais entidades internacionais relacionadas com o CPM, a Comissão 6 da fib e o PCI, têm publicações com abordagens distintas. Enquanto o PCI possui uma publicação específica (PCI, 2011a), a Comissão 6 da fib trata o assunto em um capítulo do seu manual (fib, 2014). Cabe também destacar que a resistência a situações de incêndio das ligações é contemplada, com parte de um capítulo do boletim 43 (fib, 2008).

A nova versão da NBR 9062 (2017a) fornece indicações sobre o assunto, particularmente em relação aos painéis alveolares.

### 5.6.2 Dimensionamento de fixadores no concreto

Nas estruturas de concreto, é empregada uma série de dispositivos, em geral metálicos, tais como chumbadores, parafusos e canaletas, chamados aqui de fixadores, com base na publicação do CEB (1997). Esses elementos podem ser instalados na fase de moldagem ou instalados pós-moldagem, com o concreto endurecido.

Esses dispositivos são utilizados com as mais diversas funções no CPM, como nas ligações, em dispositivos no içamento e em amarração de alvenaria.

Grande parte deles é comercializada e objeto de recomendações técnicas fornecidas pelos fabricantes.

Em Eligehausen, Mallée e Silva (2006), reúne-se grande parte dos dispositivos dessa natureza, bem como recomendações para o projeto levando em conta diversos aspectos.

### 5.6.3 Análise de estruturas de paredes portantes

A maior parte deste livro é voltada às indicações para o projeto de estruturas de esqueleto, uma vez que a maioria das estruturas é com esse tipo de sistema e também porque nos cursos de Engenharia Civil é abordado praticamente apenas esse sistema estrutural.

A inclusão da análise de estruturas de paredes portantes se justifica por ser um tipo estrutural empregado com CPM com certa frequência, conforme pode ser visto ao longo deste livro, particularmente na seção 8.3.

Cabe também registrar a introdução no Brasil de normalização do assunto mediante a NBR 16475 (ABNT, 2017b).

Indicações para o projeto desse sistema estrutural podem ser encontradas em Bljoger (1988) e Lewicki (1982), bem como em Tomo (2013).

### 5.6.4 Processo construtivo *tilt-up*

Esse tópico merece ser aqui incluído pelas suas características próprias e sua importância na construção de CPM de canteiro.

Para os leitores interessados no assunto, recomenda-se a publicação da Associação Americana de Fomento do Processo Construtivo (Tilt-Up Concrete Association, 2011) e a publicação do Comitê 551 do ACI (2015).

Na Fig. 5.40 é mostrado um exemplo de aplicação apresentado no 2PPP. Informações adicionais sobre essa obra podem ser encontradas em Vendramini (2009).



**Fig. 5.40** Exemplo de aplicação do processo construtivo *tilt-up* em edifícios de múltiplos pavimentos  
Fonte: Vendramini (2009).

# Parte II

APLICAÇÕES



Este capítulo trata dos componentes utilizados em edificações. Esse assunto está diretamente relacionado com os dois capítulos seguintes, que abordam respectivamente a aplicação do concreto pré-moldado (CPM) em edificações de um pavimento, também chamados de galpões, e em edificações de múltiplos pavimentos.

Tendo em vista a grande diversidade dos elementos, são enfatizados os tipos mais comuns, normalmente objeto de produção padronizada, sem, contudo, deixar de apresentar alguns outros elementos de maior interesse.

Destaca-se ainda que algumas indicações de seções padronizadas podem não ser atuais, pois elas podem variar pelas mais diversas causas. Portanto, os valores indicados aqui servem de referência, recomendando-se que, na elaboração de projetos, sejam consultados os catálogos atualizados dos fabricantes, mesmo porque parte das indicações é proveniente de referências estrangeiras.

Cabe salientar que a apresentação das características principais dos componentes é limitada neste capítulo, não sendo abordados o dimensionamento e o detalhamento. No que se refere a esses assuntos, recomendam-se as seguintes publicações: Sheppard e Phillips (1989), Fernández Ordóñez (1974), Koncz (1966) e o manual Munte (Melo, 2007).

## 6.1 Componentes de sistemas de esqueleto

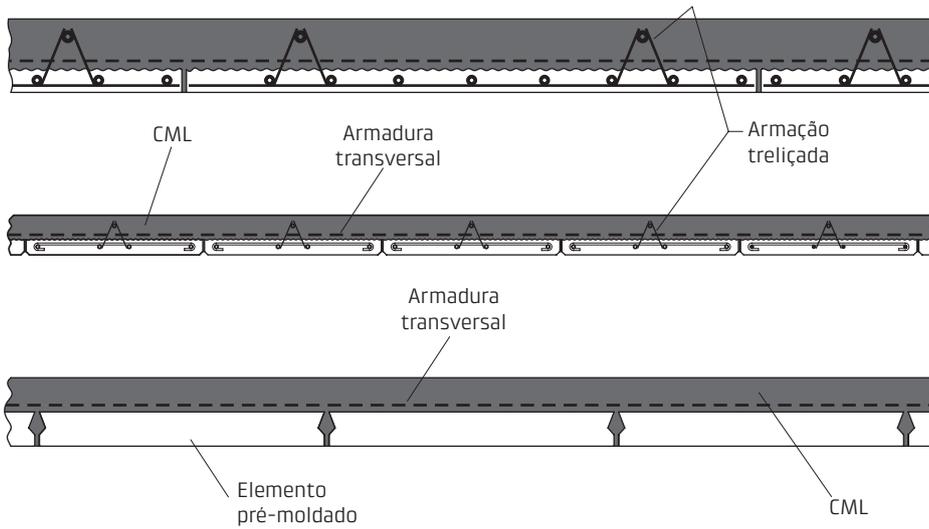
Os componentes básicos empregados nos sistemas de esqueleto são os pilares e as vigas. Embora sejam também utilizados elementos com outras formas, os pilares e as vigas são de uso mais intensivo e não específico, o que justifica limitar a apresentação a esses dois tipos de elemento.

### 6.1.1 Pilares

A Fig. 6.1 mostra as seções transversais utilizadas nos pilares. As mais adotadas são as quadradas e as retangulares. Essas seções podem ou não ser vazadas.

Em geral, a dimensão mínima da seção transversal do pilar é de 300 mm. Via de regra, as seções tipo I e tipo Vierendeel são usadas em galpões. O Quadro 6.1 exhibe um exemplo de padronização de dimensões da seção transversal de pilares conforme o manual da fib (2014).

A Fig. 6.2 apresenta as formas de pilares mais utilizadas. Em geral, os pilares possuem seções transversais constantes. A variação contínua de seção pode ser empregada, mas é incomum. Por sua vez, na Fig. 6.3 são mostrados, a título de ilustração, os pilares padronizados para galpões com pontes rolantes de 100 kN a 300 kN utilizados na ex-União Soviética.



**Fig. 6.13** Lajes formadas por elementos de pré-laje

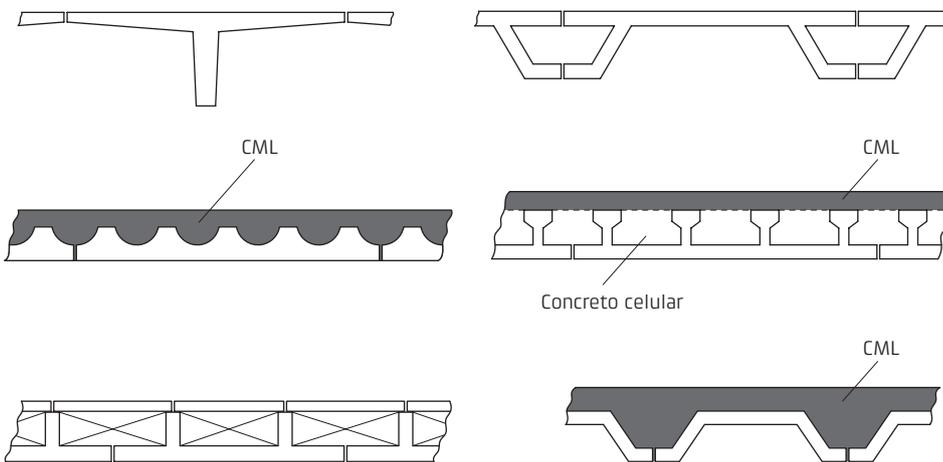
Uma variação do elemento de pré-laje é com elementos de enchimento, já incorporados nos elementos pré-moldados. Nesse caso, também as lajes podem ser projetadas para comportamento unidirecional ou bidirecional.

Outros tipos de laje, menos utilizados que os apresentados anteriormente, são com o emprego de elementos de seção T, múltiplos T, U, TT invertido, e painéis nervurados.

Alguns desses tipos estão mostrados na Fig. 6.14.

Na Tab. 6.1 estão reunidas, com base no manual da fib (2014), algumas características dos tipos de elemento mais comuns de laje.

A Fig. 6.15 mostra os dois componentes de uso mais comum em pavimento de estruturas de CPM: a) painel TT e b) painel alveolar.



**Fig. 6.14** Outros tipos de elemento utilizados nas lajes

**Tab. 6.1** CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS DE LAJE

Tipo de elemento	Vão máximo (m)	Altura (mm)	Larguras mais comuns (mm)	Peso por unidade de área (kN/m <sup>2</sup> )
 Painéis alveolares	±20	120-500	600-2.400	2,2-5,2
 Painéis TT ou π	±30	200-800	2.400	2,0-5,0
 Elementos de pré-laje	±10	100-400	600-2.400	2,4-4,8

Fonte: adaptado de fib (2014).



A aplicação do concreto pré-moldado (CPM) em edifícios de um pavimento, abordada neste capítulo, está estreitamente relacionada com o assunto do capítulo anterior e também com as coberturas, tratadas no Cap. 9. Esse assunto ainda está relacionado com o capítulo seguinte, que trata de edifícios de múltiplos pavimentos, pois em alguns casos pode haver parte do edifício com um pavimento e outras partes com dois. Esses casos ocorrem quando se empregam mezaninos, como também nos casos em que a cobertura tem as mesmas características das coberturas dos edifícios de um pavimento.

## 7.1 Considerações iniciais

O emprego do CPM em edifícios de um pavimento é bastante comum no mundo todo. Também no Brasil, ele tem se notabilizado como um dos maiores, em termos de quantidade de obras.

As edificações de um pavimento são, em geral, construções de vãos relativamente grandes e comumente recebem a denominação de galpão. Cabe destacar que no manual da fib (2014), bem como em outras publicações de origem europeia, o assunto é tratado como *portal frame*.

Esse tipo de construção é, normalmente, destinado à indústria, ao comércio, aos depósitos em geral, às oficinas

etc. Podem também ser incluídos nesse tipo de edificação os estábulos e as granjas. As aplicações habitacionais, ou casos similares, apresentam características próprias, de forma que essas aplicações se distanciam do que é aqui tratado.

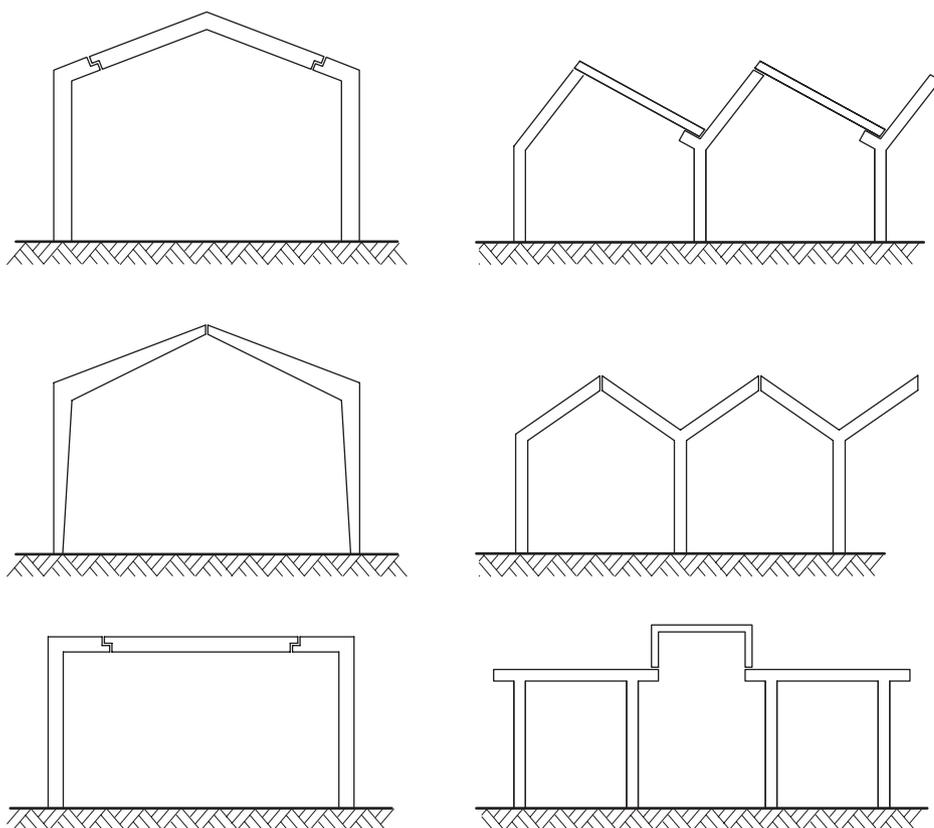
Destaca-se ainda que são abordados basicamente apenas os sistemas estruturais. Os aspectos relativos ao projeto dessas edificações, tais como dimensões em planta, altura, instalações em geral, incluindo pontes rolantes, iluminação etc., não são objeto dessa apresentação.

Embora sejam tratadas apenas as alternativas exclusivamente com CPM, é interessante lembrar a possibilidade de alternativas híbridas, como pilares de CPM e cobertura com estrutura metálica ou de madeira, ou parte de viga-mento secundário de cobertura com elementos metálicos.

Esse assunto está sendo aqui desenvolvido com a divisão apresentada no Quadro 7.1. A divisão dos sistemas estruturais de esqueleto é baseada na discussão apresentada na seção 2.4.

Para efeito dessa divisão, ainda são enquadrados como elementos de eixo reto os elementos com altura da seção transversal variável, que, a rigor, deixam de ter eixo reto.

Existe ainda a divisão dos sistemas estruturais de esqueleto, em relação à forma dos elementos, em elementos de forma normal e elementos com abertura entre os banzos.



**Fig. 7.9** Esquemas construtivos com elementos compostos de trechos de eixo reto

Em relação à análise estrutural, vale, em princípio, o que foi comentado para o caso anterior.

### 7.2.3 Sistemas estruturais com elementos com abertura entre os banzos

Os sistemas estruturais aqui enquadrados correspondem a alternativas da forma dos elementos, que podem ser em treliça, viga Vierendeel ou viga armada. Em princípio, essas formas de elementos se aplicam a quaisquer dos sistemas estruturais derivados das formas básicas apresentadas anteriormente. Assim, os elementos com abertura entre os banzos podem ser empregados em vigas, em pilares ou em elementos compostos de trechos de eixo reto.

A característica principal dessas formas de elementos é a redução do consumo de materiais e, conseqüentemente, do peso dos elementos.

Alguns exemplos dos elementos em questão estão indicados na Fig. 7.10. Na Fig. 7.11 são mostradas algumas possibilidades com o esquema de viga armada e na Fig. 7.12 são apresentadas algumas formas de treliça. Um estudo de aplicação de viga Vierendeel em galpão com cobertura em “dente de serra” é exibido na Fig. 7.13.

Cabe destacar ainda que as treliças podem ser também espaciais. Entretanto, pelo que se tem conhecimento, essa alternativa foi empregada apenas na cobertura de hangar de um aeroporto na Inglaterra.

O uso de elementos dessa forma foi bastante intensivo no início do CPM. Atualmente a sua utilização tem sido menor, em particular as treliças, por não apresentarem facilidades de execução. Na verdade, a execução desses elementos, que normalmente são moldados na posição horizontal, não apresenta grandes dificuldades, mas também não facilita a mecanização da execução.

Atualmente existe maior disponibilidade de equipamentos de montagem de grande capacidade de carga, o que acarretou a redução do uso dessas formas. Entretanto, essas alternativas não deixam de ser viáveis em certas circunstâncias, principalmente em pré-moldados de canteiro.

A Fig. 7.14 mostra um notável exemplo de aplicação de elementos com abertura entre os banzos. Trata-se do Estaleiro Enseada do Paraguaçu, com vãos atingindo 41 m e pilares que chegam a 35 m de altura.

## 7.3 Sistemas estruturais de parede portante

A característica principal desses sistemas é que as paredes, além de prover o fechamento de galpões, servem de apoio para a cobertura.

Em geral, apenas paredes externas são portantes. Quando as dimensões em planta do edifício são grandes, a parte interna é constituída de sistema de esqueleto, conforme



Conforme adiantado, a apresentação do emprego do concreto pré-moldado (CPM) em edifícios com mais de um pavimento, denominados aqui edifícios de múltiplos pavimentos, está relacionada de forma mais estreita com os capítulos sobre componentes de edifícios e sobre edifícios de um pavimento.

## 8.1 Considerações iniciais

Os edifícios de múltiplos pavimentos, quando comparados com os edifícios de um pavimento, apresentam, em princípio, algumas características adequadas para o emprego do CPM, tais como elementos de menor peso e maior número

de elementos. Por outro lado, em geral, existe grande número de ligações, eventualmente com múltiplos elementos concorrendo ao mesmo nó, e a garantia da estabilidade global passa a ser mais dispendiosa.

Essa comparação, ainda que geral e que não leve em consideração os aspectos particulares de cada sistema, fornece uma primeira ideia da problemática do emprego do CPM nos edifícios de múltiplos pavimentos.

Os sistemas estruturais dos edifícios de múltiplos pavimentos são classificados conforme apresentado no Quadro 8.1.

Cabe registrar a possibilidade de utilizar sistema estrutural resultante da combinação de característica de um

**Quadro 8.1** SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CPM PARA EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS

Sistemas estruturais de esqueleto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Com elementos de eixo reto (elementos tipo pilar e tipo viga)</li> <li>• Com elementos compostos de trechos de eixo reto (elementos que incluem parte do pilar e parte da viga)</li> <li>• Em pavimentos sem vigas (elementos tipo pilar e tipo laje)</li> </ul>
Sistemas estruturais de parede portante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Com grandes painéis de fachada</li> <li>• Com painéis da altura do pavimento</li> <li>• Com elementos tridimensionais</li> </ul>
Sistemas mistos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combinações de sistemas de esqueleto e de parede portante</li> </ul>

ção da estrutura para edifícios relativamente altos, pois os momentos fletores nos pilares devidos às ações laterais aumentam bem menos que a primeira forma básica (Fig. 8.9a).

Alguns esquemas construtivos derivados das formas básicas apresentadas estão mostrados na Fig. 8.10. Exemplos de aplicações com esses esquemas podem ser vistos em Koncz (1966).

### 8.2.3 Sistemas estruturais em pavimentos sem vigas

Esse caso corresponde ao emprego de sistemas tipo laje-cogumelo, também chamados de sistemas pilar-laje, e os elementos estruturais são os pilares e as lajes. Esses sistemas apresentam uma importante característica em relação à utilização do edifício, que é a flexibilidade do lay-out. Por outro lado, as dimensões dos elementos dificultam ou inviabilizam a produção dos componentes em fábricas. O uso desses sistemas estruturais é, atualmente, bastante limitado.

Esses sistemas estruturais podem ser derivados das formas básicas descritas a seguir:

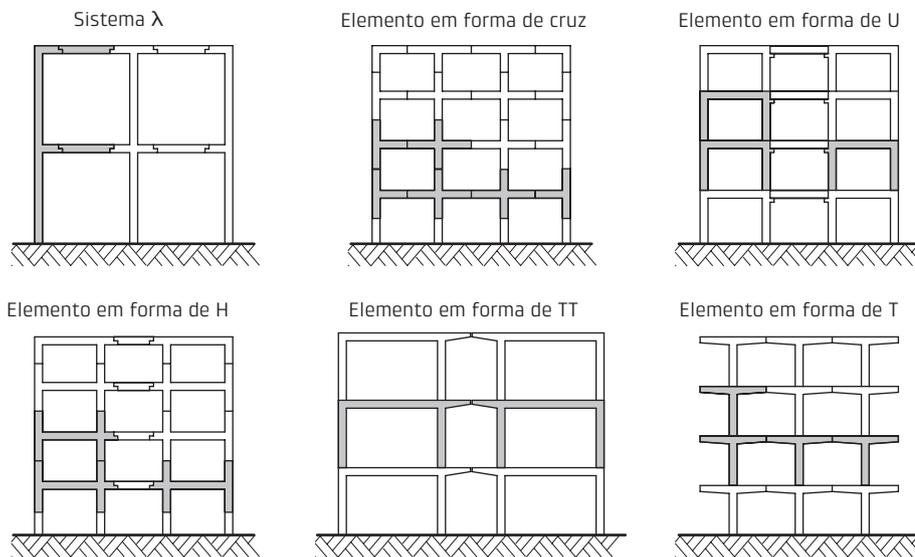


Fig. 8.10 Esquemas construtivos com elementos compostos de trechos de eixo reto

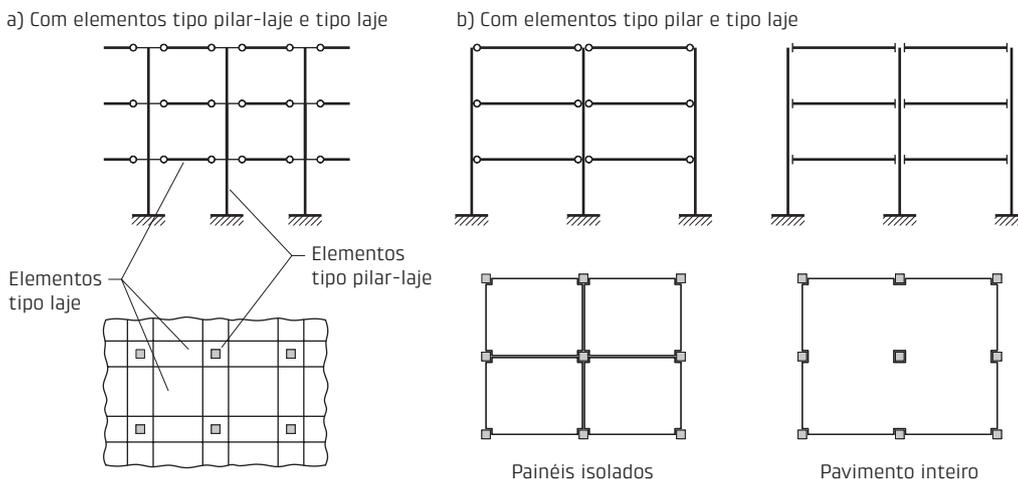


Fig. 8.11 Formas básicas dos sistemas estruturais em pavimentos sem vigas

- Com elementos tipo pilar-laje e tipo laje (Fig. 8.11a): nesse caso, usam-se elementos correspondentes ao pilar com parte da laje. Em geral, para completar os pavimentos são utilizados mais outros elementos tipo laje. Quando a parte da laje junto ao pilar é relativamente pequena, formando basicamente um capitel, o pilar pode ser da altura de vários andares. Caso contrário, os elementos pilar-laje têm altura de um pavimento, obrigando assim a realização de emenda nos pilares em todos os pavimentos.
- Com elementos tipo pilar e tipo laje (Fig. 8.11b): esse caso equivale ao emprego de dois tipos de elemento, pilar e laje. Os elementos tipo laje podem ter as dimensões ajustadas para as dimensões do pavimento ou para se apoiarem em quatro pilares. A segunda alternativa corresponde à utilização do processo de execução denominado *placas ascendentes* ou *lift-slab*, no qual todos os pavimentos são moldados no nível do solo, uns sobre os outros, sendo posteriormente levantados e colocados nas suas posições de utilização definitiva.



Este capítulo é dedicado ao emprego do concreto pré-moldado (CPM) em coberturas de construções em geral. Estão incluídas as estruturas em cascas e as folhas poliédricas, bem como elementos lineares. Neste último caso, o emprego pode ser com duas características distintas: a) com elementos que formam cobertura semelhante à das cascas e folhas poliédricas e b) com elementos que formam arcos ou pórticos, que necessitam ainda de estrutura secundária e telhas ou outro material de vedação. Incluem-se ainda as coberturas com cabos de aço associadas com elementos pré-moldados.

Embora o que seja visto neste capítulo se aplique à cobertura de qualquer tipo de construção, como edifícios de múltiplos pavimentos e reservatórios, existe uma relação mais forte com as construções de um pavimento com grandes vãos, como galpões, auditórios e ginásios de esporte.

## 9.1 Considerações iniciais

Tendo em vista que as estruturas em cascas não são tão conhecidas como os outros casos, apresentam-se inicialmente algumas considerações em relação às formas e ao seu comportamento estrutural.

Um aspecto relevante das cascas, bem como das folhas poliédricas, é a riqueza de formas. Esse aspecto pode ser

observado na Fig. 9.1, na qual é apresentada a classificação das superfícies das cascas e folhas poliédricas, feita com base em Ramaswamy (1968). Essa riqueza de formas pode ser explorada, principalmente em relação à estética da construção, tanto com as formas básicas mostradas na Fig. 9.1 como mediante a combinação dessas formas.

Uma das qualidades do concreto armado e suas variações, que é a adaptabilidade às mais diversas formas, faz com que esse material seja bastante apropriado para os tipos estruturais em questão, principalmente nos casos de curvatura dupla. No entanto, essas estruturas necessitam, via de regra, de fôrmas mais trabalhosas quando comparadas com outros tipos de estrutura. Em face disso, o emprego do CPM constitui uma importante alternativa construtiva para as cascas e folhas poliédricas. Destaca-se que outra forma de execução que tem sido explorada é com o uso de fôrmas infláveis e concreto projetado, também podendo incluir elementos pré-moldados, como pode ser visto em Kromoser e Kollegger (2015).

O potencial de aplicação do CPM nessas estruturas tem sido explorado por vários engenheiros e arquitetos no mundo inteiro. Merecem destaque especial os trabalhos do engenheiro italiano Pier Luigi Nervi, que empregou elementos pré-moldados com um tipo particular de concreto armado. Esse tipo particular de concreto armado,

- *Cascas formadas por elementos de eixo reto*: nesse caso, a casca é formada por elementos retos, como no esquema mostrado na Fig. 9.7. Essa alternativa é, em princípio, indicada para cascas curtas.

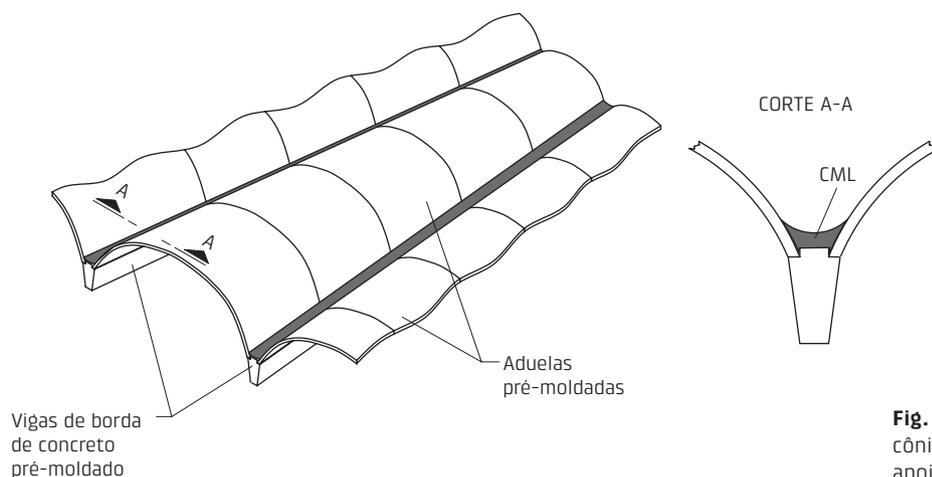
### 9.2.2 Cascas com curvatura dupla

#### Cascas de revolução

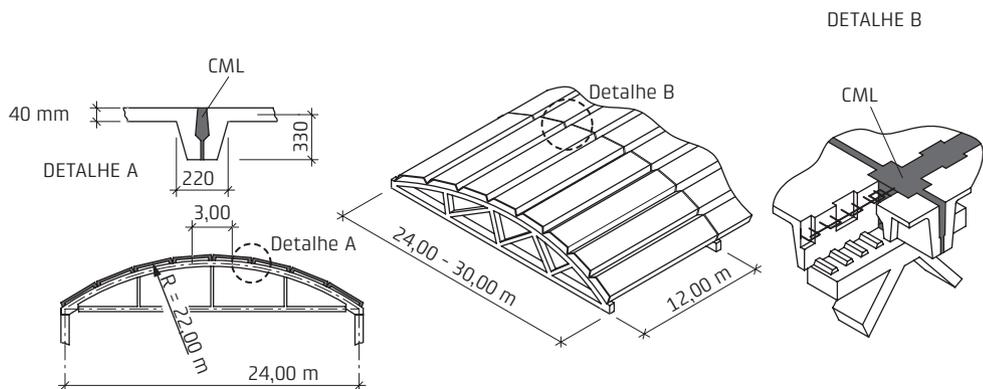
As cascas de revolução são aquelas que apresentam superfície gerada pela rotação de uma curva ou reta em relação a um eixo. No caso de reta, resultam as superfícies correspondentes às cascas cilíndricas e cônicas, vistas anteriormente. No caso de curvas, resultam as superfícies

esféricas, elipsoidais, parabólicas etc., que exibem curvatura gaussiana positiva, vistas nesta seção, e superfície hiperbólica (hiperboloide de revolução), que apresenta curvatura gaussiana negativa.

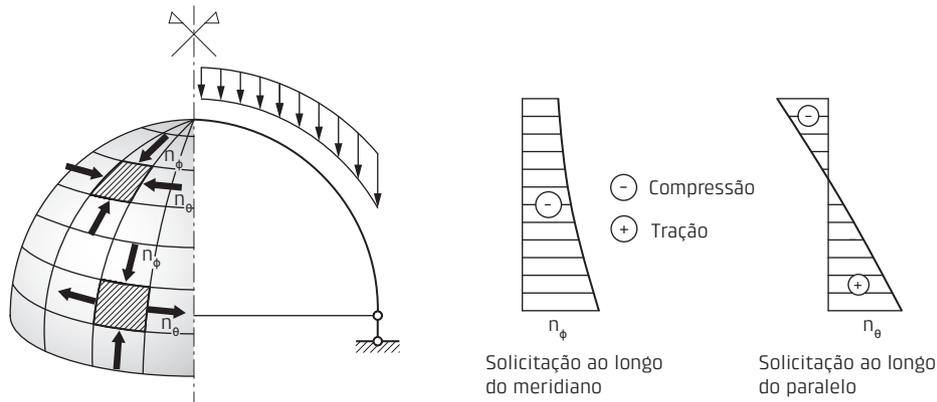
Em geral, a estrutura é apoiada em todo o contorno, formando cúpulas. Na Fig. 9.8 estão esquematizadas as normais do comportamento de membrana para uma casca esférica submetida à carga uniformemente distribuída e apoiada ao longo da borda. Como pode ser observado, só existem esforços de compressão ao longo dos meridianos, ao passo que na direção dos paralelos ocorrem esforços de tração apenas na parte inferior, quando ela existir.



**Fig. 9.6** Esquema de cobertura com casca cônica de elementos pré-moldados com apoio em viga de borda



**Fig. 9.7** Esquema de cascas cilíndricas formadas por elementos de eixo reto  
Fonte: adaptado de Baykov (1978).



**Fig. 9.8** Forças normais resultantes do comportamento de membrana nas cúpulas



As pontes, assim como outros tipos de construção tratados no capítulo seguinte (galerias, canais de drenagem, muros de arrimo e reservatórios de água), são construções que fazem parte da infraestrutura urbana e de estradas e constituem obras com características distintas em relação às edificações, abordadas nos capítulos anteriores.

Comparativamente às edificações, essas construções apresentam as seguintes características favoráveis à aplicação do concreto pré-moldado (CPM): a) a construção se resume praticamente à estrutura, b) existem condições mais favoráveis de empregar uma padronização para essas obras e c) em geral são obras que têm uma aplicação em grande escala.

Como a construção toda praticamente se resume à estrutura, nesses tipos de obra não ocorre interação da estrutura com as outras partes da construção, ao contrário do que acontece nas edificações. Assim, o projeto estrutural assume importância relativamente maior em comparação com as edificações, pois normalmente a construção é definida por esse projeto.

Outro aspecto relevante, mais especificamente para as pontes, é que em geral existem condições de acesso de equipamentos de montagem. Destaca-se também o fato de o cimbramento ser geralmente oneroso nas pontes, seja

pela presença de lâmina de água, seja pela grande altura da estrutura principal em relação ao nível do solo.

Em razão das suas características e da sua importância na construção civil, as aplicações do CPM nas pontes podem receber um tratamento à parte. Nesse sentido, o PCI tem um manual de CPM, citado em várias partes deste livro, e outro manual específico para as pontes, que é o *Manual de projeto de pontes* (PCI, 2011b).

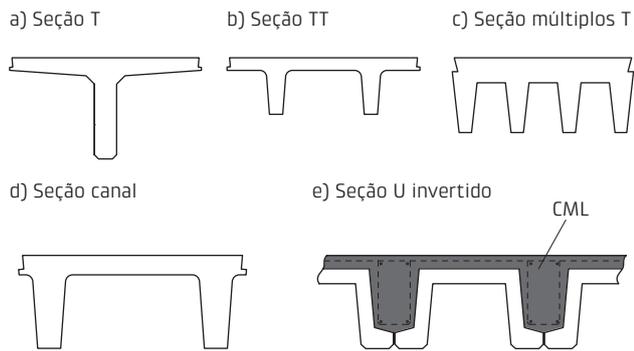
A rapidez da construção nesse tipo de obra já foi apontada na seção I.5 como uma característica importante para minimizar as perturbações ao meio ambiente. Cabe reforçar aqui o citado programa Accelerated Bridge Construction (ABC), do Departamento de Transporte dos Estados Unidos, para a redução do tempo de construção de pontes. Com isso, as pesquisas e aplicações do CPM têm sido direcionadas também à infraestrutura da ponte, como se pode notar em Khaleghi et al. (2012) e no manual do programa ABC (Culmo, 2011).

## 10.1 Considerações iniciais

A aplicação do CPM nas pontes concentra-se na superestrutura, na qual podem ser empregadas duas formas básicas de divisão em elementos pré-moldados: com elementos

Conforme o boletim mencionado, esse tipo de aplicação foi desenvolvido principalmente na Espanha. O elemento pré-moldado é basicamente limitado a 45 m de comprimento, mas, com emendas dos elementos, as aplicações desse sistema chegam a atingir 90 m de vão. No entanto, a rigor, as aplicações com emendas devem ser enquadradas na categoria da seção 10.4.3, a ser tratada na sequência deste capítulo.

Outras formas, pouco empregadas, são variações dos elementos de seção T. A Fig. 10.10 mostra exemplos desse



**Fig. 10.10** Aplicação de elementos seção T e suas variações em superestrutura de pontes

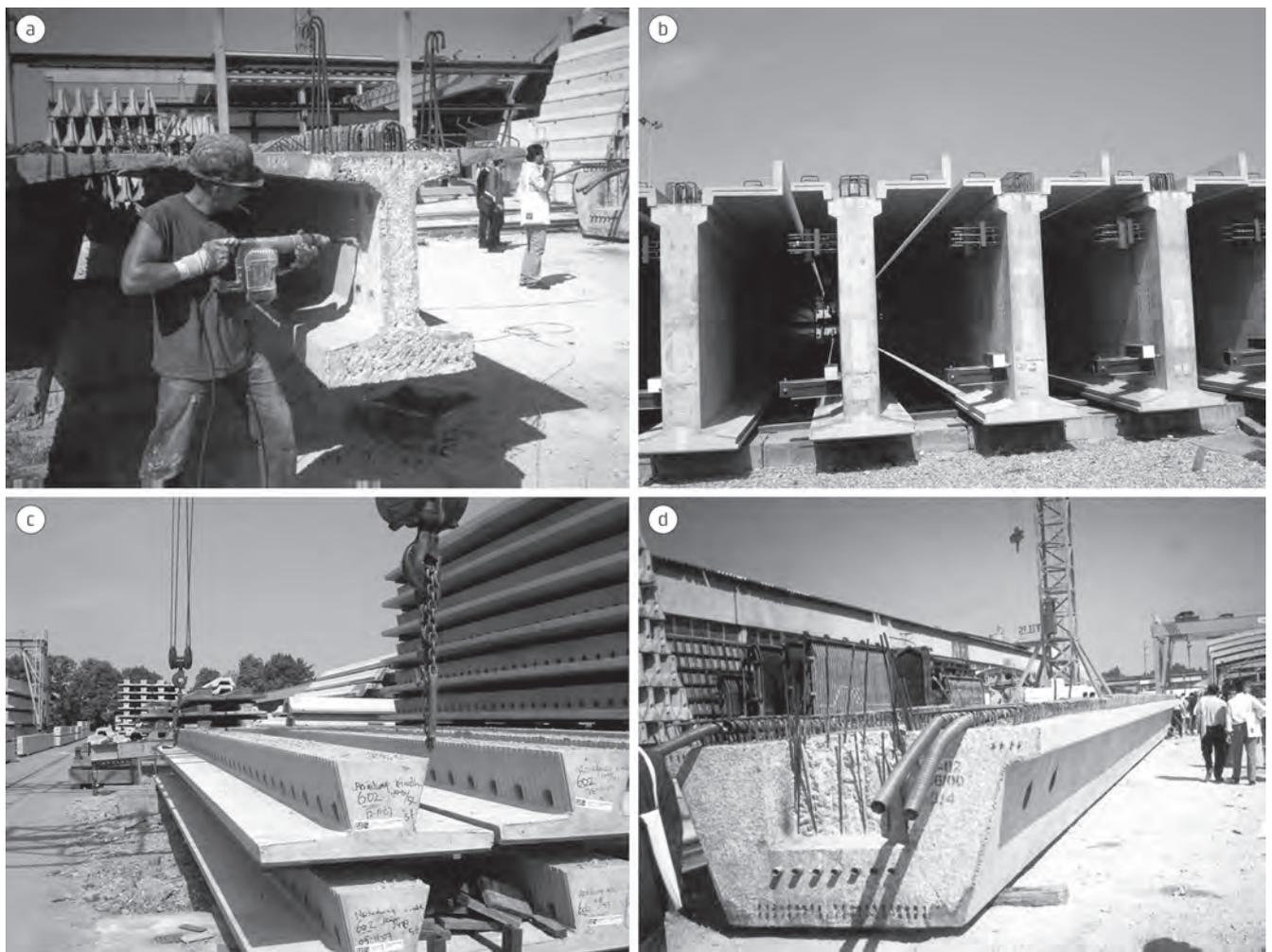
caso, sendo que a seção U invertido (Fig. 10.10e) já é uma variação com características mais distantes das demais.

Na Fig. 10.11 podem ser vistos exemplos de vigas empregadas em pontes, na área de armazenamento. Já a Fig. 10.12 mostra a construção de pontes com vigas de seção I, que foi objeto de apresentação no *Painel dos Projetistas* no 2PPP (Bentes, 2009). Mais informações e detalhes podem ser encontrados no site do 2PPP.

A análise comparativa dos vários tipos de elementos tem sido objeto de publicações, como em Yamane et al. (1994) e no boletim 29 da fib (2004). A Fig. 10.13 mostra as faixas de vãos de alguns tipos de elementos.

### 10.2.2 Particularidades relativas à direção transversal

Nessa parte, são apresentadas algumas particularidades relativas à direção transversal, ou seja aquelas relativas à seção transversal das pontes. Estão sendo abordados os seguintes assuntos: a) formas de melhorar a distribuição transversal de esforços, b) a formação do tabuleiro com



**Fig. 10.11** Exemplos de vigas empregadas em pontes: a) e b) seção I; c) seção T invertido; d) seção trapezoidal

## 10.4 Tópicos adicionais sobre o assunto

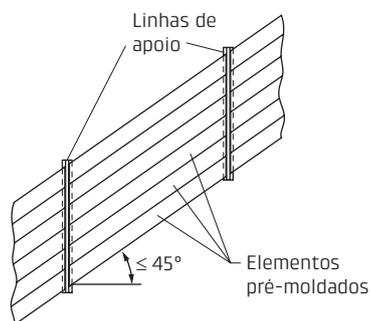
### 10.4.1 Pontes esconsas e pontes curvas

Em geral, os elementos pré-moldados, com as variadas formas de seção transversal apresentadas, podem ser empregados em pontes quando o grau de esconsidade não for alto, normalmente abaixo dos 45° de esconsidade (Fig. 10.21a). Para graus de esconsidade maiores, é necessário verificar a exequibilidade e mesmo se soluções em CML não seriam mais apropriadas.

Em relação às pontes em curvas no plano horizontal, deve ser feita uma distinção entre curvas com grandes raios, nas quais podem ser empregados elementos retos, e curvas de pequenos raios, nas quais é necessário utilizar elementos curvos.

No primeiro caso, pequenos alargamentos do tabuleiro, acompanhados ou não de alargamento da travessa de apoio, possibilitam o emprego de elementos retos, sem grandes prejuízos estéticos, recaindo portanto no que foi apresentado (Fig. 10.21b).

a) Pontes esconsas



b) Pontes curvas com grande raio

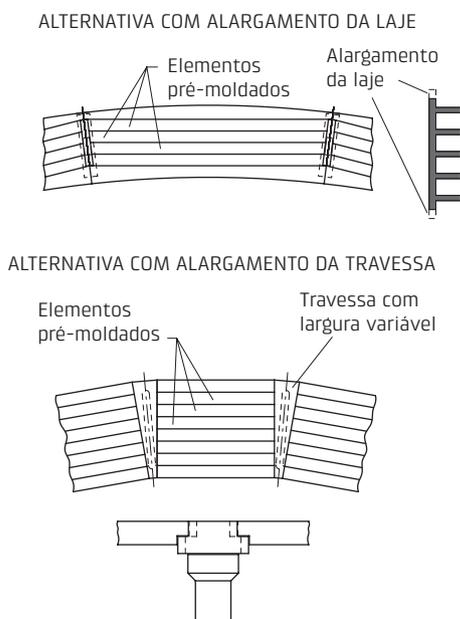


Fig. 10.21 Esquemas construtivos para pontes esconsas e curvas com grande raio

O segundo caso, em que os elementos pré-moldados teriam que ser curvos, é bastante incomum. O emprego de concreto protendido com pré-tração acarretaria um grande trabalho adicional para desviar a trajetória dos cabos de protensão. Assim, a alternativa com concreto protendido com pós-tração torna-se praticamente a única viável nesses casos.

### 10.4.2 Pontes não rodoviárias

Além das pontes rodoviárias, basicamente tratadas até aqui, o CPM pode ser utilizado ainda em pontes para pedestres e pontes ferroviárias.

Em princípio, aplicam-se a esses tipos de pontes as mesmas considerações vistas aqui. Na Fig. 10.22 estão mostrados alguns esquemas de pontes ferroviárias. Destaca-se que o emprego de tabuleiro rebaixado, pouco comum nas pontes rodoviárias por restrições de ordem estática e de funcionalidade, são usuais nas pontes ferroviárias.

Um exemplo notável de ponte ferroviária, com tabuleiro rebaixado, mas com estética bastante agradável pode ser vista em Rosignoli (2012).

### 10.4.3 Elementos de comprimento menor que o vão

Conforme foi adiantado, na maior parte das aplicações são empregados elementos pré-moldados que cobrem o vão ou os vãos da ponte. Para ampliar os vãos, utilizando ainda os mesmos tipos de elementos, podem ser empregados dois recursos.

O primeiro caso corresponde ao emprego de tramo suspenso, em que os elementos são colocados sobre trecho moldado no local, ou com CPM, que se projeta em balanço sobre os pilares, formando esquema de viga Gerber.

O outro recurso, que tem sido empregado na América do Norte, consiste em vencer o vão emendando segmentos de vigas pré-moldadas, em geral, executadas em fábricas. Essa possibilidade já foi adiantada na apresentação da seção monocaixão. Nesses casos, faz-se uso da pré-tração, para as fases de transporte e montagem, e da pós-tração para realizar as emendas e para o atendimento dos estados-limite últimos e de serviço nas várias seções ao longo do vão. Nas Figs. 10.23 e 10.24 estão mostradas duas aplicações dessa alternativa.

Outros exemplos recentes podem ser vistos em Ma (2011), no qual é previsto um aumento desse recurso nas próximas décadas nos Estados Unidos.

### 10.4.4 Outras formas empregadas

Além das alternativas de elementos pré-moldados dispostos na direção do eixo da ponte com esquemas de vigas,



Na infraestrutura urbana e de estradas existe uma série de tipos construtivos nos quais o concreto pré-moldado (CPM) apresenta grande interesse. Os tipos construtivos em questão são as galerias, os canais, os muros de arrimo e os reservatórios, que, conforme adiantado, têm características distintas das edificações.

As galerias, também chamadas de bueiros, são obras que fazem parte de sistemas de drenagem urbana e de estradas, ou então que funcionam como passagens inferiores, viárias ou de serviços. Os muros de arrimo são obras destinadas à contenção do solo, que podem se apresentar isoladamente ou então fazer parte de outro tipo de obra, como é o caso de encontros e muros de ala das pontes. Os canais fazem parte de sistemas de drenagem a céu aberto. Os reservatórios fazem parte de sistemas de abastecimento de água. Também se enquadram neste último caso outras construções para armazenamento de água e esgoto que são empregados no tratamento destes.

Cabe destacar que esses tipos construtivos têm em comum o fato de estarem, em geral, sujeitos a consideráveis empuxos de terra ou de água.

Conforme visto no capítulo anterior, existe grande interesse no emprego do CPM nesses tipos de obra, pois a construção praticamente se resume à estrutura, além de condições favoráveis de se empregar uma padronização.

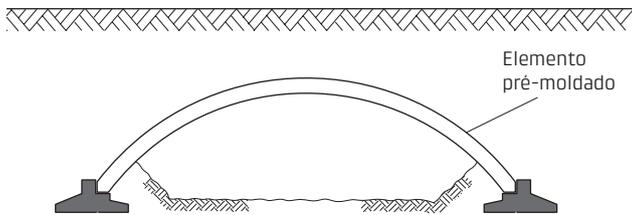
Em relação à quantidade de aplicação, cabe registrar que existem indicações, no caso de construção de estradas, de que as galerias e os muros representam cerca de 10% a 15% do custo de implantação de uma rodovia, devido ao grande número de ocorrência desses tipos de obra. Por outro lado, em obras urbanas, as galerias e os canais são, devido ao grande comprimento, obras bastante dispendiosas.

Como em toda construção, as condições de acesso são de fundamental importância para a opção pelo CPM. Na maioria dos casos, esse fator é o condicionante principal. Esse tipo de restrição pode ocorrer no caso das obras urbanas, em que a falta de condições de acesso de equipamentos de montagem, praticamente inviabiliza o emprego do CPM. Por outro lado, as galerias e os canais são normalmente implantados em locais com grande risco de inundações. Dessa forma, a redução do tempo de execução da construção propiciada pelo emprego do CPM constitui-se, normalmente, em um fator decisivo na escolha do processo de construção.

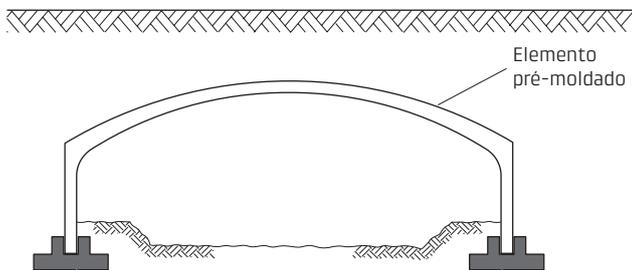
Cabe observar ainda que as empresas que trabalham com esses tipos de obra possuem equipamentos, tais como retroescavadeiras, dragas etc., que podem ser improvisados para a montagem dos elementos pré-moldados. Isso significa que, se o peso dos elementos for adequado para que a sua montagem seja feita contando com a disponibi-

alternativa, indicada para faixa de vãos de 9 m a 12 m, tem sido utilizada nos Estados Unidos, de acordo com Hill e Shirole (1984).

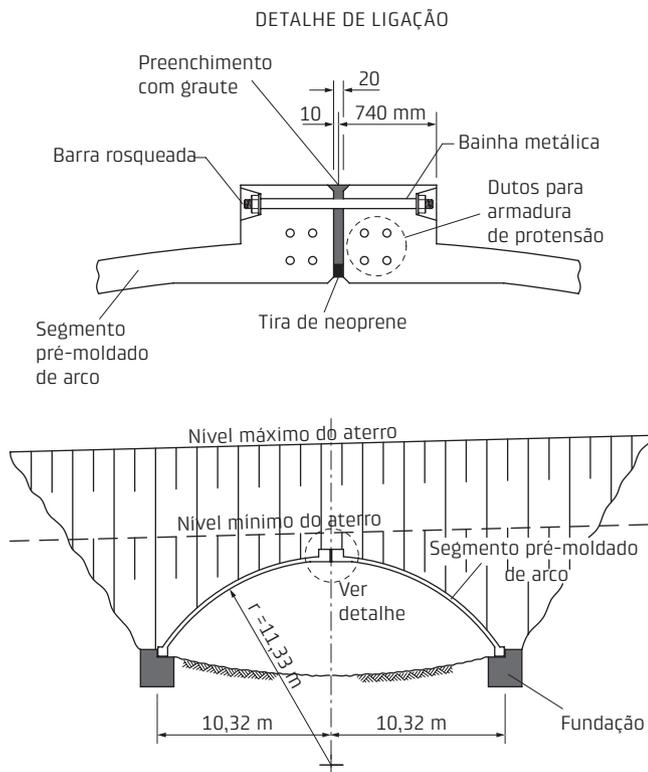
Também com o emprego de um único elemento, mas com partes compostas de trechos reto e curvo, existe a alternativa indicada na Fig. 11.15, para a faixa de 5 m a 12 m, conforme Hurd (1990).



**Fig. 11.14** Esquema de galeria em arco com seção formada por um único segmento



**Fig. 11.15** Esquema de galeria com seção tipo pseudopórtico



**Fig. 11.16** Exemplo de galeria em arco com seção formada por dois segmentos  
Fonte: adaptado de Hebden (1986).

Um exemplo de aplicação, para situações de aberturas maiores, com o emprego de dois elementos pré-moldados para formar a seção transversal, está apresentado na Fig. 11.16. Esse tipo construtivo foi utilizado em três galerias no Canadá com vãos da ordem de 20 m (Hebden, 1986).

Outro exemplo notável dessa forma de aplicação do CPM é apresentado em Chiou e Slaw (1998), em que se destaca a estética da construção.

Cabe registrar que as aplicações de elementos em arco fazem parte de soluções padronizadas na Austrália, conforme o citado manual do concreto pré-moldado da Austrália, no qual são indicadas características geométricas, com um elemento e dois elementos, para a faixa de vão de 4,5 m a 21,0 m.

Na Fig. 11.17 é mostrado um exemplo de aplicação de galeria em arco com seção formada por dois segmentos.



**Fig. 11.17** Exemplo de galeria em arco com seção formada por dois segmentos



Neste capítulo é enfocada a aplicação do concreto pré-moldado (CPM) em outros tipos de construção não tratados anteriormente.

As aplicações em arquibancadas e estádios, silos e torres são tratadas com mais detalhes. Outros tipos de construção – revestimento de túneis, metrô e similares, obras hidráulicas, obras industriais, elementos complementares de estradas, construções habitacionais, mobiliário urbano e construções rurais – são tratados de forma mais superficial.

## 12.1 Arquibancadas e estádios

Na construção de arquibancadas definitivas com as mais diversas finalidades, como estádios, ginásios e outras obras do gênero para facilitar a visibilidade dos assistentes, é geralmente empregado o concreto armado.

Nesse tipo de construção, a aplicação do CPM é particularmente interessante devido ao fato de que na alternativa em concreto moldado no local (CML) os trabalhos relativos à execução da fôrma, da armação e da concretagem não são simples e apresentam um alto grau de repetição.

Uma vez que o CPM é bastante interessante para a construção das arquibancadas, por uma questão de extensão do processo de execução, ele também passa a ficar interessante para o restante da estrutura.

Nos estádios e ginásios cobertos, o CPM pode ser empregado, além das arquibancadas, na estrutura de suporte das arquibancadas, na cobertura da construção ou das arquibancadas, nas áreas de acesso e em elementos de fachadas. Cabe registrar que muitas vezes é utilizada alternativa intermediária, entre as extremas com emprego exclusivo do CPM e com CML, mas sempre com tendência de utilizar o CPM pelo menos nas arquibancadas.

As principais formas da seção transversal dos elementos pré-moldados utilizados nas arquibancadas estão indicadas na Fig. 12.1. Esses elementos têm sido executados em concreto armado e concreto protendido. A forma em L pode ser repetida duas ou três vezes em um mesmo elemento, compondo seções transversais com duplo ou triplo L. O elemento com seção triplo L, desde que equacionadas as condições de transporte e montagem, é mais adequado de acordo com o princípio de minimizar o número de ligações, além de ser menos susceptível a vibrações, cuja importância de ser considerada nos estádios tem recebido maior atenção, conforme salientado em Martin e Kowall (1994). Na Fig. 12.1c está mostrada a seção transversal desse tipo de elemento, com a armadura principal de protensão disposta para atender à flexão que ocorre segundo os eixos principais de inércia.

## 12.4 Revestimento de túneis

O CPM vem sendo cada vez mais empregado na execução de revestimento de túneis, em substituição aos revestimentos de ferro fundido que eram usualmente utilizados em metrôs. Esse sistema foi empregado inicialmente no Brasil em um trecho do metrô de São Paulo, cujos detalhes podem ser vistos em Amaral Filho (1987).

De fato, como já foi dito na introdução, em alguns dos principais túneis construídos, como o túnel sobre o Canal da Mancha, ligando a Inglaterra à França, e o Great Belt Tunnel, sob o mar Báltico, foi utilizado o CPM.

O revestimento dos túneis é composto de aduelas formadas por vários segmentos pré-moldados emendados na direção transversal e longitudinal ao eixo do túnel, conforme mostrado na Fig. 12.18. Essas emendas devem garantir não só a resistência e rigidez do revestimento, mas também a durabilidade e estanqueidade.

## 12.5 Metrôs e similares

Os tipos de obras aqui enquadrados são os metrôs e outras obras do gênero para o transporte de passageiros. O CPM tem sido aplicado em diversas partes desses tipos de obra, relacionados a seguir:

- **Túneis:** conforme apresentado na seção anterior, uma das principais formas de execução de revestimento de túneis é com segmentos de CPM.
- **Elevados:** as formas básicas de aplicação do CPM nas estruturas dos elevados são, em linhas gerais, aquelas apresentadas nas pontes. No entanto, algumas particularidades em função dos dispositivos de fixação e sustentação das composições podem conduzir a formas próprias.
- **Estações de metrô:** no caso de estações de superfície, podem, em princípio, ser empregadas as formas básicas de edifícios de um ou múltiplos pavimentos e das coberturas. No caso de estações subterrâneas, pode ter também interesse a aplicação do CPM em partes da construção.

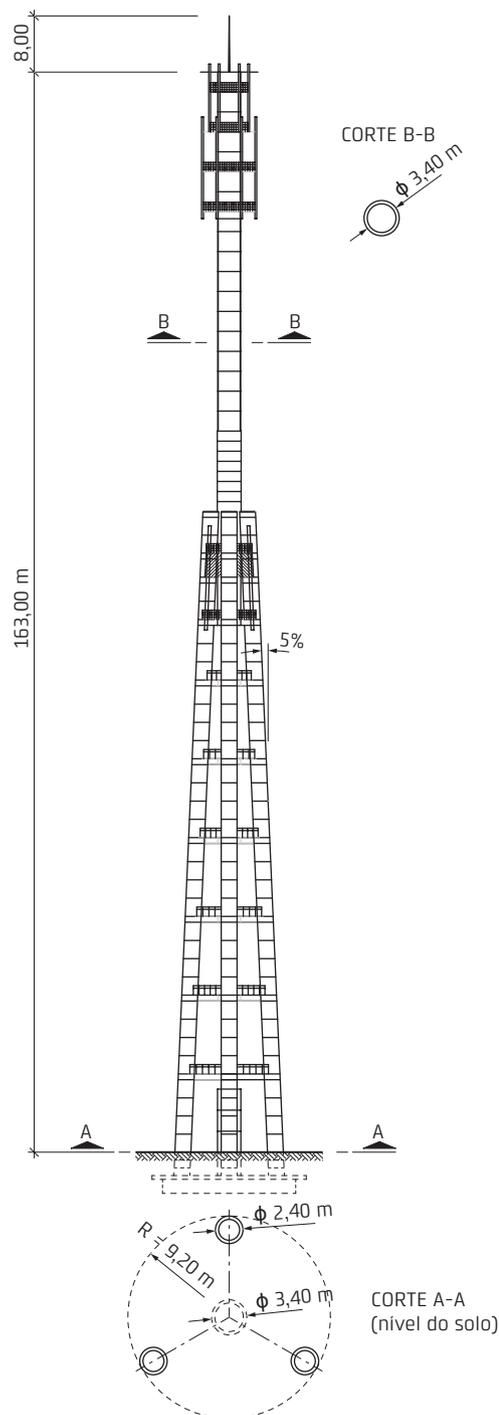
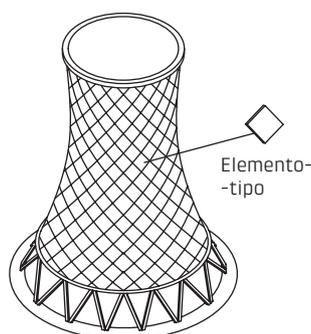
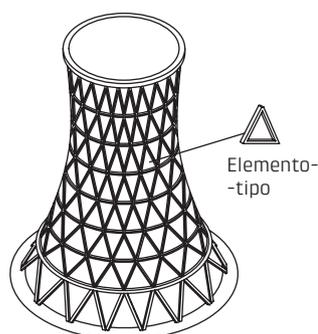


Fig. 12.13 Exemplo de aplicação em torre de transmissão – Telecommunication Tower of Verdun (Bélgica)

a) Com elemento losangular



b) Com elemento triangular com nervuras



c) Com elemento trapezoidal com nervuras

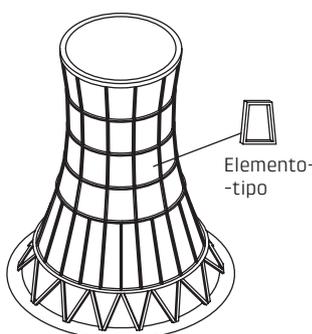


Fig. 12.14 Aplicação em torres de refrigeração em forma de hiperbolóides de revolução

# Parte III

ELEMENTOS DE  
PRODUÇÃO ESPECIALIZADA



# LAJES FORMADAS POR VIGOTAS PRÉ-MOLDADAS

# 13

## 13.1 Considerações iniciais

As lajes nervuradas formadas por elementos pré-moldados correspondentes às nervuras, as chamadas vigotas pré-moldadas, são, conforme ilustrado na Fig. 13.1, constituídas basicamente de: a) elementos lineares pré-moldados, que correspondem às nervuras, dispostos espaçadamente em uma direção; b) elementos de enchimento, colocados sobre os elementos pré-moldados, e c) concreto moldado no local (CML).

Em relação às seções transversais, os elementos pré-moldados podem ser com ou sem armadura saliente, em forma de T invertido ou I. Os materiais de enchimento normalmente utilizados são blocos vazados de material cerâmico ou concreto, ou ainda blocos de poliestireno expandido, conhecidos pela sigla EPS. Na Fig. 13.2 estão mostradas algumas alternativas.

Conforme adiantado no Cap. 6, no Brasil têm sido bastante empregadas as vigotas de concreto armado de seção T invertido, as vigotas de concreto protendido de seção T invertido e as vigotas de seção retangular com armadura saliente, em forma de treliça.

As vigotas pré-moldadas de concreto armado de seção T invertido são executadas em fôrmas metálicas simples, em pequenas unidades de produção, com instalações físi-

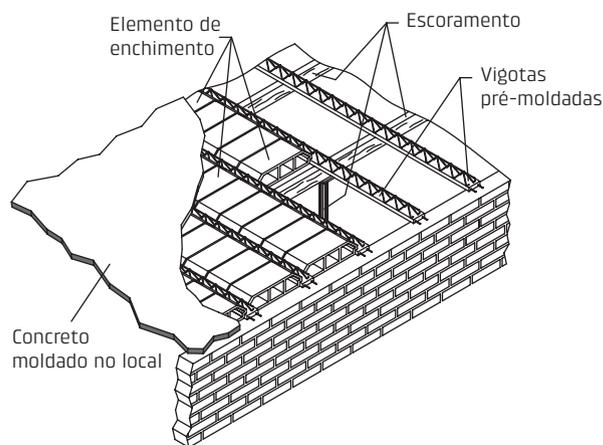


Fig. 13.1 Esquema construtivo de laje formada com vigotas pré-moldadas

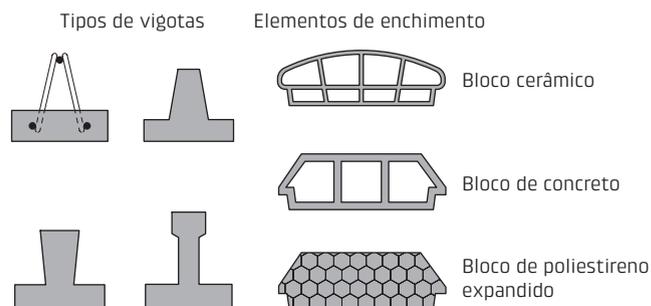


Fig. 13.2 Tipos de vigotas e de elementos de enchimento empregados nas lajes

para receber as vigotas, que permanece até o CML atingir resistência adequada. De fato, para obter elementos pré-moldados bastante leves, recorre-se normalmente a uma quantidade razoável de cimbramento. Em geral, o número de linhas de escoras do cimbramento é maior para as lajes de VT e menor para lajes de VP.

Em relação às situações transitórias, em geral, a situação mais desfavorável é a fase de colocação da capa de concreto no local. Nessa fase, devem ser considerados o peso dos elementos da laje, do CML e ainda uma sobrecarga de construção de pelo menos  $1,0 \text{ kN/m}^2$ . Quando for o caso, deve ainda ser prevista a passagem de equipamento de distribuição do concreto.

Cabe registrar ainda que se pode considerar o coeficiente de ação dinâmica igual a 1, para os casos de movimentação manual dos elementos. Também vale lembrar que, por se tratar de situações transitórias, o coeficiente de ponderação das ações pode ser considerado igual a 1,2.

Ainda em relação às verificações das situações transitórias, é recomendado limitar as flechas das nervuras entre as linhas de escoramento na fase de colocação da capa de concreto. O valor indicado pela EF-96 é de  $1/1.000$  da distância entre linhas de escoras e não superior a 3 mm.

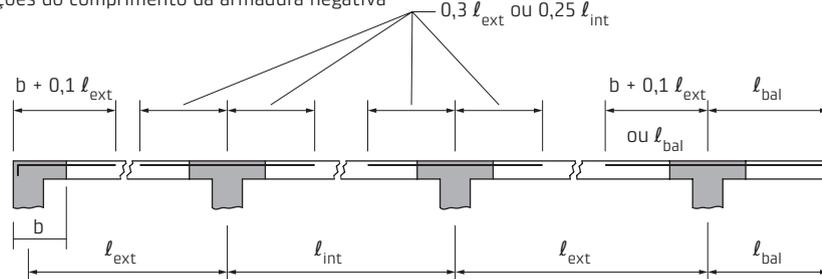
Merece ser destacado que, por se tratar de elementos compostos, aplicam-se em geral, nesse tipo construtivo, as recomendações de execução da capa de concreto apresentadas no Cap. 4.

### 13.3 Particularidades das lajes com vigotas treliçadas

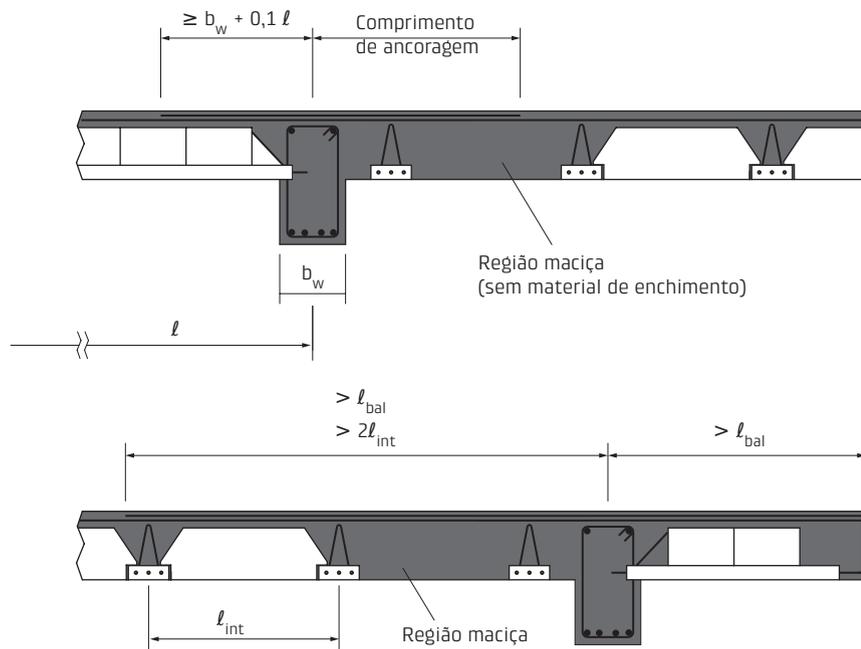
Com a utilização de vigotas com armação treliçada, pode-se obter efetivamente lajes armadas nas duas direções. Nesse tipo de laje, aplicam-se às indicações de projeto das lajes nervuradas ou mistas das estruturas de CML, com as particularidades do CPM apenas no que se refere às situações transitórias. Essa possibilidade de laje armada em duas direções tem sido explorada no país já há algum tempo, em pavimentos, com ou sem vigas, principalmente utilizando enchimento, recuperado ou não, de EPS. Um exemplo de aplicação de laje armada nas duas direções pode ser visto em Cunha (2012).

A análise dos momentos fletores negativos nos apoios foi objeto da dissertação de Magalhães (2001). Com base em resultados experimentais e teóricos concluiu-se que: a) as lajes apresentam boa capacidade de rotação plástica, b) com alta taxa de armadura negativa não ocorre

a) Indicações do comprimento da armadura negativa



b) Situações particulares com vigotas concorrendo no apoio em direções perpendiculares



**Fig. 13.5** Detalhes da armadura negativa nas lajes formadas com vigotas pré-moldadas  
Fonte: adaptado da EF-96 (Espanha, 1997).

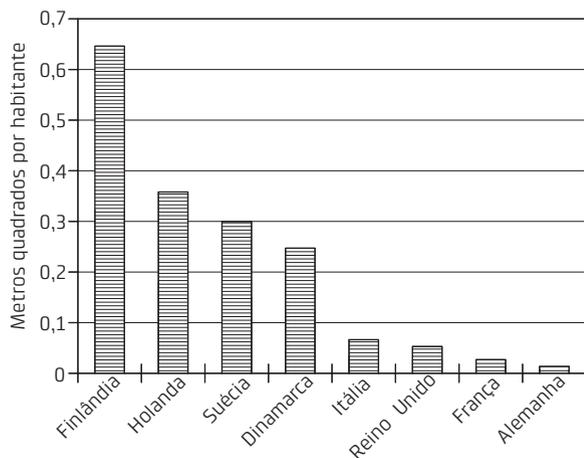


## LAJES FORMADAS POR PAINÉIS ALVEOLARES

# 14

### 14.1 Considerações iniciais

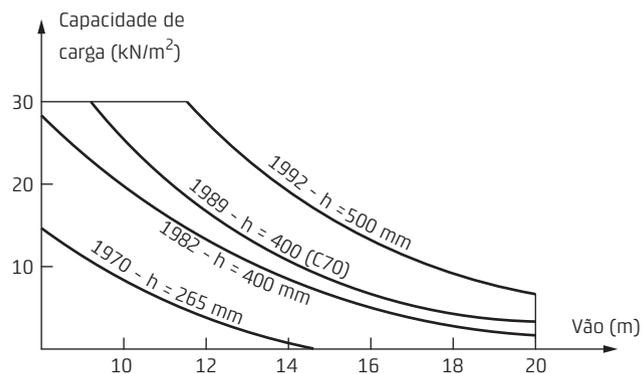
Os painéis alveolares constituem-se em um dos mais populares elementos pré-moldados empregados no mundo, em especial na América do Norte e Europa Ocidental. Já em 1990, a produção mundial desse tipo de elemento era estimada em 150 milhões de metros cúbicos por ano, conforme Acker (1990). Ainda nesse sentido, são ilustrativos os indicadores de produção anual por habitante de alguns países da Europa, apresentados na Fig. 14.1.



**Fig. 14.1** Produção anual de painéis alveolares em países da Europa em 1990  
Fonte: adaptado de Acker (1990).

Em razão do emprego em grande escala em nível mundial, existem associações internacionais somente para esse tipo de elemento pré-moldado, como a International Prestressed Hollowcore Association (IPHA) e a The Association of Manufacturers of Prestressed Hollow Core Floors (Assap).

Esse tipo de elemento tem continuamente evoluído ao longo dos anos, em termos de altura e de vão, conforme mostrado na Fig. 14.2.



**Fig. 14.2** Evolução dos painéis alveolares empregados nas lajes  
Fonte: adaptado de Janhunem (1996).

Os painéis alveolares tiveram origem na Alemanha e hoje a sua técnica de execução é bastante desenvolvida na Europa e na América do Norte.

do fabricante e do projetista da estrutura devem estar devidamente estabelecidas.

Neste livro, apresenta-se uma visão geral do assunto, direcionada aos painéis de concreto protendido com aderência inicial, remetendo o aprofundamento dos aspectos envolvidos para textos específicos e indicações normativas, bem como outras partes do livro. As publicações recomendadas para o assunto, por apresentar uma abordagem mais completa, são o manual publicado pela Assap (2002), o livro de Elliott e Jolly (2013) e o manual do PCI (Ghosh; Householder, 2015).

## 14.2 Comportamento estrutural e diretrizes de projeto

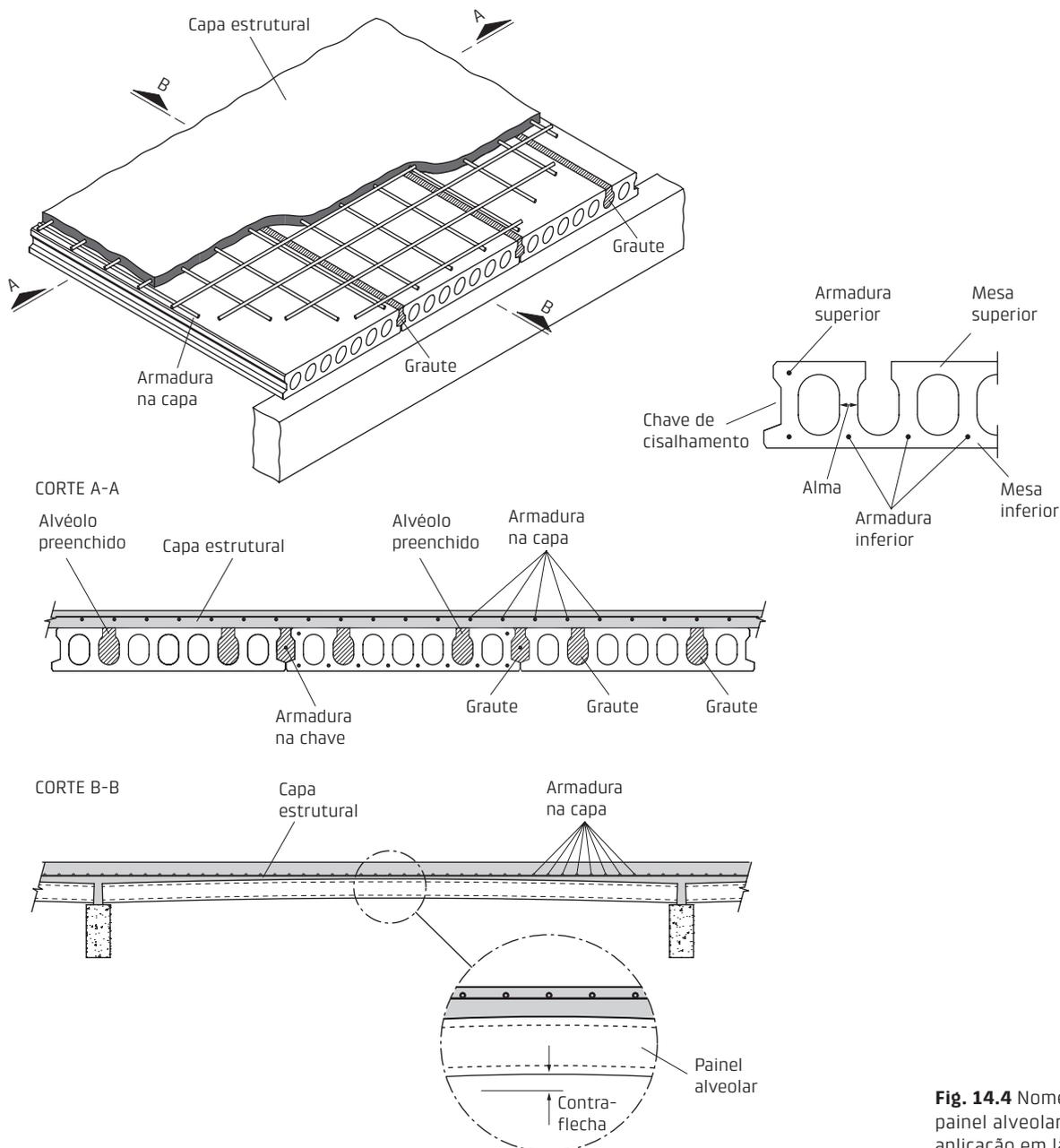
Na Fig. 14.4 apresenta-se a nomenclatura do painel alveolar e de sua aplicação em laje. Trata-se de situação hipoté-

tica para introduzir a denominação de partes constituintes do painel e de sua aplicação em lajes. A Fig. 14.5 mostra as etapas de montagem e de execução da capa estrutural.

Nos painéis de concreto protendido, a armadura é constituída de fios ou cordoalhas de protensão dispostos na mesa inferior, podendo também ocorrer na mesa superior.

Os painéis podem ter parte dos alvéolos preenchidos de graute antes da liberação da força de protensão na pista ou após a liberação da protensão, portanto com o concreto endurecido.

Uma das partes críticas do projeto dos painéis alveolares é a sua resistência à força cortante, pois, via de regra, não se coloca armadura transversal na alma. Assim, o preenchimento de parte dos alvéolos serve para aumentar a resistência à força cortante. O preenchimento de alvéolos no local definitivo serve também para melhorar a



**Fig. 14.4** Nomenclatura do painel alveolar e de sua aplicação em lajes



## ELEMENTOS ENTERRADOS: TUBOS CIRCULARES E GALERIAS CELULARES

# 15

### 15.1 Considerações iniciais

Dois tipos de elementos tratados no Cap. 11 se destacam e são objeto de produção especializada e de normalização: os tubos circulares de concreto e as galerias celulares, que são galerias de seção retangular, também chamadas de aduelas.

Assim como nos painéis alveolares, também existem associações de produtores. Destaca-se entre elas a American Concrete Pipe Association (ACPA), que engloba os dois tipos de elementos e edita um importante manual sobre os tubos de concreto (ACPA, 2007). No Brasil, a Associação Brasileira de Tubos de Concreto (ABTC) também atua nos dois tipos de elementos e publicou também um manual técnico abordando ambos (Chama Neto, 2008).

Esses dois elementos possuem algumas características em comum, mas a distribuição das pressões do solo tende a apresentar diferenças significativas, o que acarreta critérios diferentes para o projeto estrutural. Normalmente, os tubos circulares são projetados para classes padronizadas de resistência definidas a partir de um ensaio de compressão diametral chamado de método indireto de projeto. Já as galerias celulares são projetadas de forma tradicional.

A apresentação desse assunto é baseada nas seguintes publicações do autor: El Debs (2003b), que trata do projeto

estrutural de tubos circulares, e El Debs (2008), que constitui um capítulo do citado manual da ABTC.

### 15.2 Tubos circulares

Os tubos circulares de concreto constituem-se na principal alternativa construtiva para galerias de drenagem e para esgotos urbanos, no mundo todo. Empregados na forma de linha simples e, com certo prejuízo de funcionalidade, em associações de mais de uma linha, eles varrem uma faixa relativamente grande de capacidade de escoamento.

Os tubos circulares de concreto podem ser de concreto simples ou de concreto armado. Os tubos de concreto simples são produzidos para pequenos diâmetros, normalmente até 0,8 m. Os tubos de concreto armado, produzidos regularmente, apresentam diâmetro variando de 0,6 m a 1,5 m.

Em relação à geometria para fazer a ligação entre eles, os tubos podem ser com *ponta e bolsa* ou *meio encaixe*. A estimativa do peso dos tubos de concreto está apresentada no Cap. 11.

Os tubos circulares são normalmente executados em fábricas, com os mais variados graus de sofisticação. Em relação à execução, os tubos de concreto diferem entre si

A carga de ruptura corresponde à máxima força que se consegue atingir no ensaio de compressão diametral. Essa condição equivale ao estado-limite último de ruína do tubo.

Com base no valor da carga de fissura (trinca) e da carga de ruptura no ensaio de compressão diametral, pode-se especificar o tubo a partir da Tab. 15.1 com as classes dos tubos em função das forças.

Para a determinação da classe de tubos, pode-se recorrer a softwares, como o disponível no site da ABTC, chamado de Software da Classe de Resistência para Tubos de Concreto – 2010.

O dimensionamento dos tubos para atender aos valores mínimos no ensaios de compressão diametral,

conforme a classe indicada na Tab. 15.1, é de responsabilidade do fabricante. As diretrizes para o dimensionamento de tubos de concreto armado podem ser vistas em El Debs (2008). Cabe destacar que existem vários fatores que influenciam a resistência e fazem parte do controle de execução, com os quais os fabricantes ajustam a armadura dos tubos para atingir a resistência no ensaio padronizado.

Detalhes do controle de qualidade e critérios de aceitação e rejeição são estabelecidos na NBR 8890 (ABNT, 2007a).

A Fig. 15.10 mostra etapas da montagem de linha de tubos circulares de concreto.

**Tab. 15.1** CARGAS MÍNIMAS DE TRINCA E DE RUPTURA, CONFORME A NBR 8890

DN <sup>(a)</sup>	Água pluvial								Esgoto sanitário					
	Carga mín. fissura kN/m				Carga mín. ruptura kN/m				Carga mín. fissura kN/m			Carga mín. ruptura kN/m		
Classe	PA1	PA2	PA3	PA4	PA1	PA2	PA3	PA4	EA2	EA3	EA4	EA2	EA3	EA4
300	12	18	27	36	18	27	41	54	18	27	36	27	41	54
400	16	24	36	48	24	36	54	72	24	36	48	36	54	72
500	20	30	45	60	30	45	68	90	30	45	60	45	68	90
600	24	36	54	72	36	54	81	108	36	54	72	54	81	108
700	28	42	63	84	42	63	95	126	42	63	84	63	95	126
800	32	48	72	96	48	72	108	144	48	72	96	72	108	144
900	36	54	81	108	54	81	122	162	54	81	108	81	122	162
1.000	40	60	90	120	60	90	135	180	60	90	120	90	135	180
1.100	44	66	99	132	66	99	149	198	66	99	132	99	149	198
1.200	48	72	108	144	72	108	162	216	72	108	144	108	162	216
1.500	60	90	135	180	90	135	203	270	90	135	180	135	203	270
1.750	70	105	158	210	105	158	237	315	105	158	210	158	237	315
2.000	80	120	180	240	120	180	270	360	120	180	240	180	270	360
Carga diametral de fissura/ruptura kN/m														
	40	60	90	120	60	90	135	180	60	90	120	90	135	180

Nota: a) diâmetro nominal em mm.

Observações:

1) Carga diametral de fissura (trinca) ou ruptura é a relação entre a carga de fissura (trinca) ou ruptura e o diâmetro nominal do tubo.

2) Outras classes podem ser admitidas mediante acordo entre fabricante e comprador, devendo ser satisfeitas as condições estabelecidas nessa norma para tubos de classe normal. Para tubos armados, a carga mínima de ruptura deve corresponder a 1,5 da carga mínima de fissura (trinca).

Fonte: ABNT (2007a).



**Fig. 15.10** Montagem de linha de tubos circulares de concreto

## OUTROS ELEMENTOS: ESTACAS, POSTES, DORMENTES E BARREIRAS

# 16



### 16.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são tratados quatro tipos de elementos de concreto pré-moldado (CPM) de uso intensivo e especializado: a) estacas, b) postes, c) dormentes de ferrovias e d) barreiras rodoviárias.

Apresenta-se uma visão geral dos assuntos e são fornecidas as principais normas e códigos relacionados aos elementos. Quando possível, foram indicadas publicações sobre aspectos específicos, bem como sobre pesquisas mais recentes a respeito dos assuntos em questão.

### 16.2 Estacas

As estacas de CPM constituem-se em uma importante alternativa construtiva para fundações profundas e para estruturas de arrimo.

Tendo em vista a sua função principal, as estacas podem ser divididas em estacas normais e estacas-pranchas, já tratadas no Cap. 11.

As estacas normais podem ser executadas em concreto armado ou concreto protendido. Na Fig. 16.1 estão mostradas as seções transversais mais empregadas nas estacas normais.

As dimensões das estacas variam desde 0,15 m de lado de seção quadrada até diâmetros da ordem de 1,60 m em obras marítimas e pontes.

A execução das estacas pode ser no canteiro, normalmente em concreto armado, ou nas fábricas, em concreto armado ou protendido. Na execução em fábricas, o concreto pode ser adensado por vibração ou centrifugação. A fabricação das estacas pode ser por extrusão, de forma similar à empregada nos painéis alveolares.

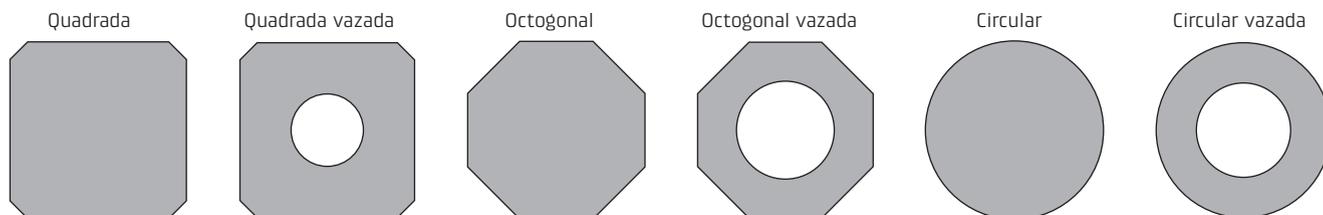


Fig. 16.1 Seções transversais das estacas de CPM

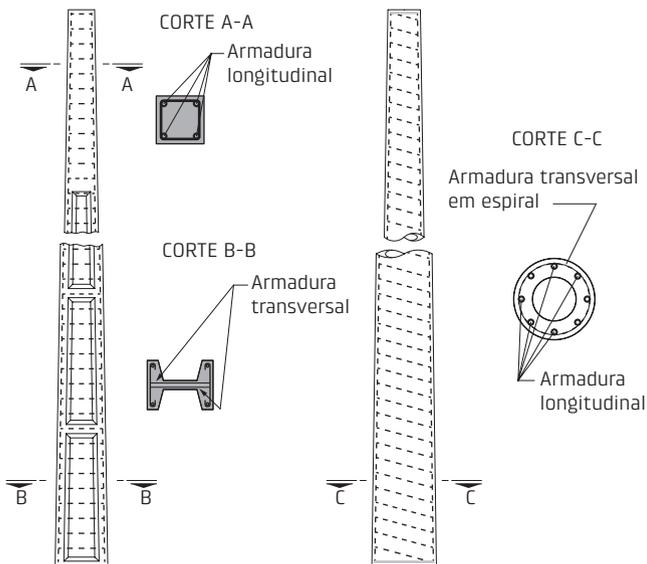


Fig. 16.8 Arranjos da armadura principal dos postes

## 16.4 Dormentes

Os dormentes fazem parte da chamada via permanente ferroviária, que é o sistema de sustentação e rolamento das composições.

Os dormentes de concreto podem ser monobloco ou bibloco. A Fig. 16.9 mostra esses dois tipos de dormentes de concreto. O dormente bibloco é composto de dois blocos de concreto unidos por barra metálica flexível. Os dormentes monobloco podem ser de concreto protendido com pré-tração ou com pós-tração.

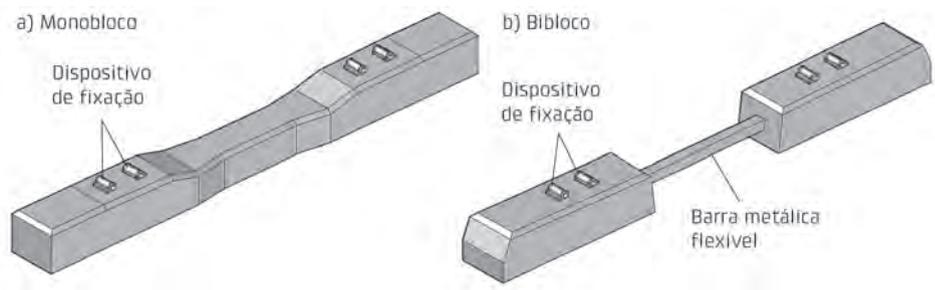


Fig. 16.9 Tipos de dormentes de concreto



Fig. 16.10 Execução e armazenamento de dormentes monobloco

A Fig. 16.10 mostra as etapas da fabricação de dormentes monobloco em pista de protensão e o seu armazenamento.

Comparado com dormentes de outros materiais, os dormentes de concreto têm como característica principal favorável a sua durabilidade.

O comportamento estrutural dos dormentes pode ser idealizado como uma viga sobre apoio elástico sujeita à força concentrada das rodas da composição ferroviária transmitida pelos trilhos. A Fig. 16.11 mostra, de forma simplista, as forças concentradas e a distribuição das reações do lastro, bem como o diagrama de momentos fletores, para dormente monobloco. Com base nessa figura, pode-se perceber o interesse da forma do dormente bibloco, na qual a transmissão das forças dos trilhos para o lastro se torna mais bem definida e, em tese, teria um melhor aproveitamento dos materiais. Dessa figura, pode-se também compreender a variação da seção dos dormentes monobloco.

Em Bastos (1999) pode ser vista uma resenha do desenvolvimento desse componente, bem como indicações para o seu projeto.

A aceitação dos dormentes, bem como dos elementos a eles relacionados, é baseada em ensaios estáticos e dinâmicos. Normalmente, esses ensaios são definidos pela publicação da American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (Arema, 2010).

Os trilhos da ferrovia são ligados aos dormentes mediante os fixadores, que são dispositivos metálicos embu-

# EXEMPLOS NUMÉRICOS

## anexo A

Este anexo tem por objetivo ajudar no entendimento dos conceitos apresentados, mediante exemplos numéricos, dos seguintes assuntos: a) tolerâncias e folgas, b) estabilidade global, c) consolos e dentes de concreto e d) cálice de fundação.

Os exemplos foram escolhidos para propiciar o cálculo manual, para facilitar a compreensão e procurar fornecer a ordem de grandeza dos valores envolvidos. No entanto, algumas situações podem extrapolar as aplicações reais para poder realçar determinados aspectos envolvidos, o que se justifica pelo caráter didático dos exemplos.

### A.1 Tolerâncias e folgas

Calcular o comprimento nominal da viga e o comprimento do consolo do pilar para a situação mostrada na Fig. A.1.

Dados:

- distância entre eixos dos pilares  $l_m = 15,0$  m;
- largura do pilar  $b = 0,50$  m;
- distância da fundação até o consolo  $h_{ap} = 6,50$  m.

Considerar:

- espaço mínimo para a montagem = 5 mm;
- comprimento mínimo do apoio = 250 mm;
- viga de concreto armado;
- tolerâncias indicadas na NBR 9062 (ABNT, 2017a).

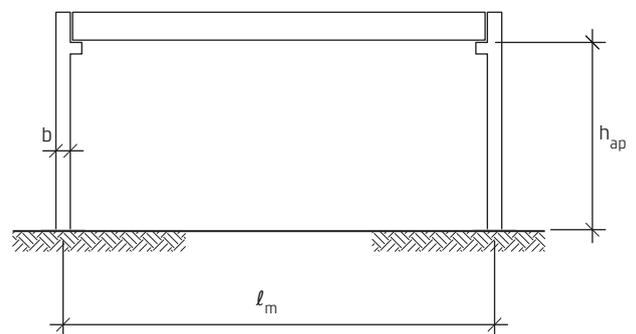


Fig. A.1 Esquema da estrutura

Observações:

- o comprimento mínimo de apoio inclui a almofada de apoio e as distâncias livres até as extremidades (ver seção 3.4.3);
- para o vão de 15,0 m, seria mais indicado CP, conforme adiantado; por questões didáticas, está sendo considerada uma viga de concreto armado.

#### A.1.1 Cálculo das variações volumétricas

Na avaliação das variações volumétricas, que seriam o alongamento ( $\Delta l^+$ ) e o encurtamento máximo ( $\Delta l^-$ ), pode-se considerar:

$$\Delta l \cong (l_m - b)(\epsilon_{cs} + \epsilon_{cc} + \epsilon_{te})$$

### A.2.3 Considerando as deformações das ligações dos pilares com a fundação

Essa análise é feita apenas para a combinação de ações G Q e W + desaprumo, por ser a situação em que os efeitos de segunda ordem são maiores.

Nesse caso, a flecha na extremidade é afetada pela deformação da ligação dos pilares na base, conforme mostra a Fig. A.6, para a estrutura equivalente.

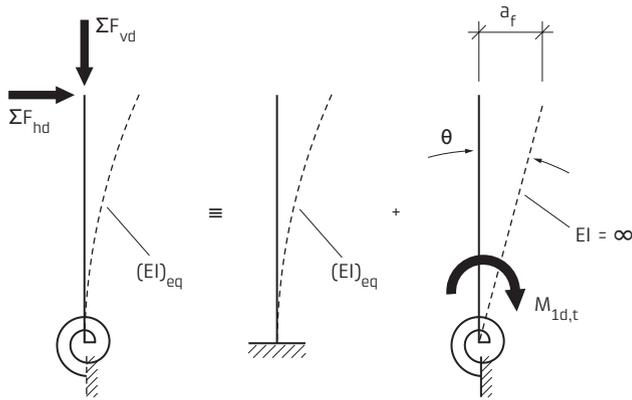


Fig. A.6 Consideração da deformação da fundação

Assim, à deformação do pilar na estrutura equivalente considerada engastada na base, deve-se acrescentar o deslocamento devido à deformação da ligação. Para o cálculo dessa parcela, determina-se a rotação na base com:

$$\theta = \frac{M}{K_f}$$

em que  $K_f$  corresponde, na estrutura equivalente, à soma das rigidezes de cada ligação do pilar na fundação.

Assim, têm-se:

$$K_f = 3 \times 80 = 240 \text{ MNm}$$

$$M_{1d,t} = 746 \text{ kNm}$$

$$\theta = \frac{M_{1d,t}}{K_f} = \frac{746}{240 \times 10^3} = 3,11 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$a_f = h_{ap} \theta = 6,5 \times 10^3 \times 3,11 \times 10^{-3} = 20,2 \text{ mm}$$

O efeito da deformação da fundação é somado ao efeito de G, Q e W + desaprumo, determinado no  $\Delta M_d$ , calculado na seção anterior:

$$\Delta M_d = (\Delta M_d)_{ant} + 840 \times 20,2 \times 10^{-3} = 114,9 + 16,97 = 131,9 \text{ kNm}$$

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_d}{M_{1d}}} = \frac{1}{1 - \frac{131,8}{746}} = 1,215$$

Como é de esperar, o efeito de segunda ordem é maior, amplificando os momentos fletores que produzem tombamento na proporção de 1,182 para 1,215, para esse caso.

Os momentos fletores nos pilares podem ser determinados como no caso anterior. No entanto, deve-se destacar que os momentos fletores que não produzem tombamento na estrutura não são os mesmos do caso anterior, devido à deformação da ligação dos pilares na fundação.

### A.2.4 Comparação com o procedimento apresentado em Hogeslag

Essa comparação é limitada à comparação dos coeficientes que multiplicam os momentos fletores que produzem tombamento, para a combinação de ações G, Q e W + desaprumo.

#### a. Para fundação indeformável

Empregando a redução de rigidez dos pilares conforme o procedimento proposto, tem-se:

$$EI_{eq, red} = EI_{eq}/3 = (30,0 \times 10^6 \times 6,4 \times 10^{-3})/3 = 64,0 \times 10^{-3} \text{ kNm}^2$$

O valor da força  $F_e$  calculada considerando o comprimento de flambagem da Tab. 2.15 com dois vãos é de:

$$F_e = \frac{\pi^2 (EI)_{eq}}{l_e^2} = \frac{\pi^2 \cdot 64,0 \times 10^3}{(1,6 \times 6,5)^2} = 5,84 \text{ MN}$$

Como a fundação é considerada indeformável ( $F_f = \infty$ ), tem-se:

$$\frac{1}{F_{ref}} = \frac{1}{F_e} + \frac{1}{F_f}$$

E, assim:

$$F_{ref} = 5,84 \text{ MN}$$

Portanto, o parâmetro  $\beta$  e o coeficiente  $\gamma$  valem:

$$\beta = \frac{F_{ref}}{\sum F_{vd}} = \frac{5,84 \times 10^3}{840} = 6,95$$

$$\gamma = \frac{1}{1 - 1/\beta} = \frac{1}{1 - 1/6,95} = 1,168$$

Esse valor pode ser comparado com o valor de  $0,95 \times 1,182 = 1,123$  do coeficiente  $\gamma_z$ .

#### b. Com ligação deformável

Nesse caso, o valor de  $F_f$  vale:

$$F_f = \frac{K}{h_a} = \frac{3 \times 80 \times 10^3}{6 \times 5} = 36,9 \text{ MN}$$

$A_{svp} = \frac{F_{vd}}{f_{yd}} = \frac{284 \times 10^{-3}}{435} = 6,53 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 6,53 \text{ cm}^2$ , a ser disposta em cada canto do colarinho

Cabe observar que a coincidência dos valores das armaduras horizontal principal e vertical principal se deve ao fato de  $\beta$  ser  $45^\circ$ .

As armaduras secundárias são determinadas com:

- *Horizontal*

$$A_{shs} = 0,5A_{shp} = 0,5 \times 6,53 = 3,26 \text{ cm}^2$$

- *Vertical*

$$A_{svs} = 0,5A_{svp} = 0,5 \times 6,53 = 3,26 \text{ cm}^2$$

A escolha das bitolas e barras deve ser feita por tentativas e ajustes. Começando pela armadura horizontal principal e procurando atender à recomendação de a parte externa ser o dobro da interna, tem-se: parte externa  $4\phi 12,5$  ( $A_s = 5,0 \text{ cm}^2$ ) e parte interna  $4\phi 10$  ( $A_s = 3,14 \text{ cm}^2$ ), totalizando  $8,14 \text{ cm}^2$ , que devem ser colocadas no topo do colarinho a  $0,2\ell_{emb} = 0,2 \times 0,8 = 0,16 \text{ m}$ , o que levaria a um espaçamento da ordem de  $40 \text{ mm}$ .

Tendo em vista que a armadura escolhida ( $8,14 \text{ cm}^2$ ) é bem maior que a necessária ( $6,53 \text{ cm}^2$ ) e que o espaçamento das barras é baixo, adotou-se um aumento do comprimento de embutimento de  $0,80 \text{ m}$  para  $0,90 \text{ m}$ . Para propiciar condições de alojar as armaduras principais, a espessura das paredes do colarinho foi aumentada para  $0,22 \text{ m}$ .

Refazendo os cálculos da armadura, com essa nova altura de embutimento tem-se:

$$A_{shp} = 5,99 \text{ cm}^2$$

$$A_{svp} = 6,82 \text{ cm}^2$$

$$A_{shs} = 3,00 \text{ cm}^2$$

$$A_{svs} = 3,41 \text{ cm}^2$$

As bitolas e as barras para cada caso, bem como as dimensões adotadas do cálice, estão apresentadas a seguir:

- *armadura horizontal principal*: parte externa  $3\phi 12,5$  ( $A_s = 3,75 \text{ cm}^2$ ) e parte interna  $3\phi 10$  ( $A_s = 2,36 \text{ cm}^2$ ), totalizando  $6,11 \text{ cm}^2$ ;
- *armadura vertical principal (em cada canto)*: três grampos de  $12,5$  ( $6\phi 12,5$ ) ( $A_s = 7,50 \text{ cm}^2$ );
- *armadura horizontal secundária*: parte externa e parte interna  $3\phi 8$  ( $A_s = 1,50 \text{ m}^2$ ), totalizando  $3,00 \text{ cm}^2$ ;
- *armadura vertical secundária*: três grampos de  $10$  ( $6\phi 10$ ) ( $A_s = 4,71 \text{ cm}^2$ );
- *comprimento de embutimento*:  $\ell_{emb} = 0,90 \text{ m}$ ;

- *dimensão externa do colarinho*:  $h_{ext} = 0,94 \text{ m}$  (nas duas direções);
- *dimensão interna do colarinho*:  $h_{int} = 0,50 \text{ m}$  (nas duas direções);
- *espessura do colarinho*:  $h_c = 220 \text{ mm}$ ;
- *embutimento do cálice na fundação*:  $90 \text{ mm}$ .

A Fig. A.11 mostra o esquema da armadura sugerida para o cálice.

Nessa situação, a armadura horizontal principal tem espaçamento entre barras de  $60 \text{ mm}$ , bem como a armadura vertical nos cantos, o que resulta em espaço livre entre barras da ordem de  $50 \text{ mm}$ . Os espaçamentos livres entre barras é relativamente pequeno, mas reforça a necessidade de detalhar cuidadosamente a armadura, que é um dos objetivos do exemplo.

Uma alternativa para o detalhamento da armadura é contar com a armadura vertical próxima do canto, conforme estudo de Nunes (2009). Contando com essa armadura, a armadura vertical nos cantos passaria para dois grampos de  $12,5$ , que, somada aos outros dois grampos de  $10$  da parede próximos do canto, resultaria em  $A_s = 8,14 \text{ cm}^2$ . Com isso, melhoram as condições de alojamento da armadura nos cantos, podendo inclusive reduzir a espessura das paredes do colarinho para  $0,20 \text{ m}$ .

#### A.4.4 Comparação com outros tipos de interfaces e procedimentos

Com o objetivo de analisar os resultados, faz-se aqui uma comparação com outros tipos de interfaces e procedimentos.

Uma comparação importante é com o procedimento apresentado em Leonhardt e Mönnig (1978b), que constava nas antigas versões deste livro e da NBR 9062 (ABNT, 2017a). Esse procedimento consiste em não levar em conta o atrito e o deslocamento da resultante das pressões na base do pilar do seu eixo para a distância de  $h/4$ , ou seja, considerar  $e_{nb} = 0$ .

Outra comparação aqui incluída é com a interface rugosa, conforme o padrão definido na seção 3.7.1. Nesse caso, o coeficiente de atrito utilizado é de  $0,6$  e o deslocamento da resultante das pressões da base do pilar ( $e_{nb}$ ) é igual a  $h/4$ .

Essa comparação é feita considerando o comprimento de embutimento de  $0,80 \text{ m}$ , adotado inicialmente. A Tab. A.1, apresenta a comparação das armaduras principais, bem como a resultante  $H_{fd}$ , em que os valores determinados na seção anterior são usados como referência.

Como seria de esperar, não levar em conta o atrito e o deslocamento da resultante das pressões da base do pilar aumenta significativamente as armaduras verticais e horizontais. Nesse caso, o aumento das armaduras principais foi da ordem de  $50\%$ .

# PRINCÍPIOS E VALORES DA CONSIDERAÇÃO DA SEGURANÇA DO PCI

## anexo B

O objetivo deste anexo é auxiliar no entendimento e no uso de parte da formulação apresentada no texto principal em relação à consideração da segurança.

Os motivos dessa apresentação são: a) a segurança, nas formulações do PCI, apresentadas em várias oportunidades ao longo do texto principal, é considerada de forma diferente das normas brasileiras, b) por razões circunstanciais, em algumas situações foi feita a adaptação para a forma de considerar a segurança das normas brasileiras, mas em outras partes não foi feita essa adaptação, principalmente em relação ao projeto das ligações.

Com este anexo, pretende-se alertar para a diferença na forma de considerar a segurança, bem como auxiliar na formulação de juízos e de emprego das expressões apresentadas.

Para facilitar a leitura, foi feita uma adaptação da nomenclatura original do PCI, procurando usar os símbolos o mais próximo possível dos utilizados no texto principal.

A ideia é fornecer uma visão geral sobre o assunto, limitando-se ao fornecimento de valores básicos.

A consideração da segurança apresentada no manual do PCI (2010) é baseada no ACI 318 (ACI, 2011). Nesse documento é feita referência às exigências de resistência (correspondentes aos estados-limite últimos) e de ser-

viço (correspondentes aos estados-limite de serviço). No entanto, é realizado um detalhamento apenas quanto às exigências de resistência.

A condição básica de resistência é colocada na seguinte forma:

$$\phi R_{nom} \geq U \quad \text{(B.1)}$$

em que:

$R_{nom}$  = grandeza corresponde à resistência nominal;

$U$  = grandeza correspondente ao efeito das ações;

$\phi$  = coeficiente de redução da resistência.

A capacidade resistente é calculada com as resistências nominais dos materiais. Assim, por exemplo, o momento fletor resistente em uma seção retangular, sem armadura de compressão e com a ruína governada pela resistência da armadura, pode ser determinada por:

$$M_{nom} = A_s f_y (d - y / 2) \quad \text{(B.2)}$$

em que:

$A_s$  = área da armadura de tração;

$f_y$  = resistência nominal do aço da armadura;

$d$  = altura útil;

$y$  = altura do bloco de compressão.

# DIMENSIONAMENTO DE APOIO DE ELASTÔMERO

## anexo C

Esse assunto foi introduzido na seção 3.5.5 como o tipo de almofada mais empregado nos apoios de elementos fletidos. Este anexo objetiva fornecer os critérios para o dimensionamento desse componente.

Conforme visto naquela seção, o dimensionamento das almofadas é feito a partir de um pré-dimensionamento em que são determinadas as dimensões em planta ( $a$  na direção do eixo longitudinal do elemento apoiado e  $b$  na direção perpendicular), sendo  $h$  a espessura da almofada (ver Fig. 3.69).

As almofadas podem ser com camada simples, empregadas quando as reações de apoio são de pequena intensidade. Esse caso é típico de aplicações em edificações. Quando as reações forem de grande intensidade, como em geral ocorre nas pontes, emprega-se apoio com múltiplas camadas intercaladas com chapas de aço, formando o chamado aparelho de apoio cintado, conforme adiantado. Essa apresentação é direcionada às almofadas simples, ou seja, com um única camada, pois cobrem praticamente todas as situações em edificações.

Como o material é muito deformável, a análise das tensões e deformações das almofadas de elastômero não é simples, pois as deformações são da mesma ordem de grandeza das dimensões iniciais. Em geral, as expressões para a determinação das tensões e deformações não são

baseadas apenas em análise teórica, pois é necessário fazer ajustes com resultados experimentais. Esse assunto pode ser visto com maiores detalhes no relatório apresentado em Stanton et al. (2006).

As verificações que compõem o dimensionamento do apoio de elastômero são:

- *Verificações de limites de tensão:*
  - » limite de tensão de compressão;
  - » limite de tensão de cisalhamento.
- *Verificações de limites de deformação:*
  - » limite de deformação de compressão (afundamento);
  - » limite de deformação por cisalhamento.
- *Verificações de descolamentos:*
  - » segurança contra o deslizamento;
  - » segurança contra o levantamento da borda menos comprimida.
- *Outras verificações:*
  - » condição de estabilidade;
  - » espessura da chapa de aço, no caso de apoio cintado.

Essas verificações para o elastômero simples (não cintado) podem ser feitas com as indicações apresentadas nas linhas que se seguem, conforme a nomenclatura da Fig. C.1, utilizando os subscritos “lon” para longa duração e “cur” para curta duração, e a aproximação  $\operatorname{tg} \theta = \theta$ .

# ALMOFADAS DE ARGAMASSA MODIFICADA

## anexo D

### **D.1** Considerações iniciais

Neste anexo são fornecidos mais detalhes sobre as almofadas de argamassa modificada (AAM), que foram apresentadas na seção 3.5.5.

Esse tipo de almofada poderia ainda ser empregado nas ligações pilar × pilar e parede × parede na direção horizontal, ou em outras situações em que ocorrerem juntas submetidas predominantemente a tensões de compressão relativamente elevadas.

Assim, pode-se caracterizar duas formas de aplicação das AAM: a) nos apoios de elementos fletidos nos quais a transferência de tensões de compressão é relativamente baixa e b) em ligações submetidas predominantemente a tensões de compressão relativamente elevadas.

Em relação à primeira forma de aplicação, como apoio de elementos fletidos, as AAM seriam uma alternativa às outras apresentadas na seção 3.5.5, principalmente para as almofadas de elastômero.

Conforme adiantado, as almofadas de elastômero possibilitam acomodar as imperfeições na superfície de contato e permitem, com pouca restrição, a rotação e a translação em relação ao eixo longitudinal dos elementos apoiados (ver Anexo C). A rotação permitida faz com que o comportamento da ligação seja bem próximo ao da ligação articu-

lada. A translação horizontal possibilita o alívio de tensões que seriam introduzidas pela variação de comprimento dos elementos horizontais apoiados. Esta última característica representa uma grande vantagem desse tipo de material, especialmente quando tais variações de comprimento introduzem na estrutura esforços de grande magnitude. Já as AAM acomodariam imperfeições de forma menos eficiente, pois o material seria menos deformável. Além disso, as AAM não possibilitam movimentos horizontais e a capacidade de rotação é bem mais limitada. Portanto, os efeitos de variações volumétricas precisam ser levados em conta com mais cuidado. Por outro lado, por serem bem mais rígidas que as almofadas de elastômero, elas resultam em ligações mais rígidas e, portanto, estruturas menos deformáveis.

Para a segunda forma de aplicação, em ligações submetidas predominantemente a tensões de compressão relativamente elevadas, as AAM seriam uma alternativa para juntas de argamassa ou graute. As almofadas de elastômero não são empregadas nessas situações devido ao fato de o material ser bastante deformável e de resistência relativamente baixa. Nessa forma de aplicação, as almofadas teriam a finalidade de acomodar as imperfeições, minimizando os efeitos desfavoráveis da concentração de

são em ligações de concreto pré-moldado, ou seja, visando à segunda forma de aplicações das almofadas.

A composição da argamassa foi ajustada em função do emprego de outro tipo de látex, pois não havia disponibilidade comercial desse componente (látex) usado nas pesquisas anteriores. Os valores médios – resistência à compressão de 27,6 MPa e módulo de elasticidade de 11,53 GPa – estão dentro dos limites estabelecidos como referência para a argamassa modificada.

### D.3 Comportamento em relação à força uniformemente distribuída

Com base no estudo das misturas, as AAM foram moldadas e submetidas à força de compressão em uma máquina universal de ensaio. O objetivo desse ensaio foi analisar a capacidade de deformação das almofadas quando submetidas à compressão uniforme.

Além dos resultados das AAM, em El Debs et al. (2006) são apresentados os resultados de almofadas de elastômero e de dois tipos de madeira. A inclusão da madeira nesse estudo se deve ao fato de ela ser normalmente empregada no armazenamento de elementos de concreto pré-moldado. A madeira 1 (*Pinus taeda*) é considerada uma madeira bastante mole, ao passo que a madeira 2 (*Eucalyptus citriodora*) é considerada uma madeira de características intermediárias. As almofadas de elastômero e de madeira servem como referência para a análise das AAM.

As principais variáveis dos ensaios de compressão uniforme foram as misturas, a espessura das almofadas e a área da almofada. As espessuras empregadas foram 5 mm, 10 mm e 20 mm. As áreas foram de 100 mm × 100 mm e de 150 mm × 150 mm. Apenas os resultados das almofadas de 150 mm × 150 mm são aqui apresentados.

Os ensaios foram feitos em uma máquina universal de ensaios com capacidade de aplicar uma força de compressão de 2.500 kN. A força foi aplicada com uma taxa de 5 kN/s.

A Fig. D.6 mostra uma curva típica tensão × deformação (específica). Como a parte inicial da curva inclui uma acomodação inicial da almofada, a rigidez da almofada foi determinada com a expressão:

$$K = \sigma / (\Delta h / h) \tag{D.1}$$

em que:

$\sigma$  = tensão aplicada;

$\Delta h$  = deformação da almofada;

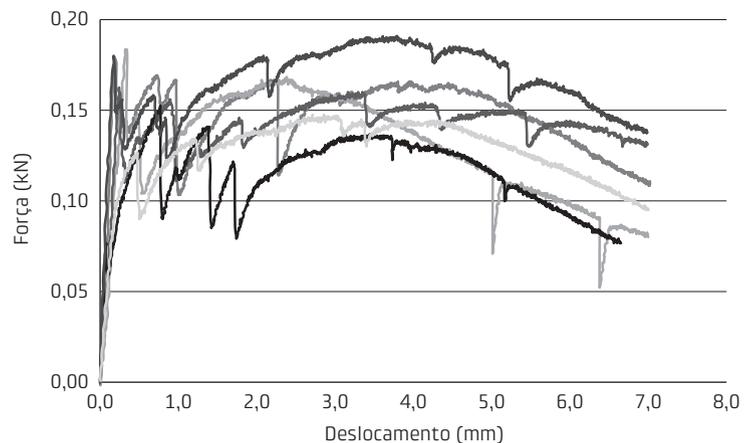
$h$  = espessura da almofada.

Conforme se pode notar, a rigidez da almofada está sendo calculada com a deformação (específica) da almofada e, portanto, em função da espessura da almofada. Nota: a deformação está recebendo o complemento “específica” para que se diferencie quando se trata da relação  $\Delta h/h$  e quando se trata daquela correspondente ao afundamento.

a) Ensaio em andamento



b) Exemplo de curvas força × deslocamento vertical no centro da amostra

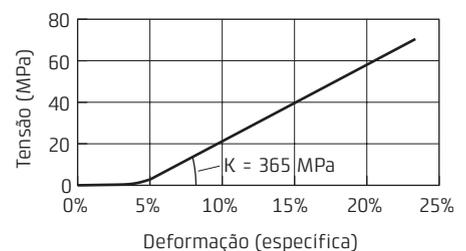
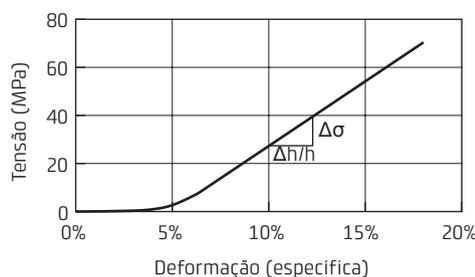


**Fig. D.5** Ensaio de flexão em faixa de placa para a determinação dos índices de tenacidade do material: a) ensaio em andamento; b) exemplo de curvas força × deslocamento vertical no centro da amostra

Fonte: El Debs e Belluccio (2012).

**Fig. D.6** Determinação da rigidez da almofada com mistura V5P3L30 e dimensões 150 mm × 150 mm × 20 mm:

a) curva típica tensão × deformação (específica);  
b) medida da rigidez



# LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS: DESENVOLVIMENTO E PESQUISAS

## anexo E

### **E.1** Considerações iniciais

O objetivo deste anexo é apresentar o desenvolvimento de ligações semirrígidas feito mediante vários trabalhos acadêmicos realizados sob a orientação do autor.

Nesses estudos buscaram-se: a) alternativas para prover rigidez e resistência a uma ligação, usualmente considerada articulação, e b) melhora do conhecimento do comportamento das ligações existentes ou propostas.

Em primeiro plano, aborda-se a ligação viga  $\times$  pilar para edifícios de múltiplos pavimentos, denominada aqui de ligação CAS (com armadura superior) que seria constituída pela armadura de continuidade, passando pelo pilar e pela laje, no caso de pilar interno com laje, ou somente pelo pilar, no caso de pilar externo ou quando não houver laje.

Outra ligação tratada neste anexo, chamada aqui de SAS (sem armadura superior), é usualmente empregada em galpões com trave inclinada, ou não, e estruturas de múltiplos pavimentos, mas sem armadura de continuidade.

Essas pesquisas estão relacionadas também com o desenvolvimento das almofadas de apoio, apresentadas no Anexo D e o emprego de concreto de alto desempenho nas ligações, como o caso de consolo com fibras de aço, apresentado na seção 3.1.

Parte dos resultados das pesquisas aqui relacionadas foi tratada no texto principal. Pretende-se aqui apresentar, de forma sintética, mais resultados e, principalmente, como essas pesquisas estão integradas e contribuíram para o desenvolvimento das ligações em questão.

Essas pesquisas resultaram em trabalhos acadêmicos do programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Uma parte considerável da pesquisa recebeu apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), com o projeto temático de pesquisa “Nucleação e Incremento da Pesquisa, Inovação e Difusão em Concreto Pré-Moldado e Estruturas Mistas para a Modernização da Construção Civil”, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

No final deste anexo está apresentada uma síntese dessas pesquisas, com a relação das teses e dissertações envolvidas.

### **E.2** Ligação CAS (com armadura superior)

A ligação desenvolvida para aplicação em edifícios de múltiplos pavimentos está mostrada na Fig. E.1. Essa ligação é derivação de ligações utilizadas em estru-

com a formulação apresentada anteriormente, com base nos resultados de Miotto (2002), o momento fletor positivo transferido é menor, recomendando uma redução na força transferida conforme a equação a seguir, com base em Eligehausen et al. (2006):

$$F_{sc,red} = F_{sd} \frac{A_{c,v}}{A_{c,v}^0} \psi_{s,v} \psi_{h,v} \quad (E.18)$$

em que:

$F_{sd}$  = conforme a Eq. E.14;

$\frac{A_{c,v}}{A_{c,v}^0}$  = parcela de redução devida ao efeito de grupo, que foi de 0,81, no caso do protótipo;

$\psi_{s,v}$  = parcela de redução devida ao efeito de borda, que foi de 0,86, no caso do protótipo;

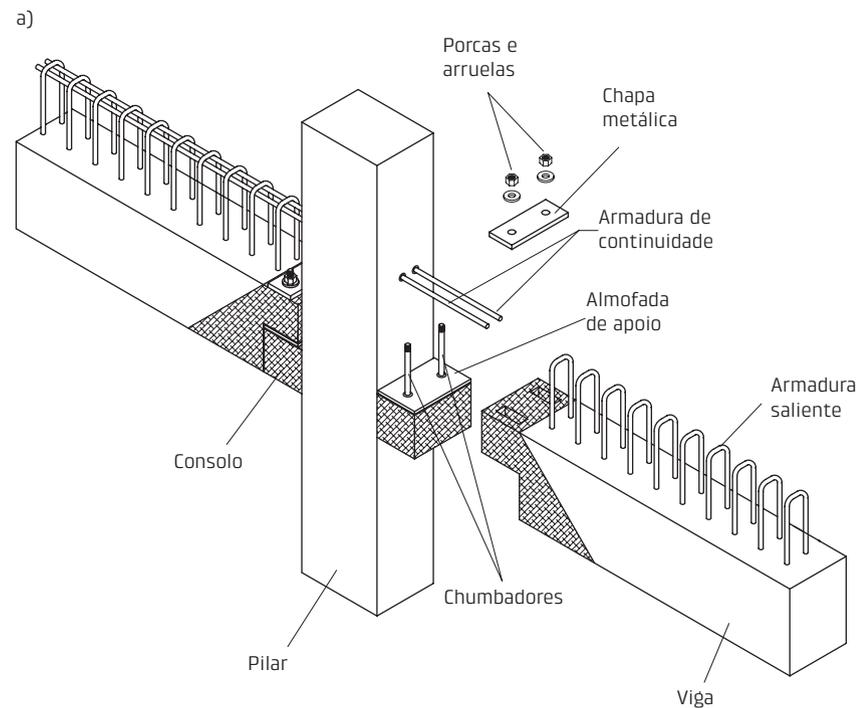
$\psi_{h,v}$  = parcela de redução devida à excentricidade da força, que foi de 0,90, no caso do protótipo.

Em função dos resultados obtidos nessa pesquisa e na falta de outros ensaios, recomenda-se fazer o projeto da ligação proposta com momento fletor positivo resistente com as reduções recomendadas em Bellucio (2016).

### E.3 Ligação SAS (sem armadura superior)

Na citada pesquisa de Miotto (2002) foi também estudada a ligação denominada aqui de SAS (sem armadura superior). O estudo focou a aplicação em pórticos com trave inclinada, comumente empregada em galpões, e englobou um programa experimental com dois modelos, bem como análise teórica e numérica. A principal contribuição da pesquisa foi a apresentação de modelo de projeto para determinação da resistência e rigidez da ligação.

A continuidade do estudo da ligação SAS foi realizada por Sawasaki (2010). Na Fig. E.22 estão mostradas algumas situações abrangidas pelo estudo, que englobou um programa experimental com quatro modelos em escala 1:2 e foi apresentado um modelo para determinação da resistência e da rigidez da ligação. Apesar de a resistência e a rigidez da ligação serem bem menores que as equivalentes na ligação CAS, os benefícios de levar em conta são significativos quando se compara os deslocamentos e momentos fletores na base dos pilares com correspondentes aos encontrados com a ligação com comportamen-

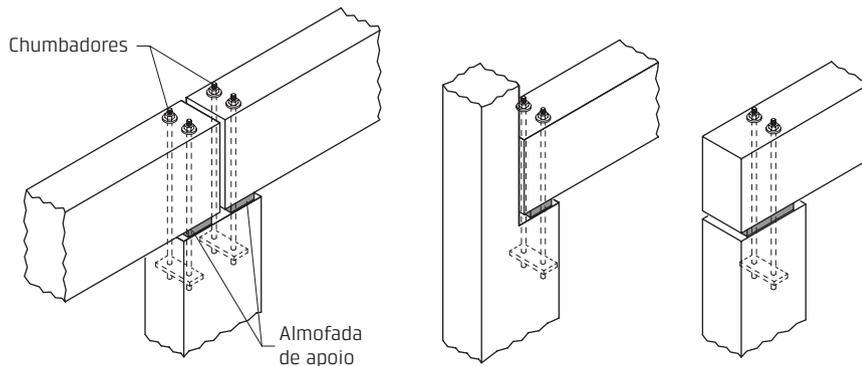


**Fig. E.21** Alternativa com componentes de concreto de alto desempenho moldados em etapas anteriores: a) esquema da alternativa com destaque das partes de concreto de alto desempenho e b) detalhes da montagem do protótipo  
Fonte: Bellucio (2016).

to articulado, conforme os resultados de simulações de estruturas representativas apresentadas na dissertação em questão.

## E.4 Quadro-síntese das pesquisas

O Quadro E.1 apresenta uma síntese das pesquisas desenvolvidas.



**Fig. E.22** Exemplos de ligações cobertas pelo estudo de Sawasaki (2010)

**Quadro E.1** SÍNTESE DAS PESQUISAS DESENVOLVIDAS

Trabalho acadêmico <sup>(a)</sup>	Período	Características principais da pesquisa
Miotto (2002)	1999-2002	Contribuição para determinação das resistências e das rigidezes de ligação CAS e SAS, mediante ensaios, modelagem numérica e proposta de modelos analíticos.
Baldissera (2006)	2004-2006	Resultados experimentais de variante de ligação CAS, com chumbadores inclinados, que possibilitam aumento da resistência e da rigidez da ligação original em relação ao momento fletor positivo.
Mota (2009)	2005-2009	Contribuições diversas, incluindo exemplos numéricos, para o projeto de ligação semirrígida tipo CAS, tais como: automatização da determinação da rigidez de ligação com base em mecanismos resistentes, efeito da não linearidade geométrica e física na estabilidade global, estabilidade na fase construtiva e efeitos dependentes do tempo.
Marin (2009)	2007-2009	Contribuição à análise da estabilidade global de estruturas de CPM com ligações semirrígidas tipo CAS, em particular para a consideração da não linearidade física, com indicações para redução de rigidez de pilares e vigas, e geométrica, incluindo avaliação de vários parâmetros de projeto.
Aguiar (2010)	2007-2010	Contribuição à previsão do comportamento de chumbadores grauteados, perpendiculares e inclinados, previstos na ligação CAS, mediante ensaios, modelagem numérica e proposta de modelo analítico. Essa pesquisa está diretamente relacionada com a resistência e rigidez da ligação CAS ao momento fletor positivo.
Sawasaki (2010)	2008-2010	Contribuição para determinação de rigidez de ligação SAS, mediante ensaios e proposta de modelo analítico, bem como do comportamento de estruturas típicas.
Soares (2011)	2009-2011	Contribuição à análise dos efeitos dependentes do tempo em vigas de CPM, protendidas ou não, com concretagem posterior formando um conjunto de seção composta com lajes alveolares, com ligação CAS, na qual, mediante exemplos de situações típicas, mostra-se como ocorrem as variações dos momentos fletores, das deformações e das tensões normais ao longo do tempo.
Lins (2013)	2011-2013	Contribuição à análise da estabilidade global de estruturas de CPM com ligação CAS, com o fornecimento de formulações e <i>softwares</i> para ajudar no projeto.
Bellucio (2016)	2010-2016	Contribuição ao desenvolvimento de ligação CAS com concreto de alto desempenho, com a recomendação de utilizar um graute de alto desempenho para aproveitar os benefícios do concreto com fibras de aço e a indicação de considerar redução do momento fletor positivo levando em conta os efeitos de grupo na resistência dos chumbadores, de borda e de excentricidade da força.

Observação: a) trabalhos acadêmicos do programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, disponíveis no site <<http://web.set.eesc.usp.br/producao/>>.

# INTRODUÇÃO AO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE CONCRETO PROTENDIDO COM PRÉ-TRAÇÃO

## anexo F

### **F.1** Considerações iniciais

Com este anexo objetiva-se apresentar as diretrizes gerais para o dimensionamento de elementos de concreto protendido, mais especificamente, concreto protendido com pré-tração, conforme apresentado na seção “Armadura protendida”, no Cap. 1 (p. 40).

Esse tipo de concreto protendido é muito empregado em elementos pré-moldados, sujeitos predominantemente à flexão, como painéis TT e alveolares, usados em lajes. O interesse do emprego de concreto protendido em elementos pré-moldados fletidos está apresentado na seção 2.4.

Aqui também se considera que o leitor já tenha os conhecimentos da resistência do concreto armado (CA). Assim, procura-se, neste anexo, concentrar-se no fornecimento das particularidades do concreto protendido (CP) em relação ao CA.

A ideia de aplicar um esforço prévio de compressão é bastante antiga. Um exemplo clássico da aplicação dessa ideia é na fabricação de barris de madeira feitos em pedaços, que depois são unidos por cintas metálicas. Essas cintas são colocadas forçando-as mecanicamente, devido à inclinação dos meridianos, para serem alongadas e produzir uma compressão, nas ligações das faixas de madeira, superior à tração produzida pela pressão do

líquido armazenado, conforme mostrado em Hanai (2005). Outros exemplos da aplicação de protensão em ferramentas e produtos podem ser encontrados nas publicações sobre o assunto.

A aplicação dessa ideia em estruturas pode ser vista em várias situações. Utilizando apenas exemplos de estruturas de concreto pré-moldado (CPM) descritos neste livro, pode ser citado o emprego da protensão na construção de pontes com aduelas pré-moldadas (seção 10.1), na estabilização de estrutura de cabos (seção 9.6) e na construção de reservatórios (seção 11.4).

A ideia de aplicar a protensão em elementos de concreto é quase tão antiga quanto o concreto armado. Segundo Naaman (1982), a primeira aplicação da protensão em concreto foi feita por P.H. Jackson, na década de 1880, nos Estados Unidos. No entanto, esses elementos não tiveram um desempenho adequado, pois após algum tempo o efeito da protensão tornava-se pouco efetivo.

Embora tenham ocorrido várias outras tentativas para tornar o emprego da protensão nos elementos de concreto efetivo, foi E. Freyssinet, nas décadas iniciais do século XX, que conseguiu explicar a importância das perdas de protensão e aplicar com sucesso a ideia, o que o levou a ser considerado o pai do CP.

Cabe destacar uma importante diferença entre o CP e o CA em relação à disposição da armadura ao longo no vão. No caso do CA, a redução da armadura, com o escalonamento das barras, pode ser realizada por razão econômica. Já para o CP, a redução do efeito da protensão é feita para atender à segurança.

Ainda no que se refere à variação do efeito da protensão ao longo do vão, merece ser destacado que a introdução da força de protensão pela armadura ativa se dá apenas por aderência. Assim, a força de protensão de cada cabo é introduzida gradualmente, em trecho chamado de comprimento de transferência, até atingir o valor máximo, conforme mostrado na Fig. F.6.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014a), quando a liberação dos cabos de sua fixação provisória for feita de forma gradual, o comprimento de transferência ( $l_{bpt}$ ) valerá:

- Para fios dentados ou lisos

$$l_{bpt} = 0,7l_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (F.1)$$

- Para cordoalhas de três ou sete fios

$$l_{bpt} = 0,5l_{bp} \frac{\sigma_{pi}}{f_{pyd}} \quad (F.2)$$

em que  $l_{bp}$  é o comprimento básico de ancoragem, também indicado na NBR 6118 (ABNT, 2014a).

Se a liberação não for gradual, essa norma indica multiplicar por 1,25 os valores do caso da liberação gradual.

## F.4 Estados-limite de serviço e determinação da força de protensão

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014a), o nível de protensão deve atender às exigências de durabilidade em função das classes de agressividade ambiental ( $CAA_m$ ), conforme o Quadro F.1. As  $CAA$  da norma citada são apresentadas no Quadro F.2.

**Quadro F.2** CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL ( $CAA_m$ )

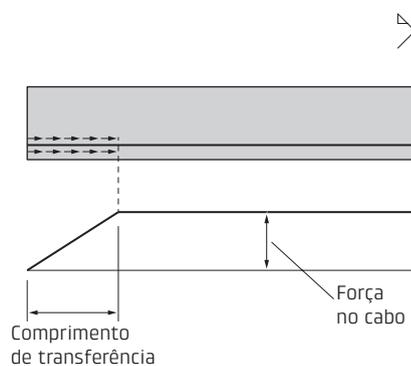
Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito do projeto	Risco de deterioração da estrutura ou do elemento
I	Fraca	Rural Submerso	Insignificante
II	Moderada	Urbano	Pequeno
III	Forte	Marinho Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Observações:

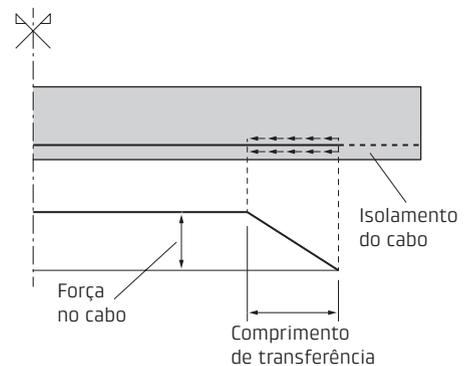
- 1) Ver outras particularidades na NBR 6118.
- 2) Ver também os cobrimentos mínimos da seção 2.6.

Fonte: adaptado de ABNT (2014a).

a) Transferência na extremidade



b) Transferência em cabo isolado por mangueira



**Fig. F.6** Transferência da força de protensão para o concreto

**Quadro F.1** EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE DO CPAI RELACIONADAS À FISSURAÇÃO E À PROTEÇÃO DA ARMADURA EM FUNÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL ( $CAA_m$ )

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações de serviço a utilizar
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	$CAA_m$ I	ELS-W, $W_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	$CAA_m$ II	ELS-F ELS-D	Combinação frequente Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	$CAA_m$ III	ELS-F ELS-D	Combinação rara Combinação frequente

Observações:

- 1) No caso de protensão limitada e completa, devem ser verificadas as duas condições.
- 2) A caracterização dos estados-limite de serviço é apresentada no Quadro F.3.
- 3) Ver outras particularidades na NBR 6118.

Fonte: adaptado de ABNT (2014a).

# LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Nesta lista estão apresentados a base da formação dos símbolos que representam as grandezas empregadas, os símbolos mais utilizados, as siglas usadas e o sistema de unidades.

## 1 Base da formação dos símbolos

### *Letras romanas maiúsculas*

A	área, ação
B	rigidez à flexão lateral (EI)
C	rigidez à torção (GJ), classe de concreto
D	deformabilidade de ligação ou de mecanismo básico
F	ação, força
E	módulo de elasticidade longitudinal
G	ação permanente, módulo de elasticidade transversal
H	força ou componente horizontal de força, resultante em direção ou plano horizontal
I	momento de inércia
K	rigidez, rigidez de ligação
M	momento fletor, módulo
N	força normal
P	força de protensão
Q	ação variável
R	reação de apoio, resultante de forças ou de tensões, rugosidade
S	momento estático
T	momento de torção, tirante, tração
V	força cortante, componente vertical de força
W	vento

### *Letras romanas minúsculas*

a	comprimento, deslocamento, dimensão, direção, distância, flecha
b	direção, largura

c	cobrimento, coeficiente
d	altura útil
e	desalinhamento, excentricidade, espaço
f	folga, resistência
g	força por unidade de comprimento devida à ação permanente
h	altura de pilar ou de edifício, altura de seção, espessura
j	abertura de junta
k	coeficiente, distância da extremidade do núcleo central ao centroide da seção
$\ell$	comprimento, vão
m	parâmetro de Basler
n	número inteiro, número de andares
q	força por unidade de comprimento devida à ação variável
p	força por unidade de comprimento
r	raio, rigidez
s	espaçamento
t	espessura, tolerância
u	perímetro
x	deslocamento, distância, direção
y	altura de bloco de compressão, direção, distância do CG à fibra mais afastada da seção transversal, posição de resultante
z	braço de alavanca, direção

### *Letras gregas minúsculas*

$\alpha$	ângulo, coeficiente, coeficiente de redução, parâmetro relacionado à estabilidade
$\beta$	ângulo, coeficiente, fator de forma

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1PPP – PRIMEIRO ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. *Anais...* São Carlos: EESC/USP, 2005. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/>>.
- 2PPP – SEGUNDO ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. *Anais...* São Carlos: EESC/USP, 2009. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/2enpppcpm/>>.
- 3PPP – TERCEIRO ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. *Anais...* São Carlos: EESC/USP, 2013. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/3enpppcpm/>>.
- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. *Manual for assessing safety hardware*. 1st ed. [S.l.], 2009. 259 p.
- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Roadside design guide*. 4th ed. Washington, 2011. Paginação irregular.
- ABCI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA. *Manual técnico de pré-fabricados de concreto*. São Paulo, 1986.
- ABCIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO. *Pré-moldados de concreto: coletânea de obras brasileiras*. São Paulo, 2008. 151 p.
- ABECE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. Seminário colapso progressivo em edifícios. In: ENCONTRO MENSAL ABECE. *Seminários...* 2012.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7482: fios de aço para concreto protendido. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 15 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7483: cordoalhas de aço para concreto protendido: requisitos. Rio de Janeiro, 2004a. 8 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14885: segurança no tráfego: barreiras de concreto. Rio de Janeiro, 2004b. 12 p. Última versão de 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15396: aduelas (galerias celulares) de concreto armado pré-fabricadas: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2006a. 12 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15421: projeto de estruturas resistentes a sismos: procedimento. Rio de Janeiro, 2006b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8890: tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2007a. 30 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15319: tubos de concreto, de seção circular, para cravação: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2007b. 36 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15486: segurança no tráfego: dispositivos de contenção viária: diretrizes. Rio de Janeiro, 2007c. 27 p. Nota: existe versão mais recente, de 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15522: laje pré-fabricada: avaliação do desempenho de vigotas e pré-lajes sob carga de trabalho. Rio de Janeiro, 2007d. 12 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8451-1: postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2011a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8451-3: postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Parte 3: ensaios mecânicos, cobrimento da armadura e inspeção geral. Rio de Janeiro, 2011b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8451-4: postes de concreto armado e protendido para

# ÍNDICE REMISSIVO

## A

- AAM** Ver almofada de argamassa modificada
- AASHTO** – American Association of State Highway and Transportation Officials 279, 352, 359, 360
- ABC** – Accelerated Bridge Construction (programa) 43, 275, 286
- ABCI** – Associação Brasileira da Construção Industrializada (extinta) 19, 21, 27, 225, 226, 230, 239, 240, 249, 270
- Abcic** – Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto 30, 47, 62
- ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland 30
- Abece** – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural 194
- abertura**  
de fissuras Ver fissura  
entre os banzos 77, 237, 238, 242, 243, 244, 250
- abóbada** 299, 307, 316, 317
- absorção**  
de água 96, 356  
de energia 360
- ABTC** – Associação Brasileira de Tubos de Concreto 343, 349
- acabamento superficial** 60, 62, 336
- ação**  
acidental 194, 196, 197, 382  
anormal 194, 195, 196  
carregamento cíclico 389, 391, 392, 396  
cíclica 177  
de balanço 197  
de curta duração 98, 382  
de diafragma 83, 200, 215, 216, 240, 245, 254, 338  
de longa duração 98, 141, 383  
de membrana 197  
de sismo, sísmica 83, 108, 194, 200, 215, 216  
dinâmica 63, 97, 98, 101, 197, 331, 359, 361  
do vento 101, 156, 231  
excepcional 195  
lateral (= horizontal) 38, 39, 86, 87, 102, 204, 208, 213, 215, 216, 245, 248, 249, 251, 252, 255, 365, 366, 382, 394, 403  
mecânica 95  
permanente 81, 89, 98, 112, 197, 369, 380  
repetição de ações 118  
repetitiva 177
- aceleração do endurecimento 55
- ACI 318** 120, 126, 128, 131, 183, 339, 379, 380
- ACI 543R-12** 354
- ACI** – American Concrete Institute 120, 126, 128, 131, 183, 219, 231, 339, 354, 379, 380
- acidente 101, 194, 195, 197, 208
- aço**  
CA-50 120, 369, 372, 397, 409  
de alta resistência 87, 408  
de relaxação baixa (RB) 408, 410  
de relaxação normal (RN) 408, 410  
escoamento do 115, 116, 120, 138, 168, 403  
inoxidável 32, 37  
perfil de 32, 111
- ações**  
combinação de Ver combinação de ações
- acomodação da ancoragem** Ver ancoragem, acomodação da
- ACPA** – American Concrete Pipe Association 343, 347
- adaptações de componentes** 75
- adensamento**  
com vibradores de agulha 55  
com vibradores de fôrma 55  
por centrifugação 55, 56  
por prensagem 55, 344  
por vibração 55, 63, 344, 353, 355  
vibrolaminação 55
- aderência** 52, 54, 57, 97, 100, 108, 111, 135, 176, 177, 179, 238, 337, 338, 408, 412, 417
- aderência entre o concreto e a fôrma** 57
- adesão** 111, 118, 159, 176, 177, 187, 189
- aditivos** 37, 56, 386
- aduelas** 68, 150, 264, 276, 278, 288, 289, 290, 293, 294, 297, 318, 319, 343, 350, 407
- Aeroporto Internacional de Brasília** 249, 250
- aeroporto Madrid-Barajas** 28
- Aeroporto Metropolitano de Detroit** 318
- aglomerado cimentício** 32, 33, 35
- agregado**  
exposto 30, 308  
graúdo 180

Após 17 anos, *Concreto pré-moldado* recebe uma nova edição, revigorada e ampliada. Traz, oportunamente, a última atualização da principal norma brasileira sobre o assunto, a NBR 9062 – *Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*. Além da atualização técnica, no decorrer do período ganharam importância novas questões, como as relacionadas à sustentabilidade, que também foram incorporadas a esta segunda edição.

Se, por um lado, a industrialização da construção e a racionalização da execução de estruturas de concreto tiveram grande impulso nos anos 1960 e 1970, por outro conduziram a uma criticada mesmice arquitetônica. Em razão disso, surge, avançando, um novo concreto pré-moldado, que permite maior flexibilidade e renovação arquitetônica.

As potencialidades do concreto pré-moldado são pouco exploradas no Brasil, apesar do intenso processo de urbanização da população e adensamento das cidades. Esta obra procura motivar os leitores para sua aplicação, rompendo um círculo vicioso: não se constrói porque não se têm insumos tecnológicos (conhecimentos, experiência, equipamentos e dispositivos auxiliares) e não se têm os insumos tecnológicos porque não se constrói.

Com mais de 400 páginas, *Concreto pré-moldado* está dividido em três partes e 17 capítulos, compreendendo desde os fundamentos do concreto pré-moldado e as aplicações em edifícios, pontes e outras construções civis até os elementos de produção especializada. No final são apresentados os anexos, que, entre outros assuntos, incluem exemplos numéricos.

Este livro é direcionado a alunos e profissionais de Engenharia Civil e Arquitetura, com ênfase no projeto das estruturas formadas por elementos pré-moldados.



ISBN 978-85-7975-279-7



9 788579 752797

Patrocínio:

