Capítulo 3

O PROJETO ESTRUTURAL

Podemos definir o projeto estrutural de uma edificação como o processo de conceber, distribuir, interligar, analisar, dimensionar e proporcionar os elementos de um sistema estrutural destinado a suportar com segurança (resistência e estabilidade) um determinado conjunto de cargas sem exceder limites dos materiais empregados. Ele é constituído, de uma maneira geral, das seguintes etapas:

- Concepção Estrutural;
- Análise Estrutural;
- Síntese Estrutural;
- Dimensionamento e Detalhamento;
- Desenho.

3.1. Princípios Gerais do Projeto Estrutural

Pode-se estabelecer alguns princípios gerais que norteiam o projeto estrutural. Afirmações que são referências para a metodologia de projeto.

i. A edificação compõe-se de partes resistentes e não resistentes. Ao conjunto das partes resistentes dá-se o nome de estrutura.
ii. A estrutura garante a segurança contra os estados limites. Estes podem ser: estado limite de ruína (ruptura do concreto, deformação plástica excessiva do aço ou instabilidade global da estrutura) ou estado limite de utilização (fissuração, deformação ou vibração excessivas).
iii. É imprescindível o conhecimento do comportamento das peças estruturais para que seja feita o projeto estrutural;
iv. A cada tipo de peça estrutural correspondem métodos de cálculo, métodos construtivos, implicações econômicas, funcionais e estéticas que devem ser levadas em consideração.

3.2. Concepção Estrutural

O ponto de partida do projeto estrutural de uma construção consiste na idealização de um arranjo estrutural (arranjo adequado dos vários elementos), com o qual se pretende que todas as partes da construção possam ter a sua resistência assegurada e esta atenda às suas finalidades.

Estabelecer um arranjo estrutural adequado consiste em obedecer simultaneamente, sempre que possível, aos aspectos de segurança, economia (custo e durabilidade) e os definidos pelo projeto arquitetônico (estética e funcionalidade).

Para a idealização desse arranjo estrutural é necessário conhecer o comportamento de cada uma das partes da estrutura a ser projetada.

Esta fase de concepção estrutural também pode ser dividida em duas etapas: **Análise Inicial do Projeto Arquitetônico**, e **Ante-Projeto Estrutural**.

A etapa da análise do projeto arquitetônico é importante para se entender o que se deseja obter da construção. A concepção geral de um edifício no espaço é determinada através do projeto arquitetônico. Nesta análise também deve-se efetuar uma verificação das distâncias cotadas nas plantas, cortes e vistas, evitando assim a propagação de possíveis erros existentes, o que comprometeria o projeto do edifício.

O Ante-Projeto Estrutural é a concepção estrutural propriamente dita, onde modula-se a arquitetura idealizada e define-se a forma da estrutura.

3.1.1. Diretrizes Gerais da Concepção Estrutural

A concepção estrutural deve obedecer às seguintes diretrizes gerais:

1) atender às condições estéticas definidas no projeto arquitetônico.

- vigas e pilares embutidos na alvenaria;
- evitar pilares e vigas em meio de vãos abertos, ou usá-los de forma racional;
- evitar excesso de vigas aparentes.

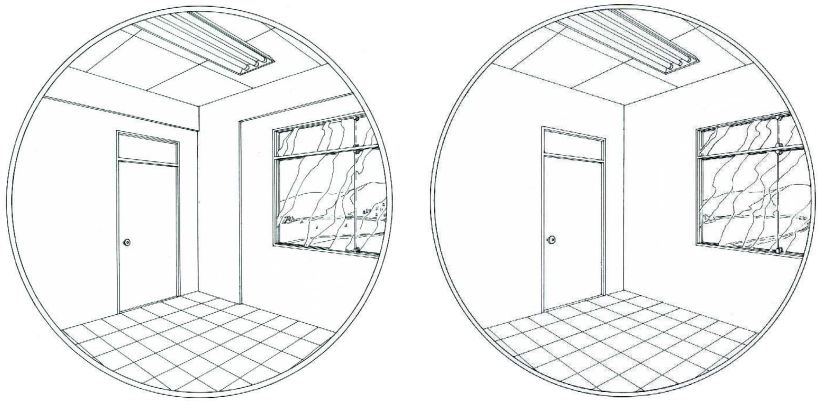


Fig.01. Viga e pilar embutidos na alvenaria

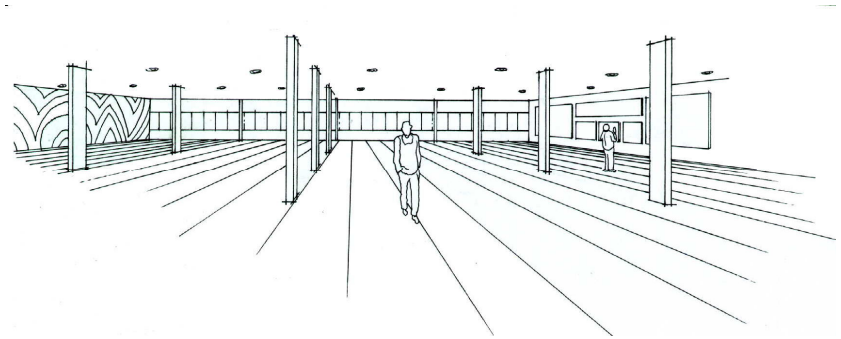


Fig.02. Evitar excesso de pilares em vãos abertos

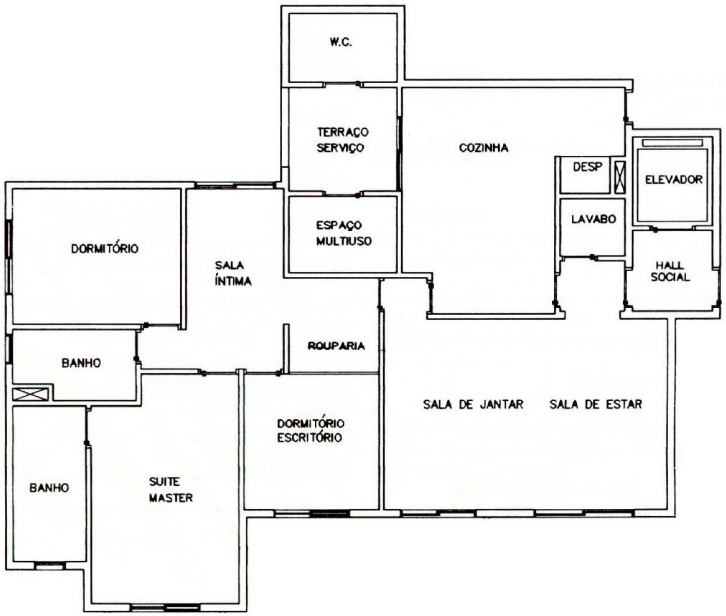


Fig.03. Projeto com muitos recortes e paredes não alinhadas implicam em vigas aparentes

2) compatibilizar o projeto de estruturas com os projetos complementares (hidráulica, elétrica, sanitário, pluvial, incêndio, gás, ar-refrigerado, ar-comprimido, etc.)

Exemplos:

- evitar as utilidades (dutos e tubulações) vazarem vigas (principalmente os dutos de ar-condicionado por serem maiores);
- reforçar os elementos estruturais em casos de grandes orifícios para a passagem de tubulações;
- em caso de lajes nervuradas, as locações das tubulações não devem coincidir com as nervuras;
- o pé-esquerdo do pavimento deve contemplar a altura da viga + altura dos dutos e utilidades + altura do forro falso;

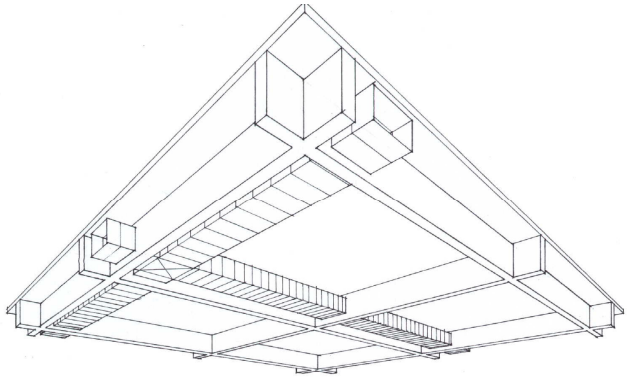


Fig.04. Evitar tubulações vazando vigas

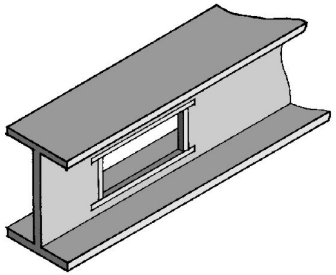


Fig.05. Fazer reforços em vigas quando há orifícios

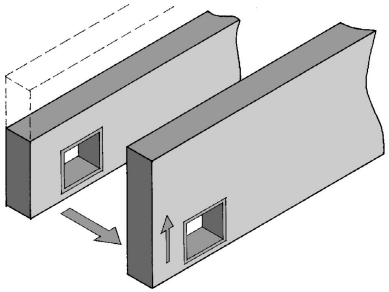


Fig.06. Em vigas de concreto armado evitar grandes orifícios e locá-los na porção inferior

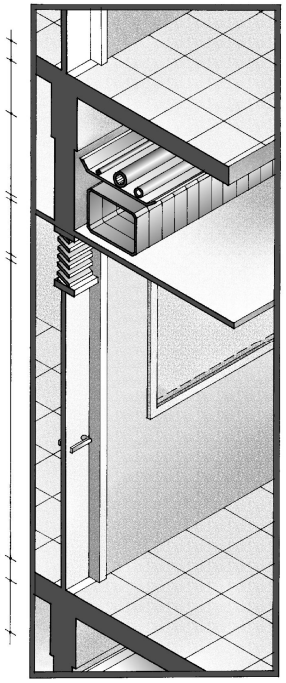


Fig.07. Altura do pé-esquerdo

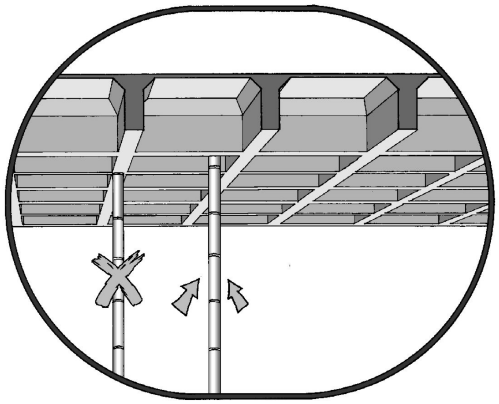


Fig.08. Tubulações em lajes nervuradas

3) o posicionamento dos elementos estruturais deve ser feito com base no comportamento primário dos mesmos.

laje ⇨ viga ⇨ pilar ⇨ fundação;

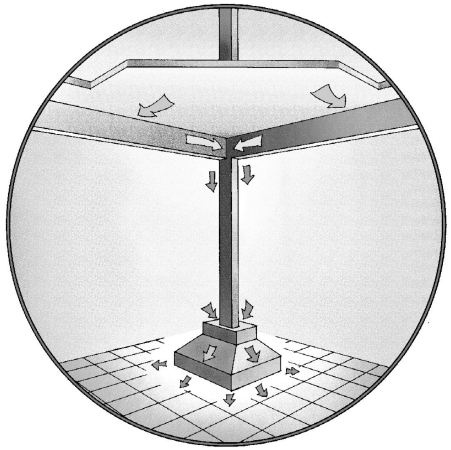


Fig.09. Posicionamento fundamental dos elementos estruturais

4) a transferência de cargas deve ser a mais direta possível. Quanto mais direta for esta transmissão de cargas, menor a dimensão das peças estruturais, mais simples e barata a estrutura. Desta forma:

- evitar viga importante apoiando em outras vigas (apoios indiretos);
- evitar vigas de transição (viga que suporta pilar).

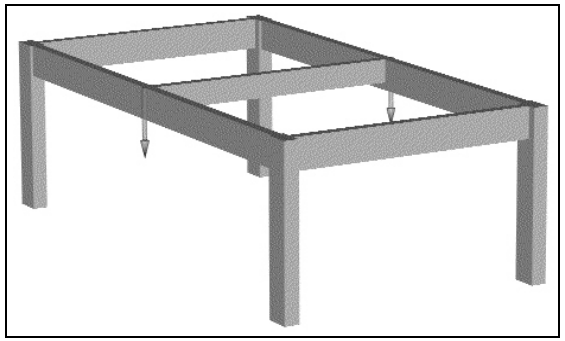


Fig. 10. Evitar apoio indireto

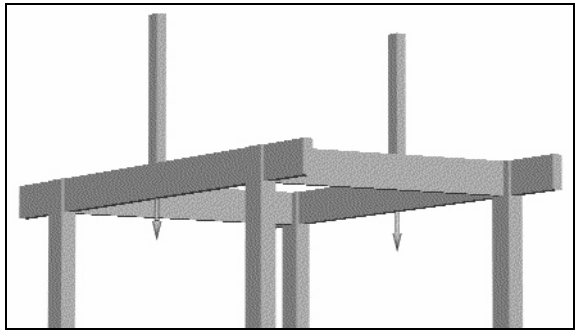


Fig. 11. Evitar viga de transição

5) os elementos estruturais devem ser os mais uniformes possíveis quanto à geometria e quanto às solicitações. Modular a estrutura e as seções das peças estruturais resulta em maior estética e economia.

Exemplos:

- vigas com vãos comparáveis entre si;
- elementos estruturais devem ser figuras geométricas regulares e o mais simples possível;

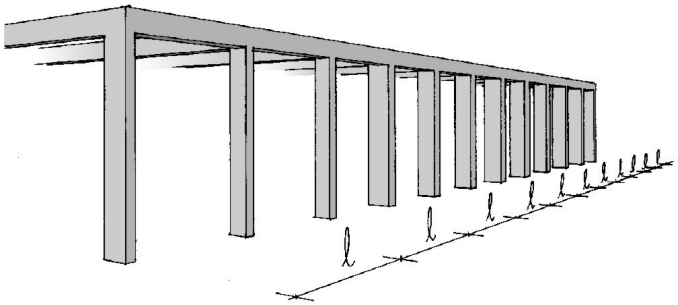


Fig. 12. Posicionamento dos elementos estruturais

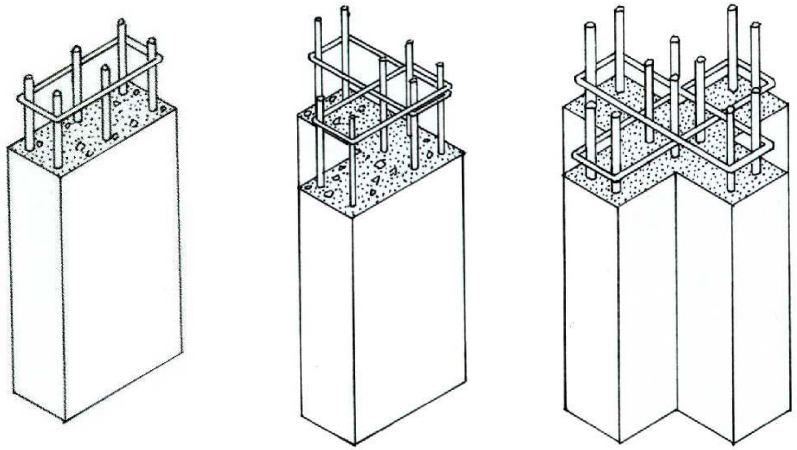


Fig. 13. Elementos estruturais regulares e simples
(em ordem crescente de dificuldade de execução e custo)

6) as dimensões contínuas da estrutura em planta devem ser limitadas a 30 m. Caso se tenha comprimentos maiores, prever juntas de dilatação. Tudo isto é para minimizar os efeitos da variação de temperatura e da retração sobre a estrutura.

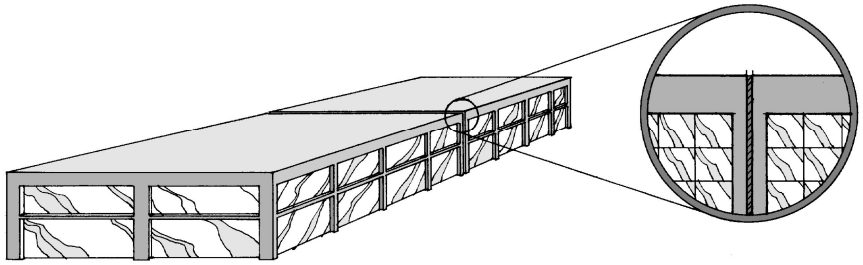


Fig. 14. Junta de dilatação

As juntas podem ainda ser de três tipos básicos:

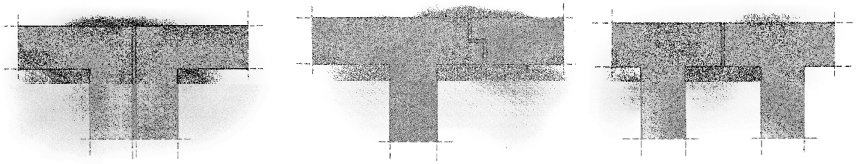


Fig. 15. Tipos de juntas de dilatação

7) em função do efeito do vento e, conseqüentemente, das solicitações no plano vertical, devem existir "pórticos planos" ortogonais entre si que apresentem resistência e rigidez adequadas. São medidas recomendáveis:

(a) orientar criteriosamente os pilares em relação a sua maior direção;

(b) estabelecer um certo alinhamento entre eles;

(c) prever outras estruturas de contraventamento, como poço de elevador e caixa de escadas maciças.

8) verificar se a locação dos pilares não interfere no trânsito e no estacionamento dos automóveis na garagem. Quanto melhor a localização dos pilares, maior o nº de vagas e melhor o aproveitamento do terreno.

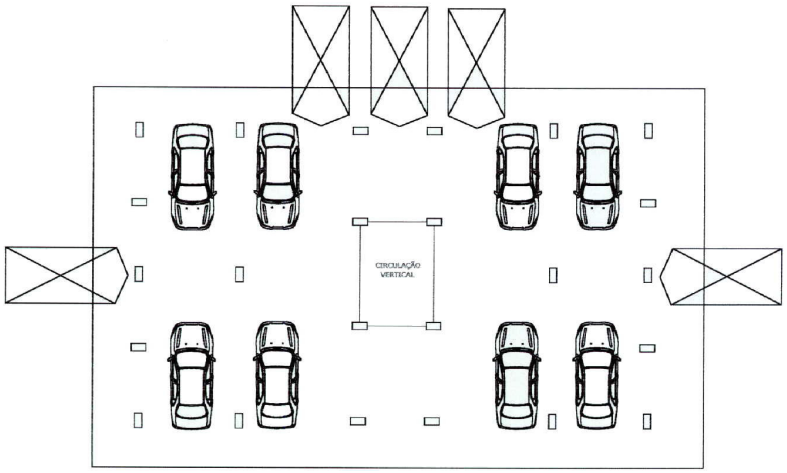


Fig. 16. Garagem mal dimensionada

9) evitar pilares em limites do terreno para que não seja necessário lançar mão de fundações excêntricas. Pode-se ter problemas de escavação com as áreas vizinhas, além de um maior custo e dificuldade de execução.

10) balanços na estrutura pressupõe a existência de uma estrutura adequada, geralmente mais robusta que a usual, que os suporte. Os trechos em balanços devem resistir aos esforços e minimizar as deformações. De modo geral, deve-se ser cuidadoso em:

- balanços de dimensões relativamente grandes;
- janelas em cantos de parede;

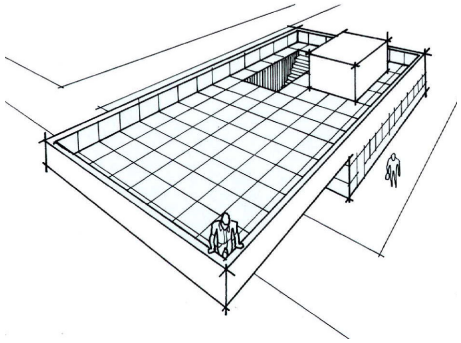


Fig. 17. Balanços significativos

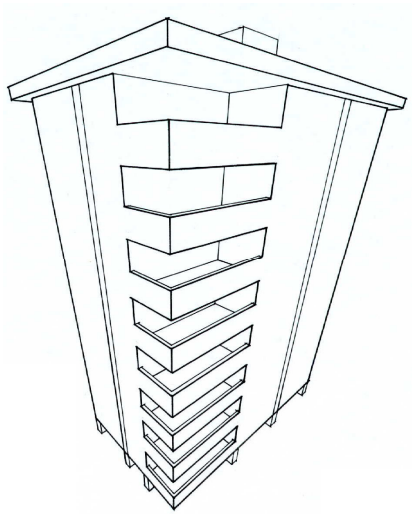


Fig. 18. Janelas em cantos de parede

11) prever dimensões maiores para os pilares com pé-direito duplo, triplo ou maiores.

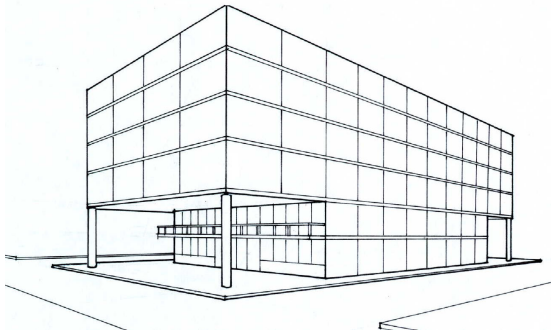


Fig.19. Pilares de maior altura

3.3. Análise Estrutural

De um modo geral, as estruturas das construções são excessivamente complexas para possibilitarem um tratamento numérico global. O projeto estrutural é impraticável sem a introdução de simplificações.

Atualmente, com o desenvolvimento cada vez mais significativo dos recurso computacionais e a implementação de métodos numéricos mais poderosos, tem-se conseguido analisar a estrutura cada vez mais próxima da realidade. Pórticos espaciais e a geração de malhas por elementos finitos já é uma prática de projeto.

Contudo, a introdução de simplificações ainda é um fato a perdurar por um bom tempo. Essas simplificações são de diversas naturezas e de caráter mais ou menos arbitrário, mas, com elas, o problema real, usualmente de complexidade extrema, pode ser reduzido a um conjunto de subproblemas passíveis de solução adequada.

A primeira delas já está contida na própria definição de estrutura, a distinção entre partes resistentes e partes não-resistentes da construção. Isto é feito arbitrariamente. Uma alvenaria de um edifício, por exemplo, contribui para a resistência e para a estabilidade de uma construção?

O grau de dificuldade do projeto é proporcional ao aumento do tamanho da construção. Assim, para que o problema seja simplificado, e o tratamento numérico dispensado seja exeqüível, é preciso decompor a construção em partes, que possam se consideradas isoladamente. Essa decomposição pode ser real ou virtual.

A decomposição real é obtida por meio de juntas de separação. Essas juntas, além de simplificarem o problema - subdividindo a construção original em um conjunto de construções contíguas -, ajudam a diminuir a intensidade dos esforços decorrentes das deformações impostas à estrutura. Particularmente, atenuam os efeitos das variações de temperatura (daí o nome junta de dilatação).

Quando a construção, embora monolítica, pode ser admitida como subdividida em partes suficientemente simples para que cada uma delas possa ser tratada separadamente, e associada a um dos modelos estruturais estudados na Teoria das Estruturas (pórtico, grelha, viga, casca, placa, etc.), tem-se uma decomposição virtual.

A decomposição virtual que maior interesse apresenta é aquela na qual as diversas partes resultantes se apóiam uma

sobre as outras, estando apenas uma delas apoiada no meio externo.

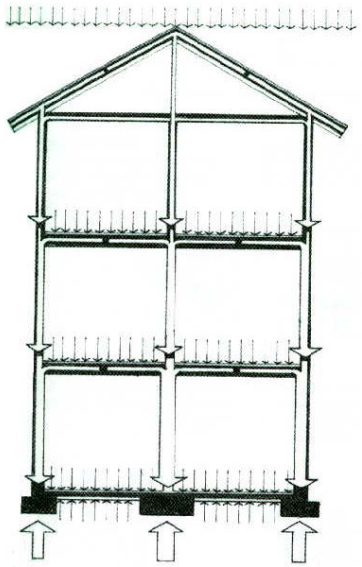


Figura 20. Encaminhamento dos esforços

Em geral, a estrutura global é subdividida em famílias de elementos planos.

Essa simplificação de tratamento da estrutura é denominado de *análise estrutural*.

Deve-se ressaltar que o projetista de estruturas terá, sempre, limitações quanto às simplificações a serem adotadas, pois ele não poderá ignorar o comportamento real da estrutura como um todo.

A análise estrutural será tanto mais eficaz quanto mais os resultados do tratamento numérico simplificado aproximarem-se dos valores reais esperados.

A adequacidade dos elementos estruturais adotados na etapa de análise da estrutura deve ser comprovada ao se realizar a síntese estrutural, etapa indispensável do projeto, mesma que seja feita de forma simplificada.

De forma geral, temos os seguintes modelos simplificados que podem ser adotados na fase de Análise Estrutural:

1) lajes + vigas contínuas + pilares + fundações
2) lajes + grelha de vigas + pilares + fundações
3) lajes (representadas por grelhas ou malha de elementos finitos) + grelha de vigas + pilares + fundações
4) lajes (grelhas ou malhas de E.F.s) + pórtico espacial + fundações
5) lajes (grelhas ou malhas de E.F.s) + pórtico espacial + fundações (considerando interação solo-estrutura)

Os modelos acima citados estão ordenados em escala crescente de dificuldade, mas também de precisão dos resultados e de confiabilidade.

Em relação ao comportamento do material constituinte da estrutura, tem-se alguns tipos de análises. Os principais são:

a) análise linear;
b) análise linear com redistribuição;
c) análise limite
d) análise não linear

Cada uma destas análises também possui seu nível de comnplexidade (e de acuidade). Todas elas podem ser combinadas com os modelos simplificados da estrutura. A decisão de qual modelo e qual tipo de análise física adotar é critério e responsabilidade do engenheiro estrutural.

3.4. Síntese Estrutural

A validade das hipóteses da decomposição da estrutura em partes, e a posterior superposição dos efeitos, é feita na etapa da síntese estrutural.

Nesta etapa, é feita a verificação da necessidade de se estabelecer outros modelos estruturais para o mesmo elemento estrutural. O dimensionamento correto deve levar em conta a envoltória dos esforços solicitantes obtidos nos vários comportamentos considerados.

Exemplos:

- painel de lajes com alternâncias de cargas (permanente ou permanente + acidental);
- carga permanentes e acidentais + ventos em direções diferentes;
- efeito da marquise na viga de apoio (fletor + cortante + torsor);
- combinações diversas de cargas nas lajes / vigas / pilares

3.5. Dimensionamento e Detalhamento da Estrutura

O dimensionamento estrutural deve ser feito pelos métodos estabelecidos em norma e literatura. Seu objetivo é definir as dimensões adequadas das peças estruturais, suas armaduras e as ligações das diversas peças, de tal forma que todas as seções estão garantidas em relação à segurança.

O detalhamento é a definição precisa das ligações e da posição e forma das armaduras. É uma etapa de suma importância pois este detalhamento deve refletir todas as hipóteses adotadas na análise e no dimensionamento. As peças são detalhadas de tal forma a resistirem de maneira e posição coerente com os esforços solicitante a elas relacionados.

3.6. Desenho da Estrutura

A representação gráfica da estrutura é feita por meio de desenhos. O que irá para uma obra a fim de ser executado não é um conjunto de memórias de cálculos ou demonstrações teóricas.

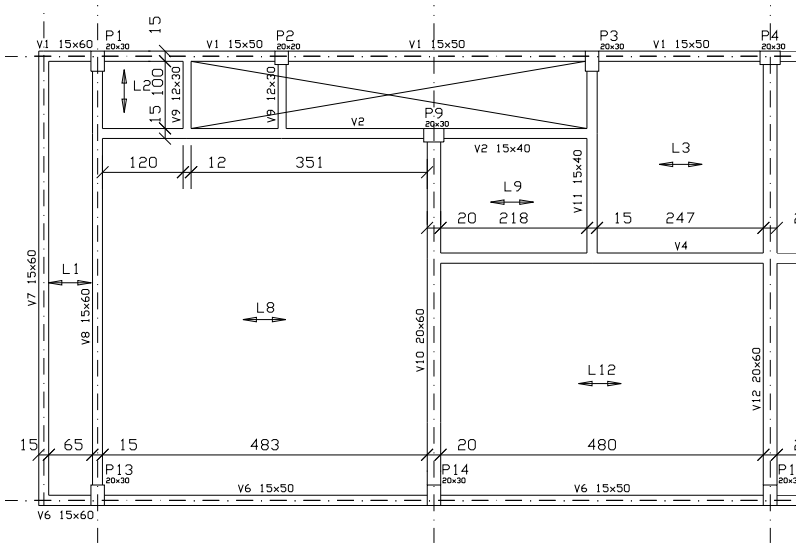
No caso das estruturas <u>de</u> <u>concreto</u>, têm-se dois tipos principais de desenho: desenho de formas e desenhos de armação.

a) Desenhos de formas

- forma da fundação;
- forma de cada pavto. tipo;
- forma da cobertura;
- outros.

Estes desenhos definem as características geométricas da estrutura. Constam destes desenhos:

- locação da estrutura (através dos eixos principais e secundários de referência);
- definição dos elementos estruturais e suas dimensões (comprimentos em planta, espessuras das lajes, dimensões das seções transversais das vigas e dos pilares, etc.);
- cortes característicos (que informam a posição relativa das lajes e vigas e outros detalhes).



b) Desenho de armação

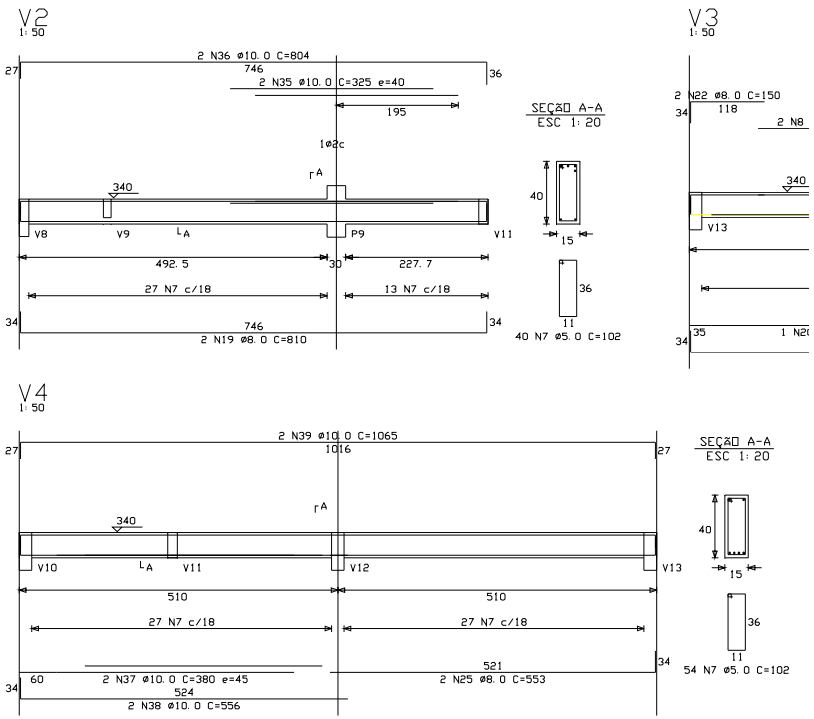
- fundação;
- lajes;
- vigas;
- pilares;
- escadas;
- reservatório;
- outros.

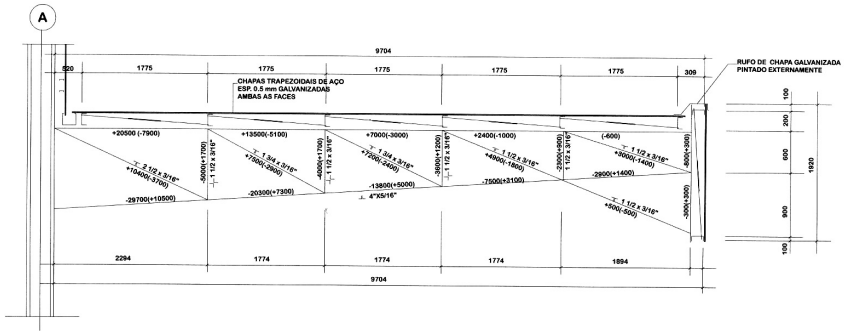
Definem as armaduras a serem colocadas nos elementos estruturais de concreto armado. Devem constar dos desenhos:

- identificação individual das barras;
- definição da bitola e do comprimento;
- definição do posicionamento das barras.

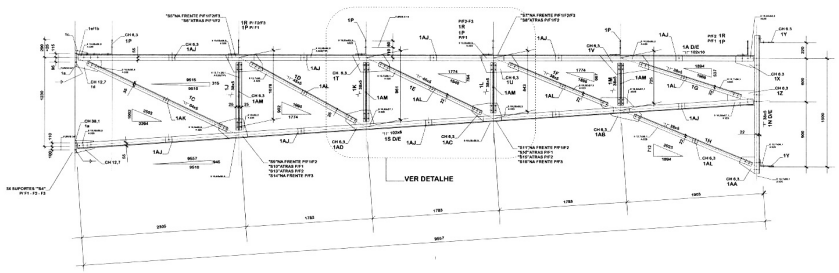
Exemplo: N8 - 2ϕ12.5 - 252.

Significa que o ferro cujo identificação é o número 8 possui a bitola igual a 12.5 mm e o seu comprimento é 252 cm. Se o ferro é reto, dobrado, possui gancho, etc., deve-se verificar no seu desenho.



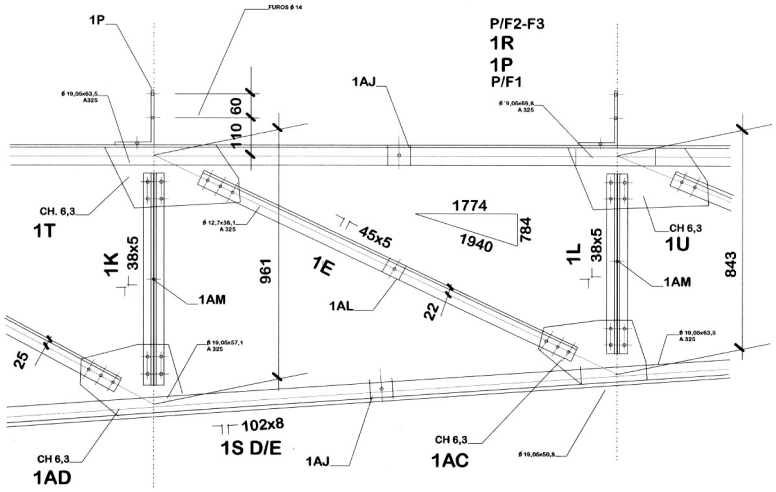


Projeto de Engenharia ou Básico

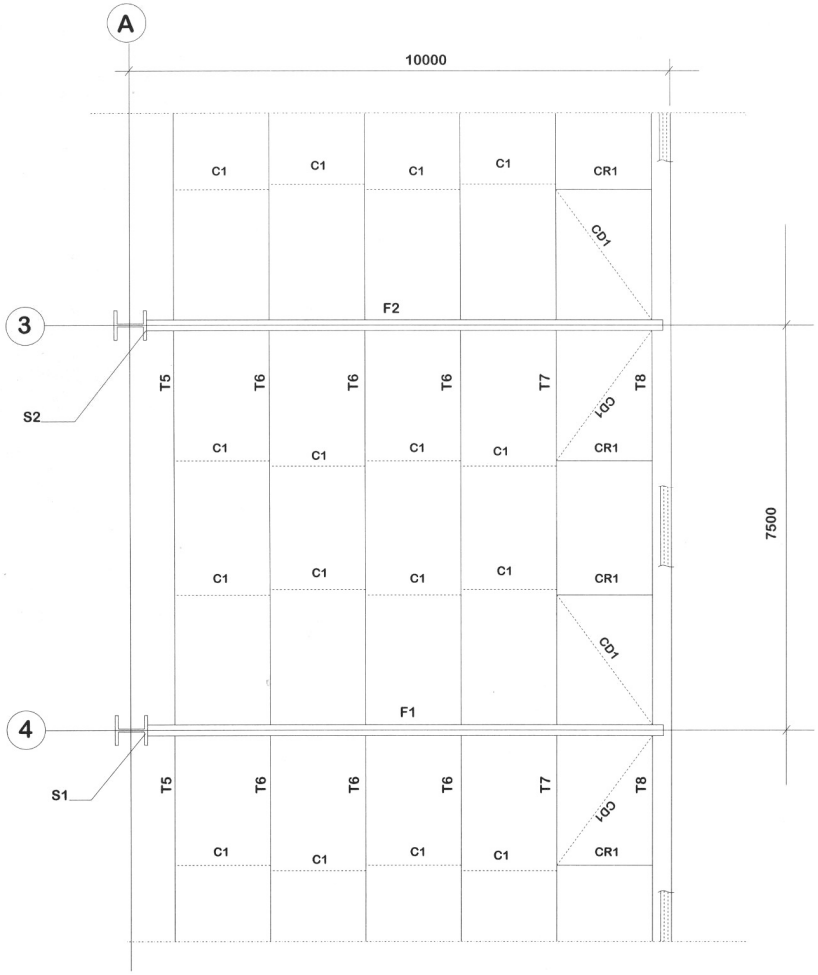


Projeto de Fabricação

No caso das estruturas metálicas, têm-se três tipos principais de desenho: i) o desenho do projeto de engenharia, ou básico; ii) o desenho do projeto de fabricação; e iii) o desenho do projeto de montagem.



Projeto de Fabricação - Detalhe



Projeto de Montagem