

**UNICAMP**

## **UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo –  
FEC - UNICAMP.

Departamento de Estruturas – DES.

“Sistemas estruturais de edificações e exemplos”

Bolsistas:

Marta Francisca Suassuna Mendes de Souza

RA: 063060;

Rafael Bezerra Rodrigues;

RA: 063777.

Orientador: Dr. Nilson Tadeu Mascia

**Campinas (SP), Julho de 2008**

|   |    |
|---|----|
| <b>1 – Introdução</b>                                 | 5  |
| <b>2 – Ações</b>                                      | 5  |
| 2.1 - Combinações de ações                            | 6  |
| 2.2 - Classes de carregamento                         | 6  |
| 2.3 - Classificação dos carregamentos                 | 6  |
| 2.3.1 - Carregamento normal                           | 6  |
| 2.3.2 - Carregamento especial                         | 7  |
| 2.3.3 - Carregamento excepcional                      | 7  |
| 2.3.4 - Carregamento de construção                    | 7  |
| 2.4 - Situações de projeto                            | 7  |
| 2.4.1 - Situações duradouras                          | 7  |
| 2.4.2 - Situações transitórias                        | 8  |
| 2.4.3 - Situações excepcionais                        | 8  |
| <b>3 - Materiais estruturais</b>                      | 8  |
| 3.1 – Aço   | 9  |
| 3.1.1 - Propriedades Mecânicas dos Aços Estruturais   | 9  |
| 3.1.2 – Aços Patináveis                               | 12 |
| 3.1.3 - Vantagens e desvantagens dos aços estruturais | 13 |
| 3.2 – Madeira   | 14 |
| 3.2.1 - Madeiras estruturais                          | 15 |
| 3.2.2 - Anisotropia da madeira                        | 17 |
| 3.2.3 - Características Higroscópicas da madeira      | 17 |
| 3.2.4 - Propriedades físicas da madeira               | 17 |
| 3.2.4.1 – Umidade                                     | 17 |
| 3.2.4.2 - Massa Específica                            | 17 |
| 3.2.4.3 – Retrabilidade                               | 18 |
| 3.2.4.4 - Módulo de elasticidade                      | 18 |
| 3.3 – Concreto  | 18 |
| <b>4 - Elementos estruturais</b>                      | 19 |
| <b>5 – Sistemas estruturais</b>                       | 20 |
| 5.1 -Estruturas Lineares                              | 20 |
| 5.1.1-Vigas   | 20 |
| 5.1.1.1 - Principais tipos de vigas                   | 23 |
| 5.1.1.2 - Comportamento estrutural                    | 24 |

|  |    |
|--|----|
| 5.1.1.3 - Seções transversais usualmente empregadas                              | 27 |
| 5.1.2 – Treliças   | 29 |
| 5.1.2.1 - Treliças Planas  | 30 |
| 5.1.2.1.1 - Tipos usuais de treliças de cobertura                                | 31 |
| 5.1.2.2 - Treliças Espaciais   | 34 |
| 5.1.2.2.1 - Definição e funções das treliças espaciais                           | 34 |
| 5.1.2.2.2 - Aspectos gerais  | 35 |
| 5.1.2.2.3 – Aplicações   | 41 |
| 5.1.2.3 - Considerações de cálculo   | 42 |
| 5.1.3 – Grelhas  | 43 |
| 5.1.3.1 - Comportamento estrutural   | 45 |
| 5.1.4 – Pilares  | 47 |
| 5.1.4.1 - Comportamento estrutural de pilares                                    | 48 |
| 5.1.5 – Pórticos   | 51 |
| 5.1.5.1 – Pórticos simples de alma cheia   | 52 |
| 5.1.5.2 - Pórtico com cobertura em arco  | 53 |
| 5.1.5.3 - Pórtico com tirantes   | 53 |
| 5.1.5.4 - Consideração da rigidez das ligações na análise estrutural de pórticos | 54 |
| 5.1.5.5 - Relevância econômica   | 54 |
| 5.1.6 - Arcos  | 54 |
| 5.1.6.1 - Classificação dos arcos  | 55 |
| 5.1.6.2 - Vantagens e desvantagens dos arcos                                     | 57 |
| 5.1.6.3 - Seções transversais mais comuns  | 59 |
| 5.1.6.4 - Estabilidade dos arcos   | 59 |
| 5.1.7 - Estruturas pênseis   | 60 |
| 5.1.7.1 – Aplicações   | 60 |
| 5.2 - Elementos estruturais de superfície  | 62 |
| 5.2.1 – Laje   | 62 |
| 5.2.1.1 – Tipos de lajes   | 64 |
| 5.2.1.2 – Carregamentos  | 66 |
| 5.2.1.3 - Considerações projetivas importantes                                   | 67 |
| 5.2.1.4 - Vantagens e desvantagens da laje cogumelo                              | 67 |
| 5.2.2 - Flexão nas placas: analogia com a flexão de vigas                        | 68 |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.2.3 – Tabuleiro  | 69        |
| 5.2.3.1 – Carregamentos  | 70        |
| 5.2.4 – Cascas   | 70        |
| 5.2.4.1 - Influência da curvatura no comportamento estrutural da casca | 72        |
| 5.2.4.2 - Expressividade arquitetônica                                 | 72        |
| 5.3 - Elementos estruturais em blocos                                  | 73        |
| <b>6 – Fundações</b>   | <b>73</b> |
| 6.1 - Fundações Superficiais   | 73        |
| 6.2 - Fundações Profundas  | 74        |
| <b>7 - Acompanhamento da construção do novo prédio da FEC</b>          | <b>80</b> |
| 7.1 - Fundação utilizada no prédio da FEC: Estaca Strauss              | 80        |
| 7.2 – Sistemas estruturais em alvenaria                                | 82        |
| 7.2.1 – Paredes de alvenaria estrutural                                | 84        |
| 7.2.2 - Utilização de elementos de reforço                             | 84        |
| 7.2.2.1 – Vergas   | 85        |
| 7.2.2.2 – Cinta  | 86        |
| 7.2.2.3 – Coxins   | 86        |
| 7.2.3 - Elementos de alvenaria (blocos)                                | 87        |
| 7.2.4 – Blocos de concreto   | 87        |
| <b>8 – Conclusão</b>   | <b>91</b> |
| <b>9 – Referências Bibliográficas</b>                                  | <b>92</b> |

## **1- Introdução**

As estruturas se caracterizam por serem as partes mais resistentes de uma construção. São elas que absorvem e transmitem os esforços, sendo essenciais para a manutenção da segurança e da solidez de uma edificação. Uma estrutura é formada por elementos estruturais, que combinados dão origem aos sistemas estruturais. A finalidade de uma estrutura é receber e transmitir os efeitos das ações sofridas para o solo. Dessa forma, as estruturas devem ser construídas com materiais que não são perfeitamente rígidos, chamados materiais estruturais.

A execução de uma construção, seja ela de grande ou pequeno porte, implica obrigatoriamente na construção de uma estrutura suporte, que necessita de uma projeto, planejamento e execução própria. Desta forma, a estrutura em uma construção tem como finalidade assegurar a forma espacial idealizada garantindo integridade à edificação por tanto tempo quanto o necessário.

Durante o período de atividades do presente projeto, foi possível estudar a fundo vários importantes sistemas estruturais, sistemas esses que foram encontrados nas estruturas analisadas. São eles: treliças planas, vigas treliçadas, treliças espaciais, blocos de alvenaria estrutural, vigas, pilares, lajes, grelhas e cascas cilíndricas. Além dos sistemas estruturais, foi possível também estudar importantes materiais, dentre eles: o aço estrutural (em especial, os aços patináveis), a madeira e o concreto armado (material do qual são feitos os blocos de alvenaria estrutural, lajes e vigas).

## **2 - Ações**

Ações são as causas que provocam o aparecimento de esforços ou deformações nas estruturas. Quando há aplicação de forças, diz-se que estas forças são ações diretas e quando há deformações impostas a uma estrutura e estas originam esforços na estrutura diz-se que estas deformações geram ações indiretas. Em relação ao tempo, as ações podem ser dos seguintes tipos:

- ações permanentes: são aquelas que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de um valor médio, durante toda a vida da construção, como por exemplo o peso próprio da estrutura;
- ações variáveis: são aquelas cujos valores variam significativamente durante toda a vida da construção como cargas acidentais (ex:vento);
- ações excepcionais: são aquelas que têm duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, entretanto, devendo ser consideradas no projeto de determinadas estruturas (ex:explosão).

## 2.1 - Combinações de ações

As ações permanentes são consideradas em sua totalidade. Já das ações variáveis, são consideradas apenas as parcelas que produzem efeitos desfavoráveis para a segurança da estrutura.

As ações incluídas em cada combinação devem ser consideradas com seus valores representativos, multiplicadas pelos respectivos coeficientes de ponderação das ações.

## 2.2 - Classes de carregamento

Um carregamento é especificado pelo conjunto das ações que têm probabilidade não desprezível de ação simultânea. A classe de carregamento é definida pela duração acumulada prevista para a ação variável tomada como ação variável principal, na combinação considerada. Segue a tabela com tais classes de carregamento.

Tabela 1 – Classes de carregamentos

| Classe de carregamento | Ação variável principal da combinação |                              |
|------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
|                        | Duração acumulada                     | Ordem de grandeza da duração |
| Permanente             | Permanente                            | Vida útil da construção      |
| Longa duração          | Longa duração                         | Mais de 6 meses              |
| Média duração          | Média duração                         | 1 semana a 6 meses           |
| Curta duração          | Curta duração                         | Menos de 1 semana            |
| Duração instantânea    | Duração instantânea                   | Muito curta                  |

## 2.3 - Classificação dos carregamentos

### 2.3.1 - Carregamento normal

Um carregamento é dito normal quando inclui apenas ações decorrentes do uso previsto para a construção. Corresponde à classe de carregamento de longa duração, podendo ter duração igual ao período de referência (ou vida útil) da estrutura.

No carregamento normal as eventuais ações de curta ou média duração terão seus valores atuantes reduzidos a fim de que a resistência do material possa ser considerada como correspondente apenas às ações de longa duração. (ex: projeto de uma casa de madeira, onde serão levados em consideração os carregamentos comuns: peso próprio, sobrecarga, etc)

### **2.3.2 - Carregamento especial**

Um carregamento é dito especial quando inclui a atuação de ações variáveis de natureza especial, cujos efeitos superam em intensidade os efeitos produzidos pelas ações consideradas no carregamento normal. Corresponde à classe de carregamento definida pela duração acumulada prevista para a ação variável especial considerada (ex:neve).

### **2.3.3 - Carregamento excepcional**

Um carregamento é dito excepcional quando inclui ações excepcionais que podem provocar efeitos catastróficos (ex:explosão).

### **2.3.4 - Carregamento de construção**

Um carregamento é dito de construção quando é transitório e deve ser definido em cada caso particular em que haja risco de ocorrência de estados limites últimos já durante a construção. Corresponde à classe de carregamento definida pela duração acumulada da situação de risco (ex.: içamento de uma tesoura por um guindaste).

## **2.4 - Situações de projeto**

As seguintes ações devem ser consideradas no projeto: situações duradouras, situações transitórias e situações excepcionais.

Para cada estrutura particular devem ser especificadas as situações de projeto a considerar, não sendo necessário levar em conta as três possíveis situações de projeto em todos os tipos de construção.

### **2.4.1 - Situações duradouras**

Situações duradouras são aquelas que podem ter duração igual ao período de referência da estrutura. São consideradas no projeto de todas as estruturas.

Nas situações duradouras, para a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos consideram-se apenas as combinações últimas normais de carregamento e, para os estados limites de utilização, as combinações de longa duração ou de média duração (ex:placa de propaganda sobre um beiral).

#### **2.4.2 - Situações transitórias**

Situações transitórias são aquelas que têm duração muito menor que o período de vida da construção. São consideradas apenas para as estruturas de construções que podem estar sujeitas a algum carregamento especial, que deve ser explicitamente especificado para o seu projeto.

Em casos especiais pode ser exigida a verificação da segurança em relação a estados limites de utilização, considerando combinações de ações de curta duração (combinações raras) ou combinações de duração média (combinações especiais) (ex: conserto de um telhado).

#### **2.4.3 - Situações excepcionais**

Situações excepcionais são aquelas que têm duração extremamente curta. São consideradas somente na verificação da segurança em relação a estados limites últimos.

Devem ser consideradas somente quando a segurança em relação às ações excepcionais contempladas não puder ser garantida de outra forma, tal como o emprego de elementos físicos de proteção da construção, ou a modificação da concepção estrutural adotada.

Devem ser explicitamente especificadas para o projeto das construções particulares para as quais haja necessidade dessa consideração.

### **3 - Materiais estruturais**

Um material estrutural para ser considerado como tal, deve possuir outras características, que não sejam somente a resistência à tração e/ou compressão, ele deve apresentar características como plasticidade e elasticidade. Quando tensionado, um material estrutural pode apresentar comportamento elástico ou plástico. Possui comportamento elástico quando retorna a sua posição original após sofrer uma tensão, sem deixar, portanto deformações residuais. Em contrapartida um material estrutural apresenta comportamento plástico quando fica com alguma deformação residual após sofrer um esforço de tensão.

Os principais materiais estruturais aplicados à construção civil são: o aço, concreto e a madeira.

### 3.1 – Aço

O aço é muito empregado na construção civil. Possui como características: excelente resistência à tração, elevadas dureza e plasticidade, ductibilidade, alta condutividade térmica e elétrica.

#### 3.1.1 - Propriedades Mecânicas dos Aços Estruturais

Uma barra metálica submetida a um esforço crescente de tração sofre uma deformação progressiva de extensão. A relação entre a tensão aplicada ( $\sigma = F/\text{área}$ ) e a deformação linear específica ( $\epsilon = \Delta\lambda / \lambda$ ) de alguns aços estruturais pode ser vista em diagramas tensão-deformação.

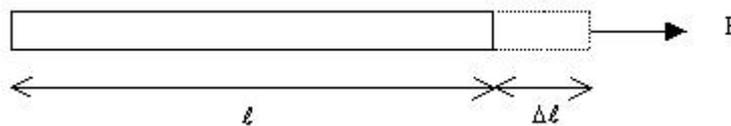


Figura 1 - Deformação progressiva devido à ação de uma força F.

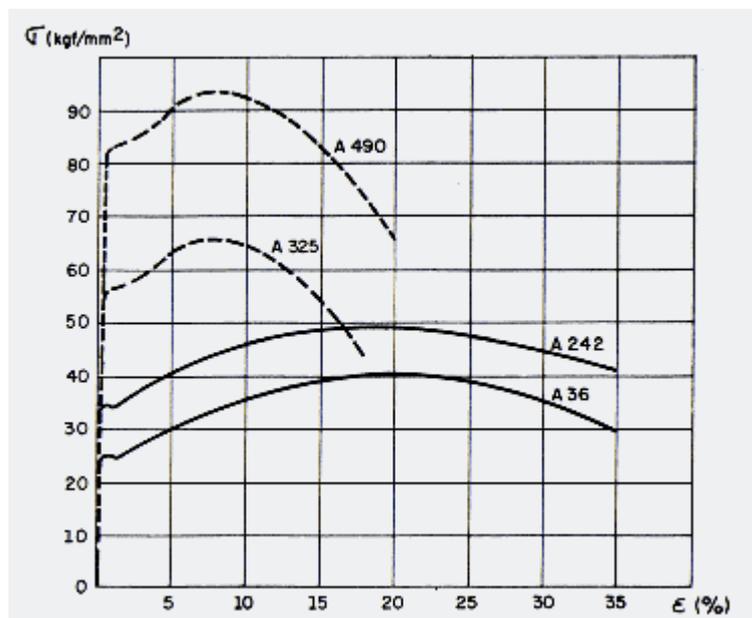


Figura 2 - Diagrama de tensão - deformação em uma escala real.

Até certo nível de tensão aplicada, o material apresenta regime elástico-linear, seguindo a lei de Hooke e a deformação específica é proporcional ao

esforço aplicado. A proporcionalidade pode ser observada no trecho reto do diagrama tensão-deformação e a constante de proporcionalidade é denominada módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade. Quando se ultrapassa o limite de proporcionalidade ( $f_p$ ), tem lugar a fase plástica, onde ocorrem deformações crescentes sem variação de tensão, o chamado patamar de escoamento. O valor constante dessa tensão é a mais importante característica dos aços estruturais e é denominada resistência ao escoamento. Após o escoamento, a estrutura interna do aço se rearranja e o material passa pelo encruamento, em que a tensão varia novamente com a deformação específica, porém de forma não-linear.

O valor máximo da tensão antes da ruptura é denominado resistência à ruptura do material. A resistência à ruptura do material é obtida dividindo-se a carga máxima que ele suporta, antes da ruptura, pela área da seção transversal inicial do corpo de prova. Observa-se que  $f_u$  é calculado em relação à área inicial, apesar de o material sofrer uma redução de área quando solicitada à tração. Embora a tensão verdadeira deva ser calculada considerando-se a área real, a tensão tal como foi definida anteriormente é mais importante para o engenheiro, pois os projetos são feitos com base nas dimensões iniciais.

Em um ensaio de compressão, sem a ocorrência de flambagem, obtém-se um diagrama tensão-deformação similar ao do ensaio de tração.

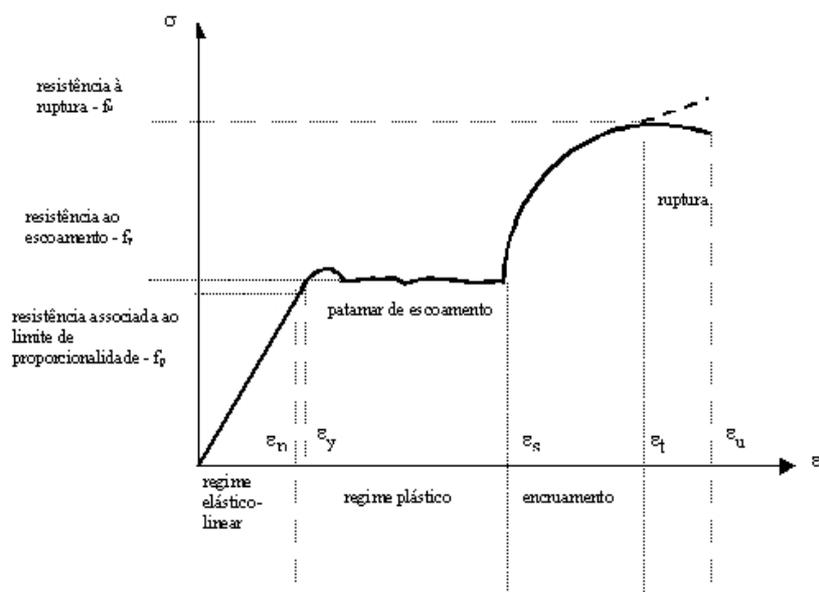


Figura 3 - Diagrama de tensão-deformação dos aços estruturais em escala deformada.

Uma peça de aço, sob efeito de tensões de tração ou de compressão sofre deformações, que podem ser elásticas ou plásticas. Tal comportamento deve-se à natureza cristalina dos metais, pela presença de planos de escorregamento ou de menor resistência mecânica no interior do reticulado. A elasticidade de um material é a sua capacidade de voltar à forma original em ciclo de carregamento e descarregamento. A deformação elástica é reversível, ou seja, desaparece quando a tensão é removida. A deformação elástica é consequência da movimentação dos átomos constituintes da rede cristalina do material, desde que a posição relativa desses átomos seja mantida. A relação entre os valores da tensão e da deformação linear específica, na fase elástica, é o módulo de elasticidade, cujo valor é proporcional às forças de atração entre os átomos. Nos aços, o módulo de elasticidade vale aproximadamente 20 500 KN/cm<sup>2</sup>. A deformação plástica é a deformação permanente provocada por tensão igual ou superior à  $f_p$  - resistência associada ao limite de proporcionalidade (fig. 3). É o resultado de um deslocamento permanente dos átomos que constituem o material, diferindo, portanto, da deformação elástica, em que os átomos mantêm as suas posições relativas. A deformação plástica altera a estrutura interna do metal, tornando mais difícil o escorregamento ulterior e aumentando a dureza do metal. Esse aumento na dureza por deformação plástica, quando a deformação supera  $\epsilon_s$  (vide fig. 3), é denominado endurecimento por deformação a frio ou encruamento e é acompanhado de elevação do valor da resistência e redução da ductilidade do metal.

As diferentes velocidades de resfriamento, após a laminação, conforme o grau de exposição, da chapa ou perfil laminado, levam ao aparecimento de tensões que permanecem nas peças, recebendo o nome de tensões residuais ( $\sigma_r$ ).

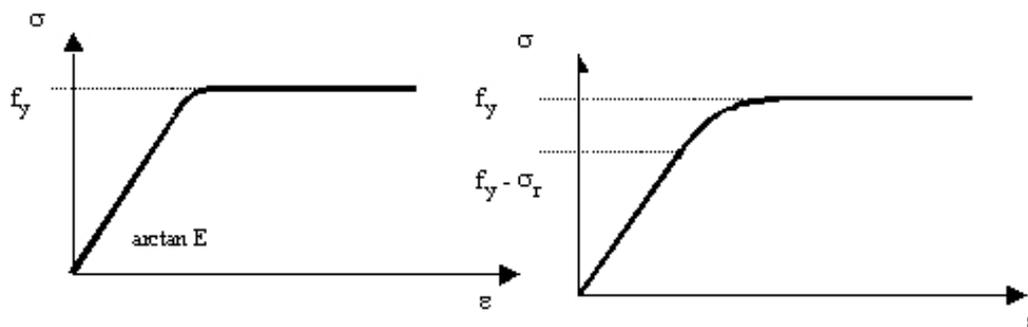


Figura 4 - Diagrama de tensão-deformação teórico para aço virgem e aço com tensão residual, respectivamente.

### 3.1.2 – Aços Patináveis

Os aços patináveis são obtidos pela adição de cobre e cromo, podendo também ser adicionados níquel, vanádio e nióbio. Podem ser encontrados na forma de chapas, bobinas e perfis laminados e apresentam resistência à corrosão atmosférica até oito vezes maior que os aços-carbono comuns, além de resistência mecânica na faixa de 500Mpa e boa soldabilidade.

A sua utilização não exige revestimento contra corrosão, devido a formação da “pátina (camada de óxido compacta e aderente) em contato com a atmosfera. O tempo necessário para a sua completa formação varia em média de 2 a 3 anos conforme a exposição do aço, ou pré-tratamento em usina.

Os aços apresentam bom desempenho em atmosferas industriais não muito agressivas, sendo que em atmosferas industriais altamente corrosivas seu desempenho é bem menor, porém superior à do aço-carbono. Em atmosferas marinhas, as perdas por corrosão são maiores do que em atmosferas industriais, sendo recomendado a utilização de revestimento, devido a salinidade que intensifica a corrosão. Alguns cuidados devem ser tomados na utilização dos aços patináveis sem revestimento. São eles:

- Remoção de resíduos de óleo e graxa, respingos de solda, argamassa e concreto, bem como a carepa de laminação;
- Pintura sobre regiões de estagnação que possam reter resíduos ou água;
- Proteção de regiões sobrepostas, frestas, articulação e juntas de expansão para evitar acúmulo de resíduos sólidos e umidade.
- Materiais próximos aos perfis expostos à ação da chuva devem ser protegidas nos primeiros anos devido a dissolução de óxido provocada;

- Acompanhamento periódico da camada de pátina, pois caso não ocorra a formação, a aplicação de uma pintura de proteção torna-se necessária.

Os aços patináveis também podem ser utilizados com revestimento. Nesse caso, devem receber pintura aqueles utilizados em locais onde as condições climáticas não permitam o desenvolvimento da pátina protetora, quando expostas à atmosfera industrial muito agressiva, atmosfera marinha severa, regiões submersa e locais onde não ocorram ciclos alternados de molhagem e secagem, ou quando for uma necessidade imposta no projeto arquitetônico.

Os aços patináveis apresentam boa aderência ao revestimento com desempenho duas vezes maior que o aço-carbono comum.

Além da excelente soldabilidade, os aços patináveis podem apresentar alta ou média resistência mecânica. No primeiro caso, proporcionam economia no peso da estrutura, pela redução da espessura da chapa. Quanto maior a quantidade de carbono na liga, maior a resistência esperada para o aço, porém diminui a sua ductilidade.

Na tabela a seguir são mostradas as propriedades mecânicas dos aços patináveis brasileiros:

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas dos Aços Patináveis.

| <b>Siderúrgica</b> | <b>Designação comercial</b> | <b>Limite de escoamento (MPa)</b> | <b>Limite de Ruptura (MPa)</b> | <b>Dobramento Longitudinal 180° (Calço)</b> |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| <b>Usiminas</b>    | USI-SAC-250<br>(USI-SAC-41) | ≥ 250                             | 402 a 510                      | 1,5(e)                                      |
|                    | USI-SAC-300<br>(USI-SAC-41) | ≥ 300                             | 402 a 510                      | 1,5(e)                                      |
|                    | USI-SAC-350<br>(USI-SAC-50) | ≥ 373                             | 490 a 608                      | 1,5(e)                                      |
| <b>Cosipa</b>      | COS-AR-COR-400              | ≥ 250                             | 380 a 520                      | 1,0(e)                                      |
|                    | COS-AR-COR-400              | ≥ 300                             | 380 a 520                      | 1,0(e)                                      |
|                    | E                           | ≥ 375                             | 490 a 630                      | 3,0(e)                                      |
|                    | COS-AR-COR-500              |                                   |                                |   |
| <b>CSN</b>         | CSN COR 420                 | ≥ 300                             | 420                            | 1,5(e)                                      |
|                    | CSN COR 500                 | ≥ 380                             | 520                            | 1,5(e)                                      |

### 3.1.3 - Vantagens e desvantagens dos aços estruturais

Como vantagens das estruturas de aço podemos citar:

- Alta resistência do material nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão etc.), o que permite aos elementos estruturais suportarem grandes esforços apesar da área relativamente pequena das suas seções; por isso, as estruturas do aço, apesar da sua grande densidade, são mais leves do que os elementos constituídos em concreto armado, permitindo assim vencer grandes vãos.

- Manutenção das dimensões e propriedades dos materiais.
- Material resistente a choques e vibrações.
- Os elementos de aço oferecem uma grande margem de segurança no trabalho, o que se deve ao fato de o material ser único e homogêneo, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definido.
- Os elementos de aço podem ser desmontados e substituídos com facilidade, o que permite reforçar ou substituir facilmente diversos elementos da estrutura.
- Possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais necessário à construção (valores que chegam a 100% de aproveitamento).

Como desvantagens das estruturas de aço podemos citar:

- Limitação na execução em fábrica em função do transporte até o local de sua montagem final.
- Necessidade de tratamento superficial das peças contra oxidação devido ao contato com o ar atmosférico.
- Necessidade de mão-de-obra e equipamentos especializados para sua fabricação e montagem.
- Limitação de fornecimento de perfis estruturais.

### **3.2 - Madeira**

A madeira é um dos materiais estruturais mais antigos utilizados pelo homem em edificações. Acrescente-se ainda o fato da madeira possuir um vasto campo de aplicação em construções, como por exemplo, pontes, residências, igrejas, passarelas, curtumes, cimbramento e em edificações inseridas em ambientes altamente corrosivos, etc.

Apesar da madeira ter qualidades estruturais bastante apreciáveis, ainda há muito preconceito em relação a sua utilização como material estrutural. Em grande parte devido a falta de conhecimento adequado a respeito deste

material, da falta de projetos específicos, assim como da cultura da construção civil brasileira.

Como a maioria dos materiais estruturais a madeira apresenta vantagens e desvantagens em relação a sua utilização. Segue abaixo uma tabela comparativa entre as vantagens e desvantagens da aplicação de madeiras em estruturas de edificações:

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do uso da madeira estrutural.

| <b><u>Principais vantagens do uso da madeira:</u></b>   | <b><u>Possíveis desvantagens:</u></b>   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>-É renovável e abundante na natureza;</li><li>-Possui elevada resistência em relação a sua baixa massa específica;</li><li>-Excelente isolante térmico e acústico;</li><li>-Facilidade de trabalho e união das peças;</li><li>-Inerte, mesmo quando está exposta a ambientes químicos;</li><li>-Baixa demanda de energia para produção;</li><li>-Pode ser reempregada várias vezes;</li><li>-Tem custo relativamente baixo.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>-Possui variações transversais e longitudinais devido a variação da umidade;</li><li>-É combustível, principalmente quando se trata de elementos de pequenas dimensões;</li><li>-É relativamente venerável ao ataque de insetos e agentes externos de uma forma geral;</li><li>-Possui composição bastante heterogênea e anisotrópica;</li><li>-Por vezes possui formas que limitam sua utilização;</li></ul> |

Além das características citadas acima, podemos citar ainda a beleza arquitetônica. Provavelmente por se tratar de um material natural e gerar um visual atraente, que agrada a maioria das pessoas.

Por outro lado, a madeira também possui algumas características indesejáveis em estruturas. Apesar das desvantagens, alguns dos seus efeitos podem ser contornados através da utilização de preservativos, indispensáveis para os projetos de estruturas de madeira expostas às circunstâncias propícias à proliferação dos efeitos indesejáveis em estruturas deste tipo. O tratamento da madeira é indispensável para peças em posições sujeitas a variações de umidade e de temperatura favoráveis ao desenvolvimento de agentes externos.

Vale citar que apesar da madeira ser inflamável, ela resiste a altas temperaturas e não perde resistência sob estas condições como acontece com o aço, por exemplo.

### **3.2.1 - Madeiras estruturais**

As espécies de madeiras mais utilizadas em estruturas no Brasil são: Peroba Rosa, Ipê, Eucalipto, Pinho, Jatobá, Maçaranduba, Garapa, Cumaru, Aroeira e Itaúba.

A madeira apresenta um comportamento estrutural bastante apreciável, pois possui resistência mecânica tanto a esforços de tração como a compressão, além de resistência a tração na flexão e tem resistência a choques e cargas dinâmicas absorvendo impactos que dificilmente seriam absorvidos com outros materiais;

Através do desenvolvimento de técnicas modernas com o intuito de melhorar as qualidades da madeira, esta passou a ser mais utilizada, uma vez que tais procedimentos melhoram as boas características deste material e eliminam ou minoram os inconvenientes citados na tabela 2.

A madeira é um material que não possui homogeneidade e tem muitas variações. Ademais, há diversas espécies com propriedades distintas. Desta forma, é necessário o conhecimento das características para o melhor aproveitamento possível do material. Os procedimentos necessários para caracterização das espécies de madeira e a definição de parâmetros a serem seguidos são dados pela Norma Brasileira para Projeto de Estruturas de Madeira, NBR 7190/97.

A Tabela 4 apresenta as seções e dimensões mínimas exigidas pela norma para peças usadas em estruturas.

Tabela 4 - Dimensões mínimas exigidas pela norma para elementos de madeira.

|  |                           | <b>Seção mínima (cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Dimensão mínima (cm)</b> |
|--|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Peça simples</b>                        | Vigas e barras principais | 50                                   | 5.0                         |
|  | Peças secundárias         | 18                                   | 2.5                         |
| <b>Peças isoladas das seções múltiplas</b> | Peças principais          | 35                                   | 2.5                         |
|  | Peças secundárias         | 18                                   | 1.8                         |

As madeiras estruturais apresentam características que lhes são bem peculiares dentro do grupo dos materiais estruturais utilizados na construção civil. Essas características diz respeito a anisotropia da madeira e ao fato desta sofrer variações nas suas dimensões devido sua característica higroscópica.

### **3.2.2 - Anisotropia da madeira**

Diz-se que um material é anisotrópico quando as propriedades físicas ou químicas não apresentam as mesmas características nas diversas direções em que se pode analisar tal material.

O processo de crescimento da árvore determina uma simetria axial e uma direção predominante das células que constituem o lenho. Este arranjo resulta na anisotropia da madeira. Devido à constituição da árvore, as suas propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas não são as mesmas nos três sentidos principais de análise: axial, radial e tangencial. Portanto a madeira é um material anisotrópico.

### **3.2.3- Características Higroscópicas da madeira**

Por ser um material higroscópico, a madeira absorve umidade da atmosfera quando está seca e a libera quando está úmida, procurando atingir um equilíbrio com as condições de vapor de água da atmosfera circunvizinha. Ao absorver água as dimensões da peça de madeira aumenta, fenômeno conhecido por inchamento, e, ao liberar água, as dimensões diminuem, fenômeno denominado retração.

Por ser um material anisotrópico, a madeira apresenta diferentes variações dimensionais, com a variação no teor de umidade da madeira, nas diferentes direções principais. A diferença entre as retrações nas três direções: tangencial, radial e axial, explica a maior parte dos defeitos que ocorrem com a secagem da madeira: rachaduras e empenamentos. Dependendo da regularidade ou não da direção das fibras de certas espécies de madeira os empenamentos são ainda mais acentuados.

### **3.2.4 - Propriedades físicas da madeira**

#### **3.2.4.1 - Umidade**

É dada pela quantidade de água infiltrada na madeira. A umidade da madeira é medida através da porcentagem relativa de água infiltrada na madeira em relação a massa seca.

#### **3.2.4.2 - Massa Específica**

De um modo geral, a madeira apresenta uma massa específica bastante reduzida, se comparada com outros tipos de materiais estruturais. Tal característica é bastante relevante, na etapa de especificações de materiais que constituirão uma dada estrutura.

A massa específica pode ser básica ou aparente: a básica é calculada através do quociente entre a massa seca e o volume saturado da peça.

Por outro lado a massa específica aparente é calculada considerando-se o volume de uma peça de madeira com umidade de 12%.

#### **3.2.4.3 - Retrabilidade**

É a característica relativa à diminuição (retração) das dimensões da madeira devido à perda de água impregnada. A madeira possui maior retrabilidade na direção tangencial seguida pelas direções radial e axial.

#### **3.2.4.4 - Módulo de elasticidade**

Para a madeira há diversos tipos de módulo de elasticidade, que dependem do tipo de esforço e da direção do mesmo em relação às fibras. O módulo de elasticidade básico é o longitudinal na compressão (ou tração) paralela as fibras. Os módulos de elasticidade são definidos em função do tipo de esforço: paralelo e normal às fibras, flexão e torção.

O módulo de elasticidade é uma característica relativa a cada material. É a constante utilizada para determinar o estado das tensões no regime elástico do material.

### **3.3 - Concreto**

O concreto é um material resultante da mistura de cimento, água, agregado graúdo (brita ou cascalho) e agregado miúdo (areia). No estado fresco, o concreto possui consistência plástica, podendo ser moldado em formas com dimensões desejadas.

O concreto no estado endurecido tem elevada resistência à compressão, porém sua resistência a tração é bastante reduzida (cerca de 10% da resistência à compressão.).

#### **3.3.1 - Concreto armado**

É obtido através da colocação de barras de aço no interior do concreto. As armaduras são posicionadas, no interior da fôrma, antes do lançamento do concreto plástico que envolve as barras de aço (que possui excelente resistência à tração). O resultado é uma peça estrutural que pode resistir solidariamente aos esforços de compressão e tração.

As barras de aço, colocadas no interior do concreto, são protegidas contra a corrosão pelo fato de o concreto ser um meio alcalino. Por outro lado, a fissuração do concreto armado pode permitir o acesso de ar e água junto às armaduras, reduzindo o grau de proteção das mesmas contra oxidação o que reduz a eficiência e durabilidade do concreto armado.

A fissuração do concreto pode surgir devido, principalmente, a retração acelerada do concreto, quando se permite rápida evaporação da água na mistura, assim como devido às tensões de tração produzidas por solicitações atuantes.

### **3.3.2 - Vantagens e desvantagens do concreto armado**

Vantagens do uso do concreto armado como material de construção:

- São materiais econômicos e abundantes no planeta;
- É de fácil moldagem, permitindo adoção das mais variadas formas;
- Emprego extensivo de mão-de-obra não qualificada e equipamentos simples;
- Elevada resistência à ação do fogo;
- Elevada resistência ao desgaste mecânico
- Grande estabilidade, sob ação de intempéries, dispensando trabalhos de manutenção;
- Aumento da resistência à ruptura com o tempo;

A principal desvantagem do concreto armado é sua massa específica elevada (aproximadamente  $2,5 \text{ t/m}^3$ ). Em obras com grandes vãos, as solicitações de peso próprio se tornam excessivas, resultando em uma limitação prática dos vãos das vigas em concreto armado.

## **4 - Elementos Estruturais**

As estruturas ou sistemas estruturais são constituídas através da disposição racional e adequada de diversos elementos estruturais. Os elementos estruturais são os responsáveis por receber e transmitir as solicitações na estrutura, sofrendo como consequência deformações. Os elementos estruturais podem ser:

- Barras: possuem dimensões da seção transversal da mesma ordem de grandeza, e menores em relação ao seu comprimento e cujo eixo é uma linha reta ou curva aberta.

As barras podem constituir diversos sistemas estruturais. Dentre os principais estão:

Viga: estrutura formada por barras alinhadas;

Arco: estrutura formada por barra cujo eixo é uma curva única;

Pórtico: estrutura formada de barras não-alinhadas;

Cabo: formado por uma barra flexível, sem resistência à flexão (resiste bem a esforços de tração);

Treliça: estrutura constituída por barras dispostas de modo a formar uma rede de triângulos.

- Folhas ou estruturas de superfície - São elementos estruturais que apresentam grandes superfícies em relação a sua espessura.

Nesta classe de elementos podemos ter as seguintes estruturas:

Chapas: são estruturas formadas por dois planos paralelos muito próximos um do outro, estando as forças situadas no plano médio. Como exemplo prático podemos citar as vigas-parede. Quando a chapa é muito fina tem-se uma estrutura laminar;

Placas: estruturas planas nas quais as cargas agem em planos diferentes da superfície (normalmente perpendiculares);

Membranas: são placas ou cascas que não possuem resistência à flexão;

Cascas: São estruturas limitadas por duas superfícies curvas. Exemplo: cúpulas.

- Blocos: Os blocos possuem as três dimensões com a mesma ordem de grandeza.

Para os blocos não se pode desprezar nenhuma das três dimensões, por este motivo não deve ser considerado uma estrutura linear (barra) nem estrutura superficial (folha). Como exemplo de estrutura formada por bloco pode-se citar os blocos de fundações.

## **5 – Sistemas estruturais**

### **5.1-Estruturas Lineares**

#### **5.1.1-Vigas**

As vigas são estruturas lineares. Podem ser dispostas horizontalmente ou inclinadas, com um ou mais apoios (móvel ou fixo), engastes, etc, de tal

forma a garantir que tais barras sejam no mínimo isostáticas. Podem ser confeccionadas de madeira, aço, ferro fundido, concreto (armado ou protendido) e alumínio, com aplicações nos mais diversos tipos de construções. As figuras a seguir ilustram algumas das aplicações mais comuns do uso de vigas.



Figura 5 – Vigas pré-moldadas com ligações tipo pilar-pilar. Seção em I.



Figura 6 - Vigas de madeira com seção circular.



Figura 7 – Viga balcão em concreto armado.



Figura 8 – Viga treliçada (Ciclo Básico).



Figura 9 – Viga em balanço no Ciclo Básico

### 5.1.1.1 - Principais tipos de vigas

Os principais tipos de vigas são:

Viga em balanço: viga com apoio único que obrigatoriamente deve ser um engaste fixo;

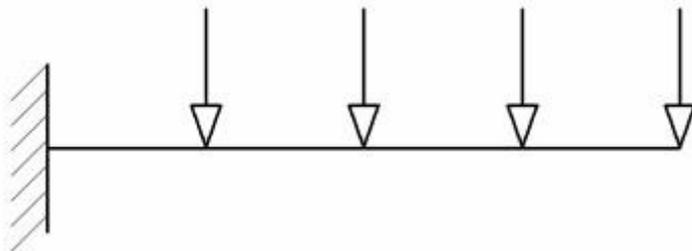


Figura 10 – Viga em balanço.

Viga simplesmente apoiada: viga com apoio fixo e um apoio móvel;

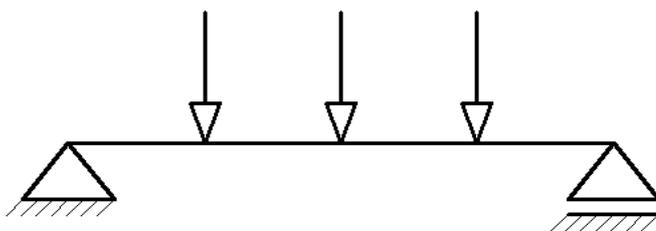


Figura 11 – Viga bi-apoiada.

Viga biengastada: viga com as duas extremidades engastadas;

Viga Gerber: viga articulada e isostática, sobre mais de dois apoios;

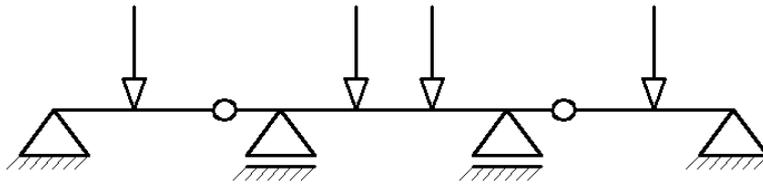


Figura 12 – Viga Gerber.

Viga contínua: viga hiperestática, sobre mais de dois apoios;

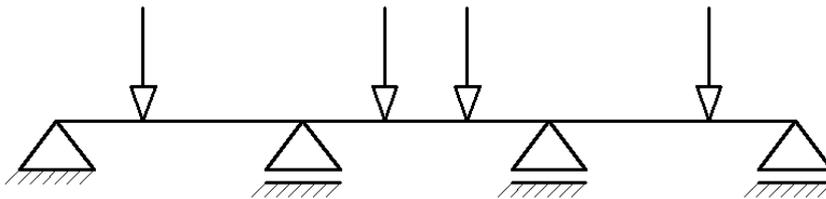


Figura 13 – Viga contínua.

Viga balcão: viga de eixo curvo ou poligonal, com carregamento não pertencente ao plano formado pela viga;

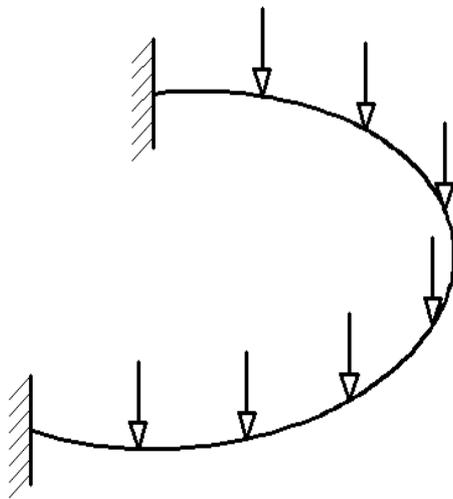


Figura 14 – Viga balcão.

Viga-coluna: barra com solicitações de flexão e de compressão;

#### 5.1.1.2 - Comportamento estrutural

Pensemos hipoteticamente em uma viga submetida somente a esforço de momento fletor:

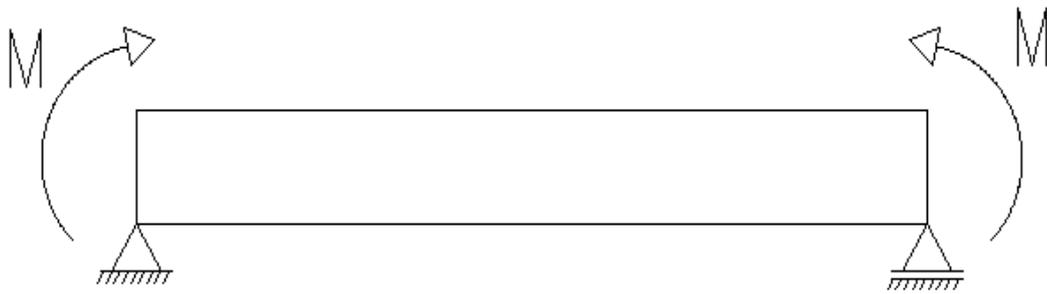


Figura 15 – Viga submetida somente a carregamento de momento fletor.

Através do uso de um modelo simples de espuma, pode-se observar que ocorre um encurtamento da distância entre as fibras da viga em uma face e alongamento na face oposta. Portanto, conclui-se que metade da seção da viga estará submetida a tração e a outra metade a esforço de compressão.

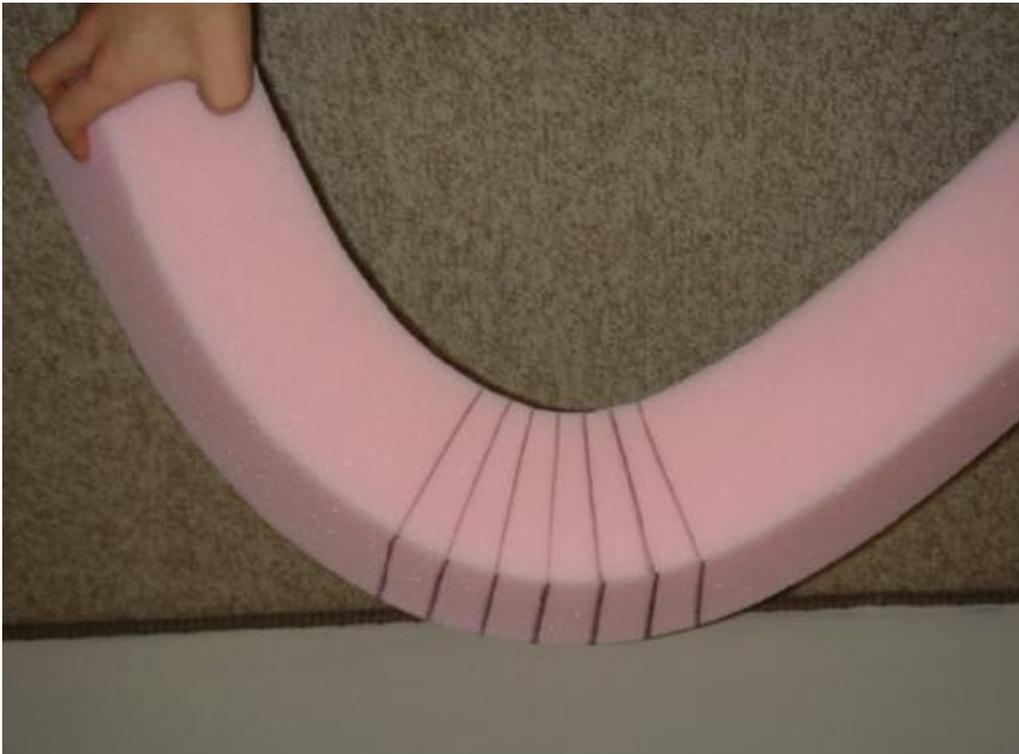


Figura 16 – Modelo que esquematiza a deformação de uma viga submetida à flexão pura.

Assim podemos perceber que na flexão pura surgem tensões normais na viga, isto é, tensões na direção axial da viga. Logo, conclui-se que momento fletor gera tensões normais.

Como os efeitos máximos de compressão e de tração ocorrem nas partes extremas da seção, parece lógico concentrar mais material nessas áreas extremas, pois qualquer material em posição intermediária a essas

partes será menos solicitado, e conseqüentemente, usado de forma menos eficiente. Por este ponto de vista seria plausível afirmar que se fosse possível concentrar todo o material nas bordas, de modo que a área de uma borda satisfizesse a resistência a compressão e a outra satisfizesse a resistência a tração, então todo o material poderia ser solicitado na sua capacidade máxima, o que implica em uma seção mais econômica.

Entretanto, a grande maioria das situações de carregamentos na vigas não diz respeito a flexão pura, havendo também força cortante (cisalhamento), sendo que o procedimento de utilizar áreas extremas não é eficiente para melhorar a resistência ao esforço cortante.

O esforço cortante provoca tensões de cisalhamento, que podem ser verticais ou horizontais ao longo da viga. O cisalhamento vertical pode ser percebido se imaginarmos uma viga totalmente fatiada ao longo de suas seções transversais, assim seria possível observar o escorregamento entre as fatias das seções transversais. Tal viga seria incapaz de suportar forças verticais caso não seja providenciada alguma resistência ao cisalhamento vertical.

De maneira análoga se imaginarmos uma viga “fatiada” horizontalmente ao longo de seu eixo longitudinal e em seguida aplicássemos uma força vertical nessa viga, perceberíamos que estas fatias tenderiam a escorregar umas sobre as outras. Tal fato evidencia a existência de esforços internos (cisalhamento horizontal) em uma viga comum que suportem os efeitos da força cortante.

Uma viga pode estar submetida a cargas concentradas, a cargas distribuídas ou combinação de ambas. Quando se trabalha com cargas distribuídas, pode-se substituí-la por uma carga concentrada atuando no centro de gravidade do carregamento, facilitando os cálculos.

#### - Carga Concentrada

Corresponde a aplicação de uma carga em um único ponto sobre a estrutura.

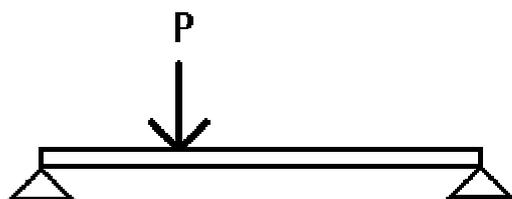


Figura 17 – Carga concentrada em uma viga biapoiada.

#### - Carga Distribuída

Corresponde a aplicação de uma carga por unidade de comprimento, geralmente representado em kilograma força por metro (kgf/m) ou Newton por centímetro (N/cm). Quando a carga por unidade de comprimento tem valor constante, temos uma carga uniformemente distribuída.

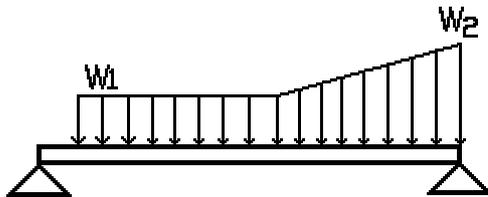


Figura 18 – Carga distribuída em uma viga biapoiada.

#### 5.1.1.3 - Seções transversais usualmente empregadas

Existem alguns tipos de seções transversais, que dependendo do material, costumam ser bastante típicas nas construções de vigas, devido em grande parte pela grande eficácia de tais seções.

As vigas fabricadas em aço ou alumínio permitem explorar ao máximo a característica de afastar áreas do centro de gravidade, para desta forma obter-se maior inércia à flexão, o que implica em reduzir as intensidades das tensões normais e de cisalhamento na viga.

Com os metais é possível a construção de seções formadas a partir de elementos delgadas (i.e., com pequenas espessuras), o que implica em economia de material. Verifica-se que a construção de seções em metal de pequenas espessuras é possibilitada devido à resistência de tal material, do elevado módulo de elasticidade ( $E$ ), assim como na sua homogeneidade. A ligação dos elementos da seção pode ser realizada ainda na fabricação, por solda, dentre outras.

Para a madeira, por possuir resistência e módulo de elasticidade relativamente inferiores aos dos metais, e, portanto suas seções não devem ser construídas com mesma ordem de dimensão. As seções de vigas de madeira são mais eficientemente construídas através de ligações coladas. Outros tipos de ligação também são utilizadas, tais como: pregos e parafusos, que, no entanto, são deformáveis, acarretando em perda de eficiência quanto a resistência e inércia à flexão da viga.

No que diz respeito ao concreto, as dimensões das seções são bem superiores as de vigas em madeira ou aço. Esta dificuldade reside no fato das dimensões dos componentes do concreto tais como armaduras (para os casos de concreto armado ou protendido) e agregados quando comparados com as dimensões dos elementos de seções delgadas. Portanto, é bastante comum encontrar vigas de elementos delgados constituídas em aço ou alumínio, de espessuras médias quando em madeira e de alta robustez quando em concreto armado (como por exemplo, as vigas encontradas no museu de arte de São Paulo – MASP).

- Segue abaixo algumas das seções mais empregadas na construção civil:
- Seções retangulares maciças ou vazadas;
- Seções circulares maciças ou vazadas;
- Seção em I, H ou T;
- Seção caixão;

As seções retangulares maciças são comuns nos elementos fabricados com madeira e com concreto armado, devido o bom desempenho da seção, inclusive economicamente, uma vez que são os tipos de seções mais utilizadas comercialmente, tanto para madeira como para concreto, pois trata-se de materiais em que há maior facilidade na execução de tais seções.

As seções em I são comuns em vigas de aços, em perfis laminados ou soldados. Podem ocorrer, em alguns casos, em vigas de madeira e até mesmo em elementos de concreto armado ou protendido, com o desenvolvimento das técnicas de pré-fabricação.

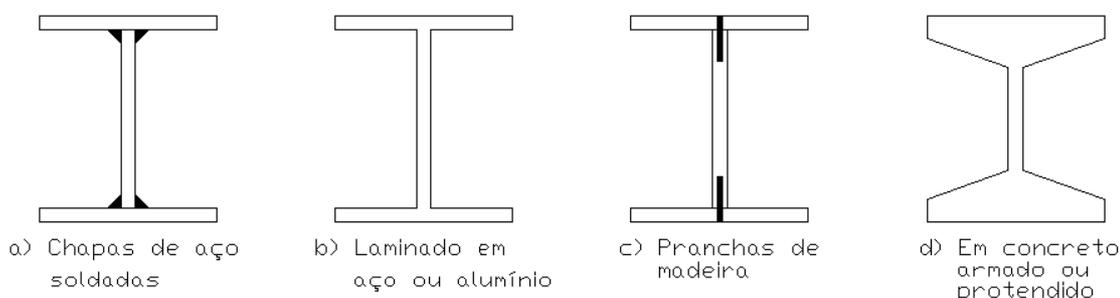


Figura 19 – Seções transversais em I.

As seções vazadas podem ter forma circular, retangular, triangular, trapezoidal, etc. São bastante aplicadas quando ocorrem significativas

solicitações de torção na viga. Podem ser fabricadas com qualquer material estrutural, ocorrendo naturalmente a distinção entre a espessura dos elementos e nos meios de ligação dos mesmos em função do material utilizado.

Outras seções existentes são as seções em T, L, C e várias outras, que usualmente são empregadas em situações específicas, definidas por ocasião de projeto.

### 5.1.2 - Treliças

São estruturas lineares constituídas por barras retas, dispostas de modo a formar painéis triangulares, solicitadas basicamente por tração ou compressão. Os principais elementos que compõem as treliças são:

Corda ou banzo: conjunto de barras que limitam superiormente ou inferiormente a treliça;

Montante: barra vertical das treliças;

Diagonal: barra com o eixo coincidente com a diagonal de um painel;

Painel: trecho compreendido entre dois alinhamentos consecutivos de montantes.

Nó: ponto de encontro e junção das extremidades das barras;

Tesoura: treliça de banzos não paralelos, destinada ao suporte de uma cobertura.

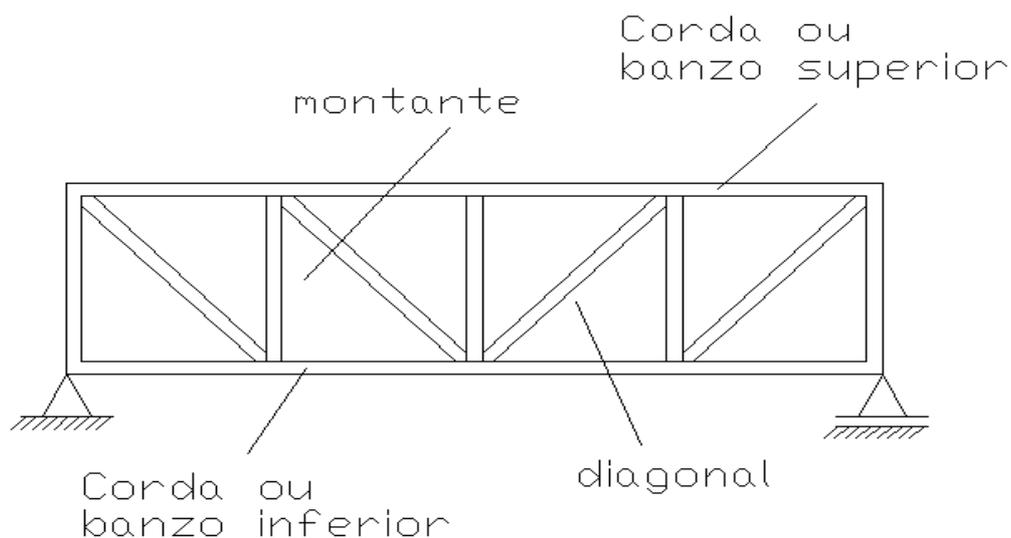


Figura 20 – Elementos de uma treliça.

As treliças podem ser planas ou espaciais de acordo com a distribuição de seus elementos segundo um mesmo plano ou em planos distintos, respectivamente.

### 5.1.2.1 - Treliças Planas

Denomina-se treliça plana, o conjunto de elementos de construção (barras redondas, chatas, cantoneira) que são interligados entre si, sob forma geométrica triangular, através de pinos, soldas, rebites ou parafusos e que visam formar uma estrutura rígida, com a finalidade de resistir a esforços somente a normais.

O nome treliça plana deve-se ao fato de todos os elementos do conjunto pertencerem a um único plano e esse sistema estrutural é muito aplicado em pontes, viadutos, coberturas, guindastes, torres, etc.

A treliça ideal é um sistema reticulado indeformável cujas barras possuem todas as suas extremidades rotuladas e cujas *cargas estão aplicadas nestas rótulas*. Dois métodos de dimensionamento podem ser utilizados para as treliças, são eles:

- Método dos Nós ou Método de Cremona;
- Método de Ritter ou Método das Seções (analíticos e usados com maior freqüência).

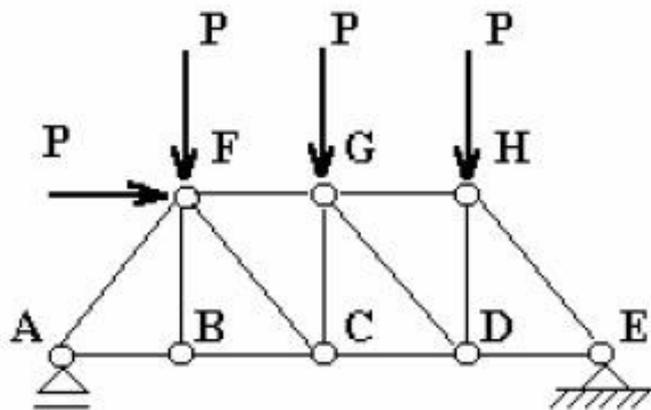


Figura 21 – Atuação dos esforços na treliça plana.

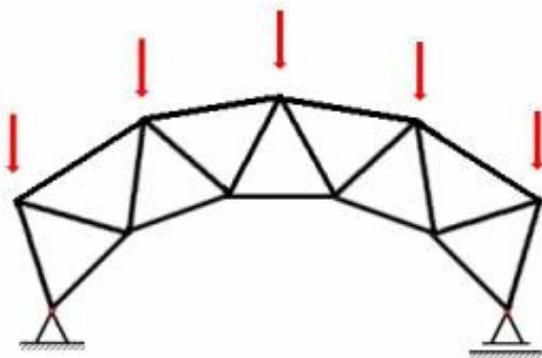


Figura 22 – Carregamento nos nós de uma treliça curva.

### 5.1.2.1.1 - Tipos usuais de treliças de cobertura.

Em casos onde a inclinação do telhado é muito pequena e não se pode considerar os dois banzos paralelos, a disposição dos montantes e das diagonais pode dar origem a treliças de eficiência similares, porém de comportamentos estruturais um pouco diferentes entre si. Segue abaixo algumas das tesouras mais usuais utilizadas na prática da construção civil.

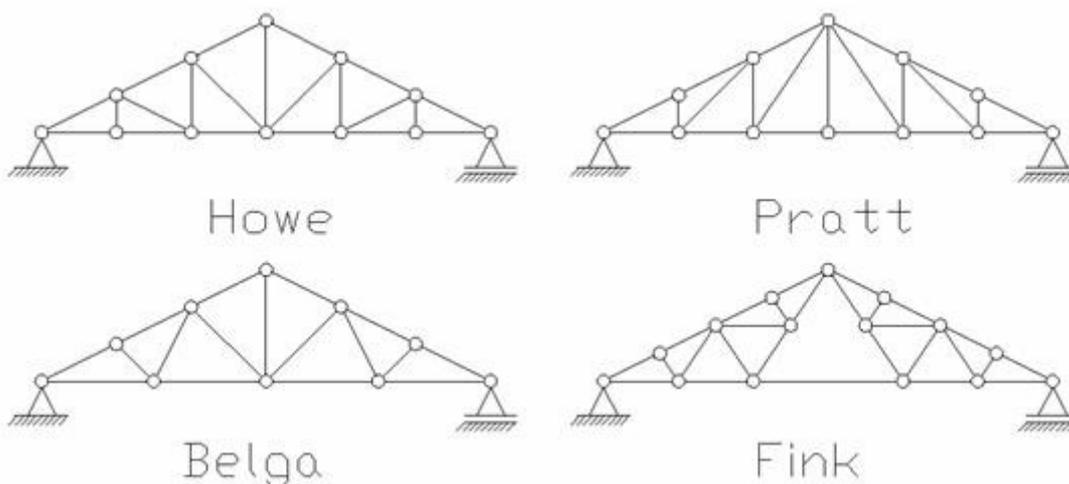


Figura 23 – Tipos de tesouras mais comuns para cobertura.

Na Unicamp foram encontrados exemplos de treliças planas em duas ocasiões: No prédio da Economia e no Restaurante Universitário. No caso do R.U. as treliças são feitas de aço, em formato simples e triangular e parte delas fica encoberta pelo telhado.



Figura 24 – Exemplo de treliça plana no R.U.

No caso da Economia, as treliças também são em aço, pintadas para proteger contra a corrosão. Trata-se de uma treliça que cobre um grande vão e é apoiada por grandes pilares de concreto para garantir sua segurança estrutural. A junção entre a treliça e o pilar pode ser observada com detalhes na figura abaixo.



Figura 25 – União entre treliças e pilar.

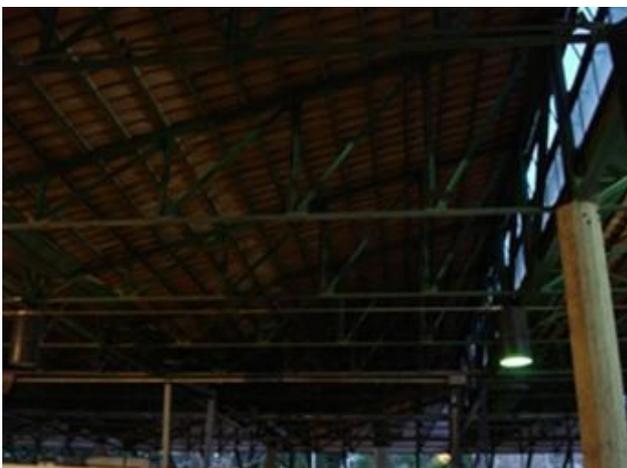


Figura 26 – Treliças planas no prédio da Economia.

É possível notar uma semelhança entre a treliça acima e a treliça de cobertura do tipo shed, exceto pela inversão do sentido das barras diagonais. Essas treliças são usadas em coberturas muito grandes.

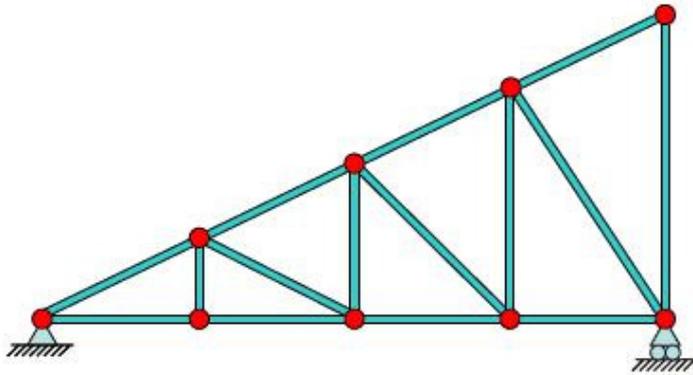


Figura 27 – Treliça para cobertura do tipo Shed.



Treliça Warren

Figura 28 - Treliça plana de aço.



Figura 29 - Tesoura de madeira triangular em duas águas.

### **5.1.2.2 - Treliças Espaciais**

#### **5.1.2.2.1 - Definição e funções das treliças espaciais.**

Por sua vez, a treliça espacial (ou estrutura reticulada tridimensional) consegue responder muito bem a uma ação localizada e também distribuir de forma bastante eficaz os esforços entre os seus elementos (barras e nós) em consequência da interconexão entre os mesmos.

Uma treliça espacial é uma estrutura metálica de aço ou alumínio que utiliza a forma básica de um triângulo, única forma indeformável, para criar um conjunto tridimensional de alta eficiência estrutural. Suas barras e nós suportam cargas axiais e têm a capacidade de distribuí-las no espaço, criando um sistema eficiente quando calculado de maneira apropriada. Esse sistema funciona de modo que quando um membro atinge sua capacidade máxima, os demais suportam cargas adicionais, fazendo com que o sistema funcione de maneira integrada. As treliças geradas a partir do módulo piramidal podem ter bases retangulares ou quadradas, enquanto as tetraédricas podem ser de base triangular equilátera ou isósceles. As barras constituintes podem ser fabricadas a partir de perfis tubulares circulares, retangulares ou quadrados, podendo também ser confeccionadas em perfis tipo “U” com abas à 90° ou inclinadas. As primeiras treliças espaciais surgidas no Brasil, por imposição de mercado, foram projetadas em alumínio, porém, nos dias de hoje 90% são produzidas com tubos de seção circular em aço.

As principais vantagens de se usar treliças espaciais são:

- A boa relação entre o peso próprio da estrutura e o vão da treliça;
- Fácil transporte, fabricação e montagem, com elementos de peso próprio reduzido;
- Facilidade de desmontagem e ampliação para estruturas temporárias;
- Grande repetição de elementos e nós para grandes vãos, diminuindo o custo da estrutura em comparação com as demais;
- Beleza arquitetônica e flexibilidade quanto à disposição dos pilares;

#### **5.1.2.2.2 - Aspectos gerais**

##### **Malhas**

Os elementos que compõem uma treliça espacial são os responsáveis pelo seu comportamento estrutural. A disposição mais utilizada para os elementos de duas camadas são os arranjos (das barras) quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo. Diferentes arranjos geram distribuições diferentes dos esforços nas barras. Em geral, o arranjo com menor número de barras e de nós é a solução mais econômica.



Figura 30 – Exemplo de treliça quadrado sobre quadrado com defasagem de meio módulo.

##### **Apoios**

As treliças espaciais podem ser apoiadas em pilares de concreto armado ou de aço, diretamente em um nó, seja ele do banzo superior ou inferior. Quando a estrutura está sujeita a carregamentos muito grandes, é ideal que se utilizem elementos adicionais para minimizar os esforços que convergem para o nó de apoio, como por exemplo: vigas de transição entre dois nós, pirâmides invertidas, dentre outros.

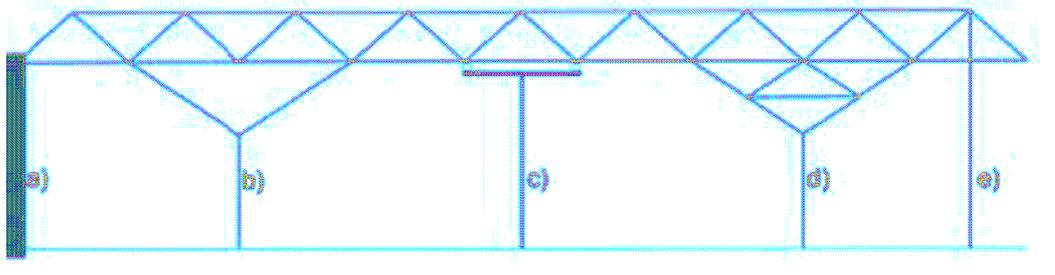


Figura 31- Tipos de apoios: a) apoio direto no banzo inferior; b) apoio do tipo pirâmide invertida; c) apoio com viga de transição; d) pirâmide invertida com travejamento interno; e) apoio direto no banzo superior.

### Relações dimensionais, seções transversais e material

A altura recomendada para um treliça é de  $L/20$  a  $L/40$ , sendo  $L$  o comprimento do maior vão da treliça analisada. Recomenda-se também manter os ângulos das diagonais entre 40 e 55 graus.

As treliças espaciais são geralmente construídas utilizando-se seções tubulares circulares, uma vez que estas possuem simetria, facilidade no detalhamento da ligações e possuem características favoráveis quanto à flambagem. Quanto ao material de que são feitas, o mais comum é que sejam de aço, mas é utilizado também, em menor escala, o alumínio.

### Ligação entre barras: Nós

Um fator importante a ser levado em consideração no estudo das treliças são os nós utilizados na união das barras. Os mesmos devem apresentar estabilidade sem, contudo, falhar no quesito estético. Ao longo dos anos vários tipos de nós vem sendo utilizados na fabricação de treliças, mas alguns foram eliminados por apresentarem falhas no comportamento estrutural ou por serem esteticamente desfavoráveis.

Atualmente, os principais tipos de nós utilizados nas treliças são: os nós cruzados, onde os eixos de todas as barras convergem para o centro da esfera de maneira direta, o que os tornam perfeitos tanto estrutural quanto esteticamente; os nós “cruzetas”, que são formados por chapas metálicas planas que são interligadas e montadas em planos diferentes, pertencentes aos planos de trabalho referentes a cada barra. Estes não são tão favoráveis estruturalmente, porém são mais econômicos, de fácil fabricação e estética razoável.



Figura 32 - Nó esférico tipo MERO.

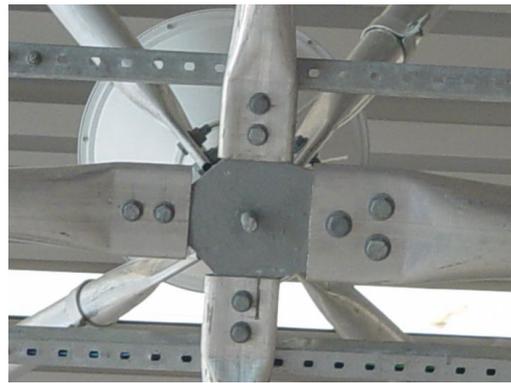


Figura 33 - Nó em cruzeta.

Além destes, existem ainda os chamados nós de “ponta amassada”, que são extremamente econômicos, apesar impróprios tanto estrutural quanto esteticamente. São muito utilizados, tomando-se as devidas precauções, para estruturas espaciais de pequenos vãos.

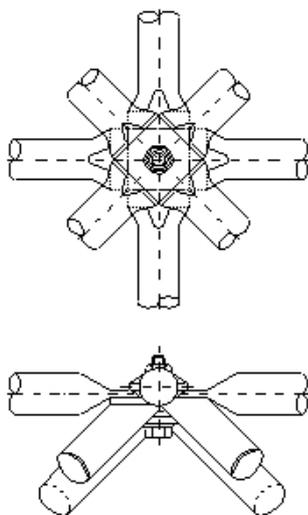


Figura 34 - Nó de “ponta amassada”.

Devido à sua composição geométrica e à natureza dos seus elementos, as treliças espaciais apresentam maior resistência às cargas de ruptura. Suas barras constituintes, que são fabricadas a partir de perfis tubulares, tem excelente comportamento quanto à flambagem local ou por torção. Sua grande rigidez no plano horizontal promove uma otimização no dimensionamento da infraestrutura de suporte, recebendo suas respectivas cargas reativas de modo mais uniforme, o que significa que se pode vencer maiores vãos com menor gasto de materiais.

Uma vez que seus elementos construtivos, a barra e o nó, são bastante simplificados, a fabricação, a montagem e o transporte das treliças espaciais é bastante facilitado, sendo necessário, no campo, apenas o encaixe de parafusos. Além disso, esse sistema estrutural torna mais simples a fixação de qualquer equipamento para instalações em geral, como forros e passarelas. Esse tipo de estrutura é, em geral, mais econômico do que as coberturas convencionais.

No Ginásio Multidisciplinar da Unicamp utilizou-se como sistema estrutural treliças espaciais de formato piramidal. Utilizou-se uma estrutura tubular, uma vez que a mesma permite uma maior facilidade de ligações quando se trata de estrutura espacial. A barra em tubo oferece maior rigidez porque possui o raio de giração igual em todas as direções. Além disso, analisando em termos econômicos, para grandes vãos em duas direções a malha espacial é a de melhor custo-benefício.

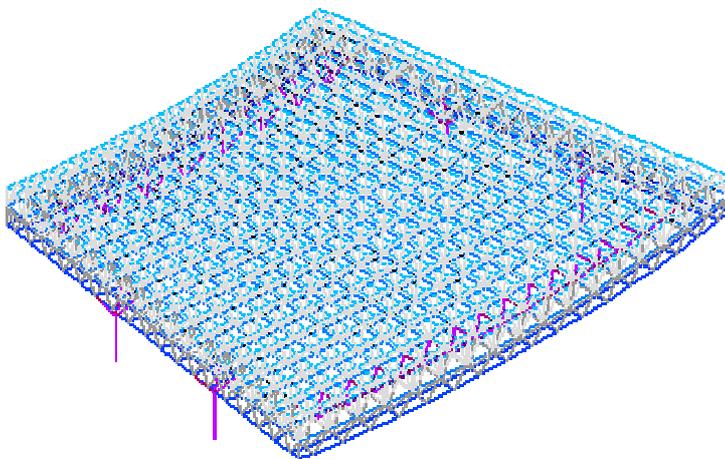


Figura 35 - Esquema tridimensional da cobertura do Ginásio.

Uma das vantagens da utilização da treliça espacial é a de que ela pode cobrir grandes áreas sem a necessidade do uso de pilares. A cobertura do GMU caracteriza-se por apresentar um dos maiores vãos cobertos de treliças da América Latina (86mX76m), o equivalente a 6536m<sup>2</sup> de área.

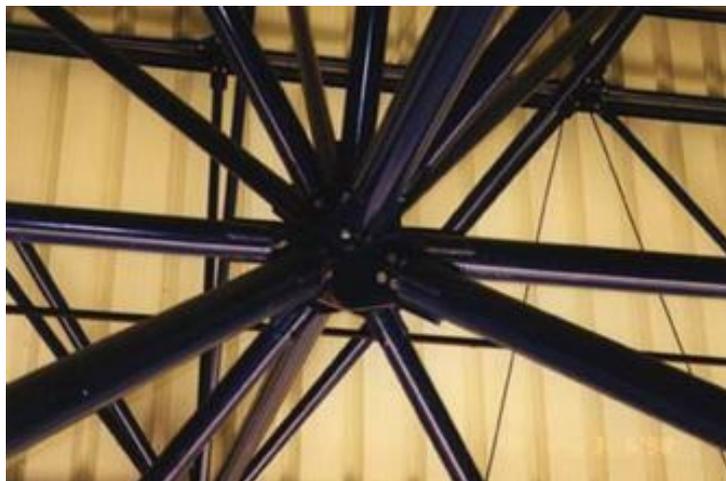


Figura 36 - Detalhe de um dos nós da treliça espacial do ginásio.

A treliça, que possui 1350 nós, encontra-se apoiada em 8 pilares, na parte mais baixa, 15 pilares na parte mais alta e 2 pilares novos em cada lateral do ginásio. De cada apoio saem quatro barras, que são responsáveis pela ligação da cobertura e dos pórticos.

Foram utilizadas no projeto cerca de 4725 barras feitas com o aço As estruturas espaciais em aço são confeccionadas através de perfis conformados a frio utilizando-se aços com boa resistência à corrosão atmosférica (aços patináveis: Usisac, Cosarcor, Cor, etc), podendo, também ser utilizados aços carbonos. No caso do GMU, o aço utilizado foi o USISAC, que é um aço patinável e anti-corrosivo. Os parafusos utilizados são do tipo A 325, caracterizados por sua alta resistência.



Figura 37 - Treliças espaciais de aço do Ginásio.

Também foi verificada a presença de treliças espaciais no IMECC – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. Também feitas de barras de aço e com nós de ponta amassada, as treliças do IMECC se diferem das do Ginásio, apesar de também terem formato piramidal, já que as três faces que compõem cada pirâmide da treliça do IMECC possuem barras que se cruzam em formato de X. Através da comparação das fotografias se torna mais fácil identificar essa diferença.

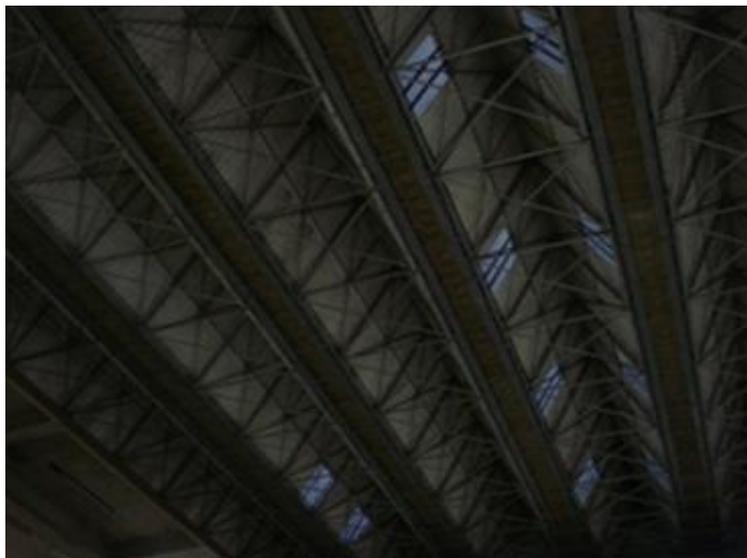


Figura 38 – Treliça Espacial no IMECC.

### 5.1.2.2.3 – Aplicações.

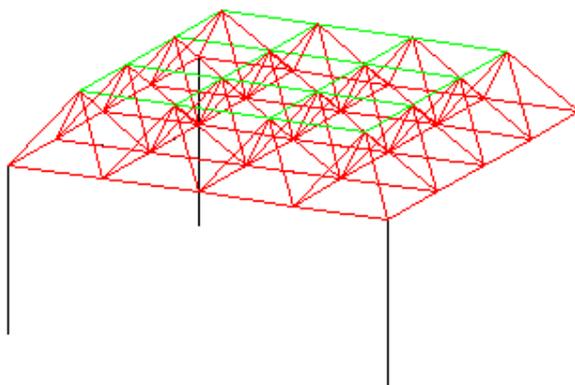


Figura 39 - Exemplo de treliça espacial com malha quadrada dupla. Duas camadas paralelas.

As grandes vantagens da aplicação de treliças espaciais em geral são:

- Possibilita a implantação de grandes vãos livres e apresenta beleza arquitetônica. O que explica o fato da maioria das vezes, optar-se por deixar a estrutura aparente (sem forro);
- Possui relação entre peso próprio e vão livre bastante vantajosa;
- São de fácil montagem, transporte e fabricação;
- Possibilita ampliação e desmontagem relativamente fácil da estrutura;
- Permite a reposição de elementos sem comprometer a estabilidade da estrutura;
- São estruturas de elevado grau de hiperestaticidade (redundância estrutural). Desta forma um eventual dano em qualquer um dos elementos não significará, necessariamente, o colapso de toda a estrutura;
- Possibilita grande flexibilidade aos projetistas, pois permite um vasto leque de opções de pontos de aplicação de apoios para a estrutura (sem necessidade de seguir um padrão de distância entre os apoios).

Muitas obras em estruturas treliçadas de aço ou alumínio são recorrentemente especificadas em vários projetos arquitetônicos. As treliças espaciais (ou planas) são projetadas sob encomenda e são desenvolvidas a partir de estudos específicos de acordo com as exigências de cada edificação, objetivando-se o melhor custo x benefício, em relação a outros sistemas estruturais.

Entre os segmentos que utilizam as estruturas estruturas treliçadas, destacam-se:

- Centros de Convenção;
- Terminais Aeroportuários;
- Terminais de Metrô;
- Terminais Rodoviários;
- Ginásios de Esportes;
- Shopping Centers;
- Hipermercados;
- Centro de Distribuição;
- Indústrias;
- Galpões de lojas de vendas de Automóveis.

#### **5.1.2.3 - Considerações de cálculo**

Nas treliças os nós são considerados, em primeira instância, como articulações. Os nós não transmitem as barras esforços de flexão (treliças com nós ideais).

Entretanto, em muitos casos, na pratica dos projetos atuais, os nós não têm sidos considerados como “rótulas ideais”, por oferecer um certo impedimento ao giro, por tanto, solicitando as barras através de esforços de flexão.

Por outro lado, as barras que constituem a grande maioria das treliças projetadas em obras de pequeno e médio porte, possuem normalmente seção transversal com baixa rigidez à flexão. Além disto, os carregamentos são aplicados aos nós, e não diretamente às barras. Feita estas verificações, conclui-se que a hipótese de nós rotulados, adotada para as treliças, é razoável, pois os esforços de flexão que surgem nas barras são desprezíveis quando comparados aos esforços axiais. Em conseqüência, a flexão não influi no dimensionamento das barras.

Para o caso de estruturas de grande porte (pontes, por exemplo), devido as grandes dimensões das barras os nós acabam por oferecer restrição ao giro que não pode mais ser desconsiderada. Es tais estruturas a hipótese de nó ideal perde total significado e a estrutura deve ser projetada através da consideração de “nós rígidos”.

### 5.1.3 - Grelhas

As grelhas são constituídas por estruturas lineares (vigas), situadas em um mesmo plano, formando uma malha que recebe solicitações não coplanares. As barras se interceptam e trabalham em conjunto para resistir às ações atuantes que são predominantemente perpendiculares ao seu plano.



Figura 40 – Grelha ortogonal constituída de vigas de concreto armado.

Visando a utilização de vigas nos pavimentos de maneira a obter maiores distâncias entre apoios, as mesmas são lançadas em um sistema reticulado plano, denominado grelha. Esse sistema é gerado pelo cruzamento rígido entre as vigas no plano do pavimento. Os reticulados podem ser ortogonais ou diagonais com relação às vigas periféricas e a disposição diagonal apresenta melhor comportamento, porém é de difícil execução. Para que sejam consideradas grelha, quando feita em concreto armado ou protendido, as vigas devem ter espaçamento maior que 1,10 m entre eixos. A grelha é uma estrutura que distribui a carga concentrada, aplicada em uma das vigas, para todos os elementos da estrutura, de tal forma que nenhuma viga trabalhe sozinha quando solicitada.

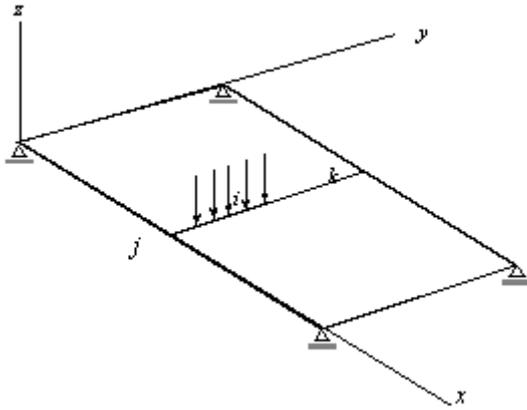


Figura 41 – Esforços numa grelha plana.

As grelhas podem ser feitas em aço, concreto armado ou concreto protendido. Sobre as vigas pode ser criada uma laje de concreto armado maciça, porém lajes pré-moldadas em concreto armado e protendido também são adequadas. Os sistemas de vigas pré-moldadas constituem em ótima solução quando há necessidade de rapidez de execução. A independência do piso com relação à grelha permite a criação de domos, ou então de pisos de vidro, interessantes do ponto de vista arquitetônico.

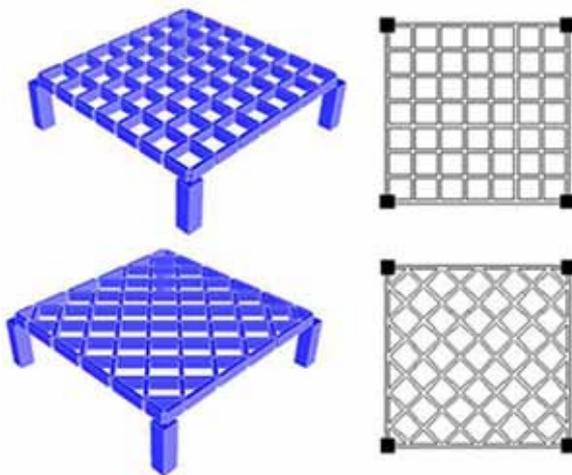


Figura 42 - Grelhas de vigas com disposição ortogonal e diagonal.

Na Unicamp, o sistema estrutural do tipo grelha foi encontrado no prédio do IMECC. Tratava-se de grelhas feitas em concreto e em disposição ortogonal.



Figura 43 – Exemplo de Grelha no IMECC.

### 5.1.3.1 - Comportamento estrutural

Para compreender o comportamento de uma grelha, basta fazermos a comparação entre o comportamento de vigas independentes entre si e de uma grelha simples de vigas ortogonais interligadas.

#### Vigas independentes

Tomemos inicialmente uma plataforma formada por uma série de vigas paralelas e independentes entre si, como mostra a figura abaixo e com uma carga concentrada aplicada em uma das vigas.

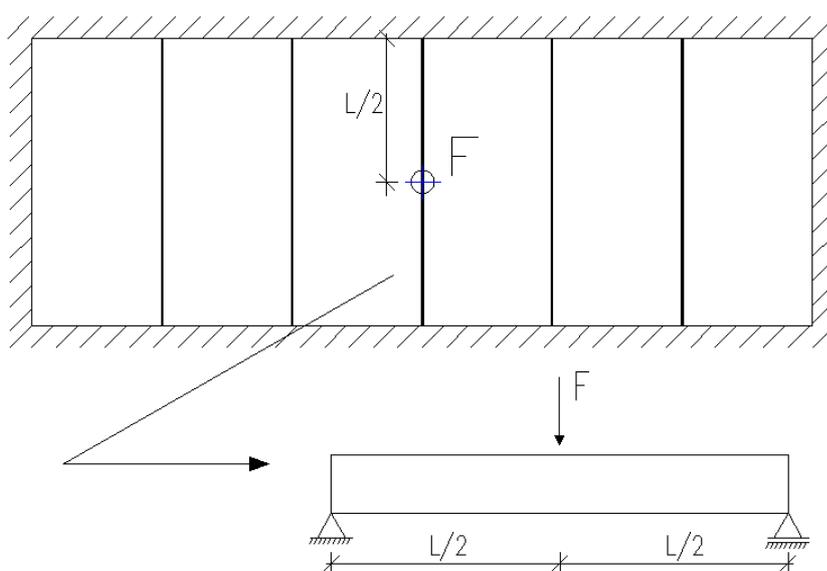


Figura 44 – Sistema de vigas paralelas com vãos de mesmo comprimento.

Da figura acima é notório que cada viga trabalha independentemente das outras, de modo que, quando uma força concentrada  $F$  é aplicada no meio do vão de uma das vigas, conforme ilustrado, esta deverá ser resistente o suficiente para suportar sozinha ao carregamento nela aplicado, transmitindo-o até os apoios.

### **Vigas interligadas**

Uma maneira mais eficiente do que a construção de vigas independentes entre si, pode ser a construção de uma estrutura que distribua a carga concentrada, aplicada em uma das vigas, para todos os elementos da estrutura, de tal forma que nenhuma viga tenha que trabalhar sozinha quando solicitada. O objetivo de adotar-se uma estrutura capaz de distribuir de forma igualitária os esforços para todas as vigas da estrutura, pode ser atingido através do uso de uma grelha, como a da figura a seguir:

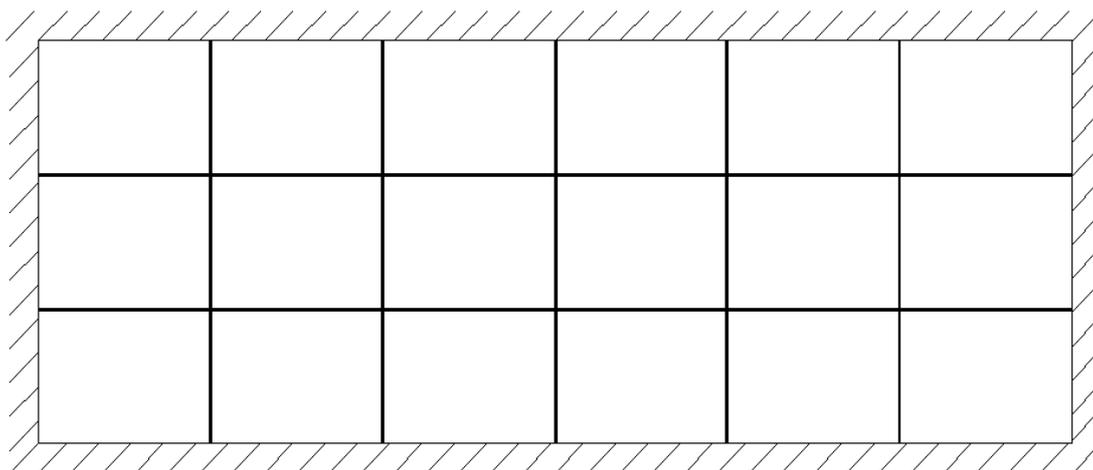


Figura 45 – Sistema de vigas ortogonais interligadas.

É necessário que todas as vigas estejam interligadas nos seus pontos de interseção para que os esforços e a transmissão dos mesmos sejam eficientemente executados para os apoios. Portanto uma grelha consiste de sistemas de vigas (paralelas ou não) que se interceptam. As direções dos sistemas de viga não necessitam ser paralelos aos apoios, como mostra a figura a seguir:



Figura 46 – Grelha oblíqua.

#### **5.1.4 - Pilares**

São basicamente barras retas, com eixo quase sempre disposto verticalmente. Os esforços predominantes nos pilares são forças normais de compressão. Quando possui seção circular os pilares também são chamados de colunas. Constitui um elemento de grande importância na construção civil em virtude de sua grande utilização em praticamente todos os tipos de construções.

Da mesma forma que para as vigas, as seções transversais mais empregadas são a retangular (inclusive a quadrada), do tipo “I” e a circular. A escolha do tipo de seção quando não é restrita pelo projeto arquitetônico, é usualmente definida com a meta de minimizar o consumo de material ou de mão-de-obra envolvida na fabricação.

Em estruturas de concreto armado a opção por seções maciças é justificada pela maior facilidade de execução (execução de formas, lançamento e adensamento do concreto), assim como devido as dimensões dos constituintes do concreto armado, especialmente a armadura e os agregados graúdos.

Pilares constituídos de aço são usualmente construídos em seção de perfis I laminados ou soldados, perfis de caixão soldados, perfis tubulares ou mesmo a partir de seções compostas (associação de dois ou mais perfis). Uma

seção bastante empregada em galpões industriais, por exemplo, são os pilares treliçados, geralmente mais leves que os correspondentes em alma cheia.

Quando o material estrutural utilizado é a madeira, pode-se utilizar postes ou madeira serrada. Pode-se ainda optar pelo uso de bitolas comerciais com seções tipo I, T ou caixão. Existem também as seções que podem ser obtidas com a utilização de madeira laminada colada (MLC) através da colagem de peças de pequenas dimensões.

#### **5.1.4.1 - Comportamento estrutural de pilares**

##### **Pilares submetidos à compressão**

Como já citado anteriormente os pilares são elementos predominantemente comprimidos e, portanto, estão sujeitos a instabilidades local e global. Desta forma, o dimensionamento de pilares não pode ser feito apenas com base na resistência dos materiais envolvidos. Vale lembrar que os conceitos de instabilidade e flambagem são válidos para qualquer barra comprimida e não somente para pilares.

A instabilidade local está associada aos casos de seção transversal delgada (relações largura/espessura elevadas), de tal forma que têm um grau de importância restrito apenas nos projetos de estruturas metálicas.

Por outro lado a instabilidade global está associada ao equilíbrio da barra como um todo e deve ser considerada no projeto de pilares constituídos por material estrutural qualquer.

O estudo da estabilidade elástica pode ser ilustrado com base na análise de uma barra comprimida ideal. Isto é útil para a análise de pilares no estágio elástico de tensão-deformação. O estudo de barras, consideradas elásticas, sujeitas a compressão foi inicialmente estudado por Euler, em 1744, e é conhecido como “caso fundamental” da estabilidade elástica de uma barra comprimida.

Consideremos um pilar sujeito a uma força axial de compressão  $P$ . A base do pilar pode apresentar somente deslocamento de rotação. O topo do pilar pode apresentar deslocamentos de rotação e translação na vertical. O problema de flambagem de pilar consiste em investigar as condições nas quais o pilar apresenta deflexão lateral, como a mostrada abaixo:

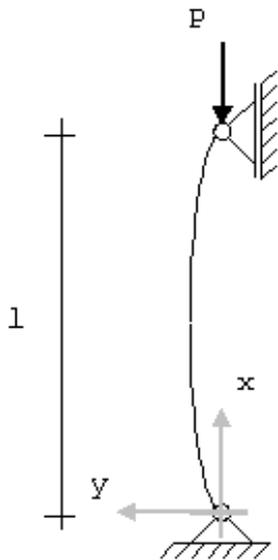


Figura 47 – Equilíbrio de uma barra em posição deslocada por flexão.

A força crítica para ocorrência da flambagem é dada por:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad \text{Equação [1];}$$

Em projetos estruturais sempre busca-se que o valor de  $F_{cr}$  seja o mais alto possível. Na prática o mais interessante é que os valores de  $F_{cr}$  não sejam inferiores ao esforço normal máximo admissível de compressão, calculado em função da tensão normal de compressão máxima admissível, que depende do material constituinte do pilar e das características geométricas da seção do mesmo.

Para diminuir os riscos de flambagem em pilares é comum a construção de contraventamentos, como na estrutura abaixo:



Figura 48 - Estrutura em concreto armado.

Na estrutura da figura acima é notória a presença de vigas que interconectam os pilares e funcionam como contraventamentos para estes. Desta forma o pilar é dividido em diversos trechos, relativo à análise de

flambagem, de tal forma que os comprimentos de flambagem são consideravelmente reduzidos. Tal fato implica na redução do índice de esbeltez de cada pilar e em cada trecho, o que acarreta em uma excelente solução para vencer o risco indesejável da flambagem nos pilares.

Observa-se ainda que a posição dos contraventamentos está concordante com a direção em que há “preferência” à ocorrência da flambagem, isto é, está colocado na posição tal que os eixos das vigas (contraventamentos) estão perpendiculares aos eixos de menor inércia da seção dos pilares (retangular).

É importante ressaltar que na prática a posição dos contraventamentos não deve ser simplesmente decidida com base em critérios estruturais. Uma análise do quanto à funcionalidade da construção pode ser afetada deve ser analisada. Por isto é bastante comum verificar a ocorrência, nas edificações, de contraventamentos posicionados nas estruturas exatamente na altura dos pavimentos onde a própria estrutura montada para as lajes é aproveitada como apoio para as colunas.

### **Pilares submetidos à flexo-compressão**

Em muitas estruturas, os efeitos de flexão no pilares são tão relevantes quanto os efeitos da compressão. Por exemplo, em pilares de edifícios, pilares de reservatórios, etc. Nesses casos, fica bastante claro que o pilar deve ser dimensionado de acordo com a flexão composta.

A consideração de forças em uma barra que geram simultaneamente solicitações de compressão e de flexão, é de grande importância para o dimensionamento de barras metálicas, de madeira ou em concreto armado.

Desconsiderando-se a princípio a possibilidade de perda de estabilidade, a máxima tensão normal na barra pode ser determinada através da superposição dos efeitos do momento fletor e da força normal, conforme mostra a figura abaixo.

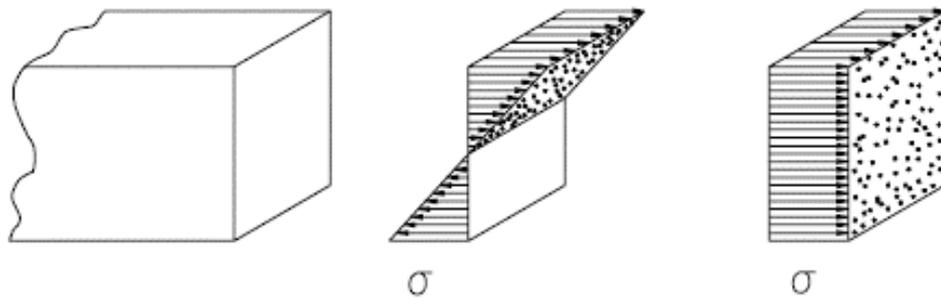


Figura 49 - Tensões normais na flexão composta.

### 5.1.5 - Pórticos

Pórticos planos são estruturas lineares planas com solicitações coplanares. Podemos generalizar os pórticos planos para pórticos espaciais, cujas barras se dispõem em planos diversos.

Na figura 1 está ilustrado o sistema estrutural do tipo pórtico composto que é formado pela composição de vários pórticos simples. As cargas que um pórtico plano recebe, são consideradas co-planares ao pórtico.

Os pórticos, em conjunto com os elementos secundários, formam o esqueleto resistente do sistema construtivo, onde são fixados os elementos de cobertura e vedação lateral.

Os Pórticos são estruturas formadas por barras, formando quadros entre si. Existem quatro tipos fundamentais de quadros isostáticos planos, que associados entre si formam os chamados quadros compostos. Os elementos pré-fabricados de concreto com sistema estrutural de pórticos são altamente aplicáveis por apresentar boa funcionalidade e competitividade econômica.

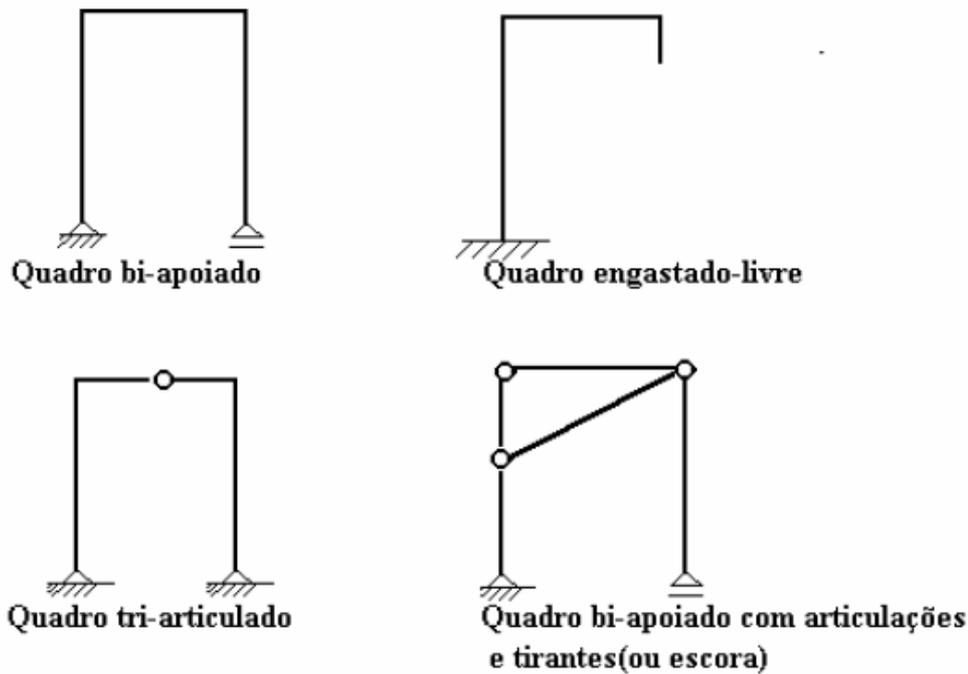


Figura 50 – Exemplos de pórticos mais comuns.

No caso de pórticos metálicos a inclinação da cobertura influencia significativamente no comportamento do mesmo, já que as inclinações menores favorecem um telhado mais plano, ideal para grandes áreas sem calhas, mas reduzem a eficiência do pórtico, exigindo seções maiores para as colunas e vigas. Já as inclinações maiores, favorecem o comportamento dos pórticos, mas podem exigir um maior número de calhas. As bases podem ser rotuladas, mais convenientes para as fundações, ou engastadas, favorecendo a rigidez e a estabilidade da estrutura. Tal opção deve ser feita de forma a obter a melhor solução para o conjunto da edificação. Os tipos de pórticos metálicos mais comuns são os seguintes

#### 5.1.5.1 – Pórticos simples de alma cheia

São estruturas simples e simétricas com vão livre entre 15 e 45 metros e altura entre 5 e 12 metros. A inclinação média varia entre 5 e 20 graus.

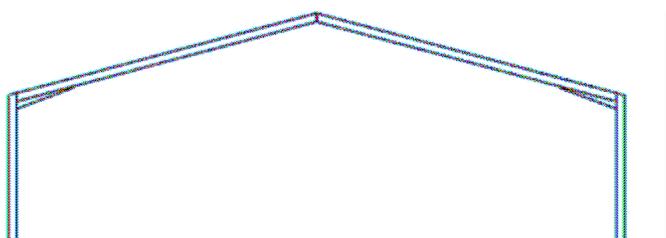


Figura 51 – Pórtico simples de alma cheia.

### 5.1.5.2 - Pórtico com cobertura em arco

Os pórticos com cobertura em arco são utilizados principalmente em função de necessidades arquitetônicas. Para vãos grandes são necessárias ligações nas vigas, que devem ser cuidadosamente detalhadas.

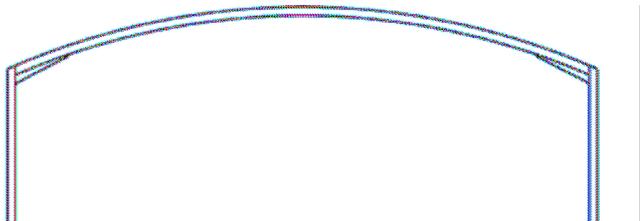


Figura 52 – Pórtico em arco.

### 5.1.5.3 - Pórtico com tirantes

Com a colocação de tirantes, consegue-se reduzir os deslocamentos horizontais e os momentos nas colunas. Esses pórticos são indicados para inclinações maiores que  $15^\circ$ .

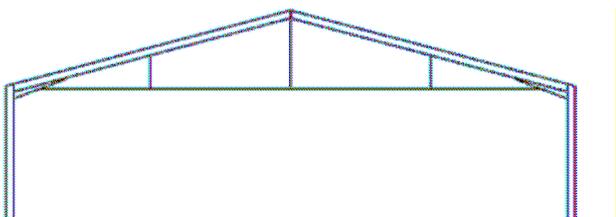


Figura 53 – Pórtico com tirantes.

Na Unicamp, um exemplo de pórtico foi encontrado no prédio que está em construção em frente ao CEL – Centro de Estudos de Linguagem. Trata-se de vários pórticos bi-apoiados retangulares feitos em concreto armado, cuja construção ainda está sendo concluída.



Figura 54 – Exemplo de pórtico no campus da Unicamp.

#### **5.1.5.4 - Consideração da rigidez das ligações na análise estrutural de pórticos**

Através da decomposição do pórtico pelos nós, tem-se elementos retos (vigas e pilares). A união destes elementos normalmente é considerada na forma de ligações perfeitamente rígidas ou de ligações perfeitamente articuladas. Entretanto, as ligações entre elementos pré-moldados de concreto se comportam, normalmente, de um modo mais realista, como sendo ligações deformáveis. Segundo Soares<sup>1</sup> e Hanaí<sup>2</sup> a consideração da deformabilidade das ligações é muito importante para que a análise estrutural esteja o mais próximo possível do comportamento real da estrutura. Os mesmos autores defendem estudos mais intensivos e aprofundados a respeito das ligações entre elementos pré-moldados, pois com o crescimento vertiginoso da utilização de tais estruturas, cresce também a responsabilidade dos fabricantes, construtoras, e principalmente dos projetistas que devem considerar a parcialidade da rigidez das ligações entre os elementos pré-moldados durante o cálculo estrutural.

#### **5.1.5.5 - Relevância econômica**

Os elementos pré-fabricados de concreto, com sistema estrutural de pórticos, têm sua ampla aplicabilidade, atualmente, por apresentar muito boa funcionalidade e competitividade econômica, que podem ser considerados alguns dos fatores que justificam a implantação destes elementos nas edificações.

#### **5.1.6 - Arcos**

Constituem-se de barras curvas. Os esforços solicitantes principais são as forças normais de compressão que podem agir simultaneamente ou não com momentos fletores.

De maneira simples, os arcos representam barras em formato curvo, onde a parte central é mais alta do que as extremidades. A forma da curva que define o arco é função do tipo de material a ser utilizado, da disponibilidade do

---

1

Anamaria Malachini Miotto Soares, Engenharia de Estruturas, EESC-USP;

2

Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP

mesmo e dos esforços atuantes na estrutura. Os materiais mais utilizados atualmente na construção de arcos são o aço e o concreto protendido, já que oferecem maiores possibilidades para que se utilizem arcos com maiores vãos e também mais agradáveis esteticamente.

Em geral, os arcos estão submetidos à esforços de compressão, porém podem existir carregamentos que não correspondam ao perfil definido para o arco, ou seja, carregamentos que não causem somente esforços de compressão. Este tipo de carregamento, que faz com que surjam força cortante e momento fletor é chamado de carregamento não balanceado, que deve ser também suportado pelo arco. Quanto mais alto o arco, maior o vão, maior o peso e maiores serão as reações de apoio.

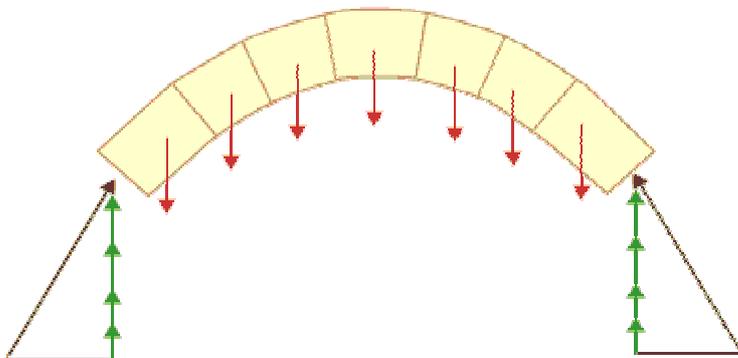


Figura 55 – Exemplo de esforços atuando em um arco.

#### 5.1.6.1 - Classificação dos arcos

Relativo à forma, os arcos podem ser classificados em parabólicos e circulares (mais utilizadas), podem ter também formas elípticas ou catenária. Quanto à estabilidade podem ser classificados em isostáticos ou hiperestáticos.

Os arcos isostáticos possuem dois apoios fixos com uma articulação (rótula) entre os apoios (arcos triarticulados).

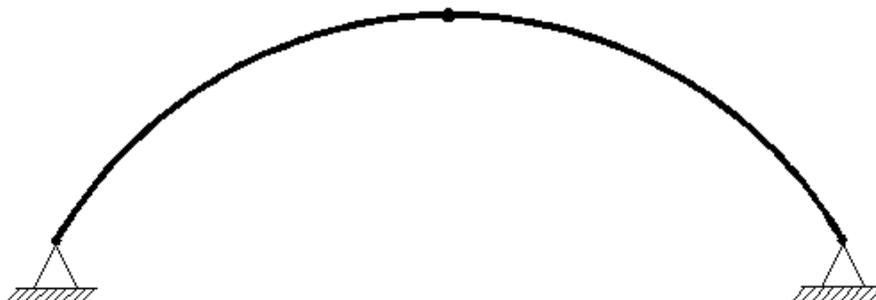


Figura 56 – Arco isostático.

Os arcos hiperestáticos podem ser:

Biengastado: é vinculado com engastes nas extremidades e é três vezes hiperestático.



Figura 57 – Arco biengastado (3 vezes hiperestático).

Biarticulado: É vinculado com apoios fixos nas extremidades, e é uma vez hiperestático.

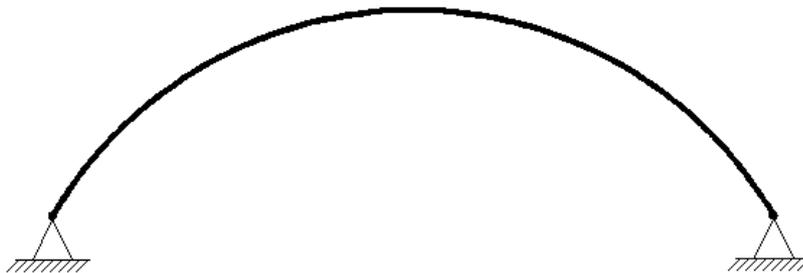


Figura 58 – Arco biarticulado (1 vez hiperestático).

Atirantado: possui um apoio fixo e um apoio móvel, conectados por uma barra tracionada denominada tirante. O arco atirantado é uma vez hiperestático.

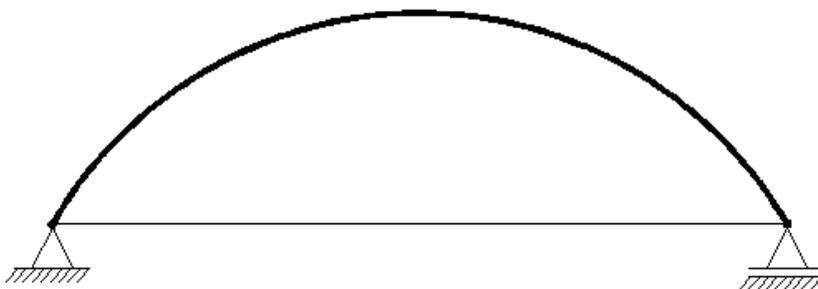


Figura 59 – Arco atirantado (1 vez hiperestático).

Com uma articulação: biengastado com uma articulação intermediária.



Figura 60 – Arco com uma articulação.

### 5.1.6.2 - Vantagens e desvantagens dos arcos

Em geral os arcos hiperestáticos são mais econômicos que os arcos isostáticos, porém os esforços solicitantes dos arcos hiperestáticos são bastante sensíveis a recalques de apoio e à variação de temperatura, podendo sofrer alterações significativas.

Dentre os arcos hiperestáticos o mais econômico é o engastado. Entretanto os arcos engastados são aconselháveis quando não são previstos recalques de apoios. Quando há recalques de apoio os arcos triarticulados ou atirantados são os recomendáveis. A presença de recalques de apoio provocam podem provocar grandes alterações na distribuição dos esforços interno ao longo da estrutura do arco.

Quando são previstos pequenos recalques é aconselhável o emprego de arcos biarticulados ou atirantados.

O arco atirantado é bastante empregado devido ao fato de possuir as vantagens das estruturas isostáticas e hiperestáticas simultaneamente, pois comporta-se como uma estrutura hiperestática internamente, e apresenta um comportamento similar ao de estruturas isostáticas em relação aos recalques de apoio.

A escolha entre arco atirantado e triarticulado, normalmente é atribuída a opção de ocorrer ou não a presença de vão livre.



Figura 61 – Arco treliçado atirantado.

Na Unicamp, uma estrutura em arco foi encontrada no prédio do Instituto de Química – IQ. Trata-se de um arco parabólico, atirantado e com um apoio fixo e outro móvel, conforme a figura acima, porém diferenciando-se pela altura do tirante. Nota-se que o arco está apoiado em pilares de bloco de concreto, que tem função estrutural.



Figura 62 – Arco parabólico biapoiado.

Os arcos com uma articulação não são utilizados nas construções por possuírem as desvantagens dos arcos isostáticos e hiperestáticos.

### 5.1.6.3 - Seções transversais mais comuns

Para arcos construídos em concreto armado normalmente são empregadas seções maciças de forma retangular (devido a necessidades construtivas).

No caso de arcos construídos em madeira, estes podem ser treliçados ou ter seções transversais retangulares (que podem ser formadas por diversas lâminas superpostas e coladas), sendo que as laminas já são coladas com a curvatura final que se deseja. Outra possibilidade também é a seção caixão ou I.

Em arcos de estruturas de aço são usualmente treliçados. Arco treliçado facilita a fabricação e minimiza o peso próprio, o que implica em maior economia, tanto em materiais como em fundações e demais elementos de apoio.

### 5.1.6.4 - Estabilidade dos arcos

Os arcos são elementos que são predominantemente solicitados por esforços de compressão, e portanto, podem apresentar problemas de instabilidade global ou local.

A instabilidade pode ocorrer quando um dos elementos dos arcos treliçados (banzos, diagonais e montantes) atinge a força crítica de compressão. Com o intuito de eliminar a possibilidade de ocorrência de flambagem, pode-se promover a substituição do perfil por um outro de maior resistência, ou então diminuir a distância entre os travamentos, que por sua vez provoca o aumento do número de diagonais e montantes, devido o menor espaçamento entre estes. Entretanto, tais soluções incorrem no aumento do consumo de material. A escolha por uma ou outra solução implica na consideração de parâmetros que busquem a “estrutura ideal”, ou seja, aquela que resista a todas as solicitações a que será submetida com o menor consumo de material possível (solução mais econômica).

Por sua vez a instabilidade global pode ocorrer por flambagem fora do plano ou no plano de curvatura do arco. Como ilustrado abaixo.

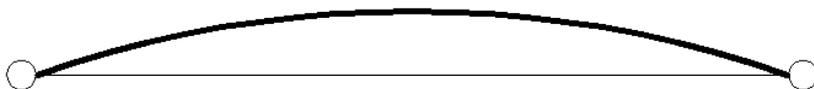


Figura 63 – Situação de flambagem de arco fora do seu plano (vista em planta).



Figura 64 – Situação de flambagem de arco no seu plano.

Como solução para que se mantenha a estabilidade de arcos fora do plano podem ser utilizados sistemas de “contraventamentos”, que podem ser constituídos de barras rígidas ou sistemas treliçados que interligam os arcos, solução esta bastante recorrente em estruturas de pontes pênses em arco.

### **5.1.7 - Estruturas pênses**

São estruturas lineares. Seus elementos principais são formados por cabos. Segue abaixo definições a respeito de cabos:

Fio: barra que somente resiste a solicitações de tração ao longo de seu eixo;

Cabo: conjunto de fios;

Rede: estrutura linear não plana, cujos cabos estão dispostos de tal forma que seus eixos estejam em uma mesma superfície do plano.

#### **5.1.7.1 – Aplicações**

As estruturas pênses podem ser aplicadas, principalmente, em coberturas (e.g.: tendas, estádios, ginásios) e em pontes pênses ou estaiadas.

Nas referidas estruturas, os cabos são dispostos de tal forma a serem solicitados predominantemente por esforços de tração. Há estruturas em que os cabos constituem o sistema estrutural principal exercendo, portanto, a função de sustentar a maior parte dos carregamentos permanentes de toda a estrutura.

Por outro lado, há estruturas em que ocorre a aplicação de cabos tracionados apenas com a finalidade de contribuir através do direcionamento de parte dos esforços da estrutura para os mesmos.

No caso de pontes e passarelas são utilizados basicamente dois tipos de sistemas estruturais com cabos: estaiados e pênséis. Abaixo são ilustrados algumas pontes que utilizam estruturas em cabos:

A ponte Akashi Kaikyo é atualmente a maior ponte suspensa do mundo, com 3922 m de comprimento e o recorde de 1991m de vão central. Construída em 1998, esta ponte liga as cidades de Kobe e Awaji Island no Japão (segundo [www.matsuo-bridge.co.jp](http://www.matsuo-bridge.co.jp)).



Figura 65 - Ponte Akashi Kaikyo: Ponte pênsil com tirantes verticais e tabuleiro com estrutura treliçada.

No Estreito de Messina, Itália, está projetada uma ponte suspensa com 5010m de comprimento e o maior vão livre com 3300m. Esta ponte faz a ligação entre a Sicília e Calábria.



Figura 66 - Ponte de messina: Ponte pênsil com tirantes verticais.

Na Foto abaixo vê-se a Ponte da Normandia construída na França em 1995. Ela é uma ponte estaiada com vão central de 856m, que é o segundo maior vão em pontes estaiadas.



Figura 67 - Ponte da Normandia: Ponte estaiada com duas torres. ([www.matsuo-bridge.co.jp](http://www.matsuo-bridge.co.jp)).

## 5.2 - Elementos estruturais de superfície

As estruturas de superfície ou laminares são definidas quando possuem superfície média e lei de variação da sua espessura conhecidas. Dentre as estruturas de superfície destacam-se as placas, as chapas e as cascas.

As cascas são principalmente empregadas em coberturas de grandes vãos e reservatórios. As placas (lajes) são aplicadas em pisos de edifícios e tabuleiros de pontes. O estudo das estruturas laminares são realizados pela Teoria das Placas, Teoria das Chapas e Teoria das Cascas, que são resultantes de simplificações convenientes e adequadas da Teoria da Elasticidade.

### 5.2.1 - Laje

Lajes são placas de concreto armado, normalmente horizontais e, nas estruturas dos edifícios, responsáveis por receber as ações verticais permanentes ou acidentais, atuantes nas estruturas dos pavimentos e das coberturas. Elas podem ser maciças ou nervuradas, moldadas no local ou pré-fabricadas ou ainda podem ser parcialmente pré-fabricadas. As lajes maciças

são aquelas que ao longo de toda a superfície a espessura é mantida constante. Nas lajes nervuradas essa espessura é descontínua.

As lajes concretadas no local, conhecidas como lajes maciças de concreto armado, devem ser projetadas por um profissional habilitado, que também orientará e acompanhará a sua execução. Já as lajes pré-moldadas são constituídas por vigas ou vigotas de concreto e blocos conhecidos como lajotas ou tabelas. As lajotas e as vigotas montadas de modo intercalado formam a laje e o conjunto é unido com uma camada de concreto, chamada de capa, colocada sobre as peças. As lajes pré-moldadas comuns podem ser usadas em vãos de até 5m entre os apoios.

Há um outro tipo de vigota, chamada vigota treliçada, onde são usados vergalhões soldados entre si formando uma treliça. Essa laje pode vencer vãos de até 12m entre apoios. A execução das lajes pré-moldadas é muito rápida e fácil, mas o fabricante deve fornecer o projeto completo da laje, incluindo as instruções de montagem, a espessura da capa de concreto e todos os demais cuidados necessários.

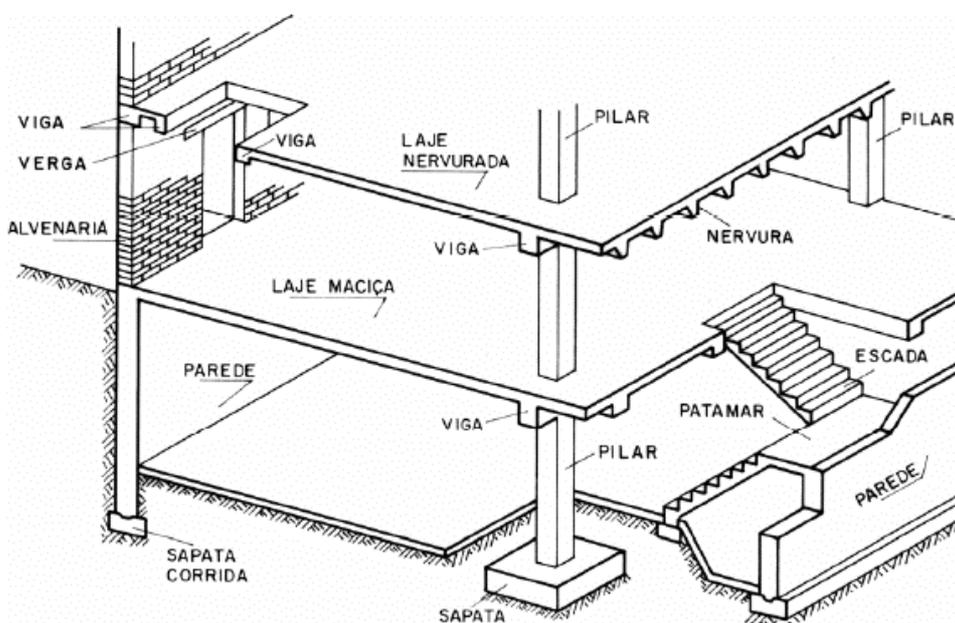


Figura 68 – Esquema representativo dos diversos tipos de lajes.

### 5.2.1.1 – Tipos de lajes

#### Pré-fabricada de isopor

- vantagens: leveza, rapidez na montagem e facilidade na instalação de cano, além do baixo custo;
- desvantagens: não é possível fazer furos na parte inferior, é preciso passar cola especial na face aparente do isopor para que o acabamento (chapisco ou gesso) possa aderir ao material.

#### Pré-fabricada de lajotas cerâmicas

- vantagens: é o sistema mais barato para lajes finas que cubram pequenos vãos;
- desvantagens: frágeis, as lajotas podem quebrar-se no transporte, na colocação e na concretagem.

#### Pré-fabricada de painéis treliçados

- vantagens: dá resistência à peça e facilita seu transporte, além de que sua colocação dispensa encaixes e acabamentos na parte inferior e exige uso menor de madeira para escoramento;
- desvantagens: custa, em média, 30% a mais que os demais sistemas pré-fabricados.

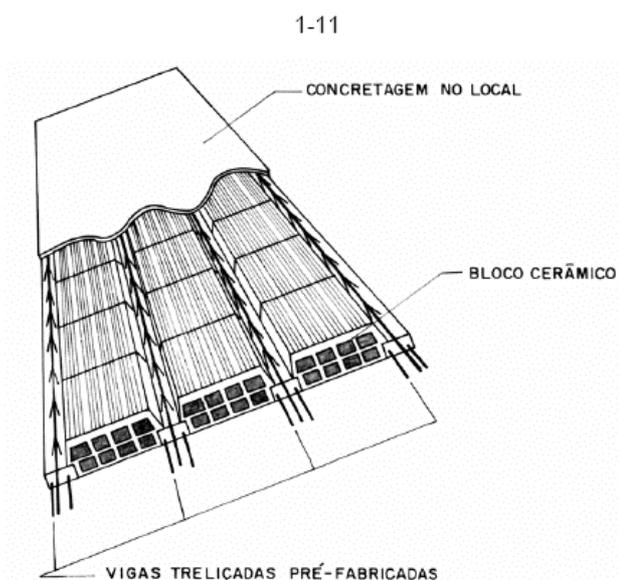


Figura 69 – Exemplo de laje treliçada.

## Maciça ou moldada na obra

- vantagens: menos suscetível a fissuras e trincas (depois de seco, o concreto torna-se um monobloco que dilata e contrai de maneira uniforme);
- desvantagens: gasto maior de madeira para a base e escoramento; é a mais pesada e em geral a mais cara.

As lajes utilizadas no prédio da FEC foram pré-fabricadas, do tipo treliça. Entre elas colocaram-se materiais intermediários, como por exemplo o isopor (EPS) para revestimento. As lajes treliça são aquelas em que a viga pré-fabricada é constituída por uma armadura em forma de treliça, que é posteriormente concretada. Nesse caso particular, utilizou-se uma armadura treliçada, variando de 7,0 a 25cm de altura com a mesa inferior concretada com 3cm de espessura e de 12 a 13cm de largura. Após a Laje, foi feita uma Capa de Concreto de 5 cm de espessura.

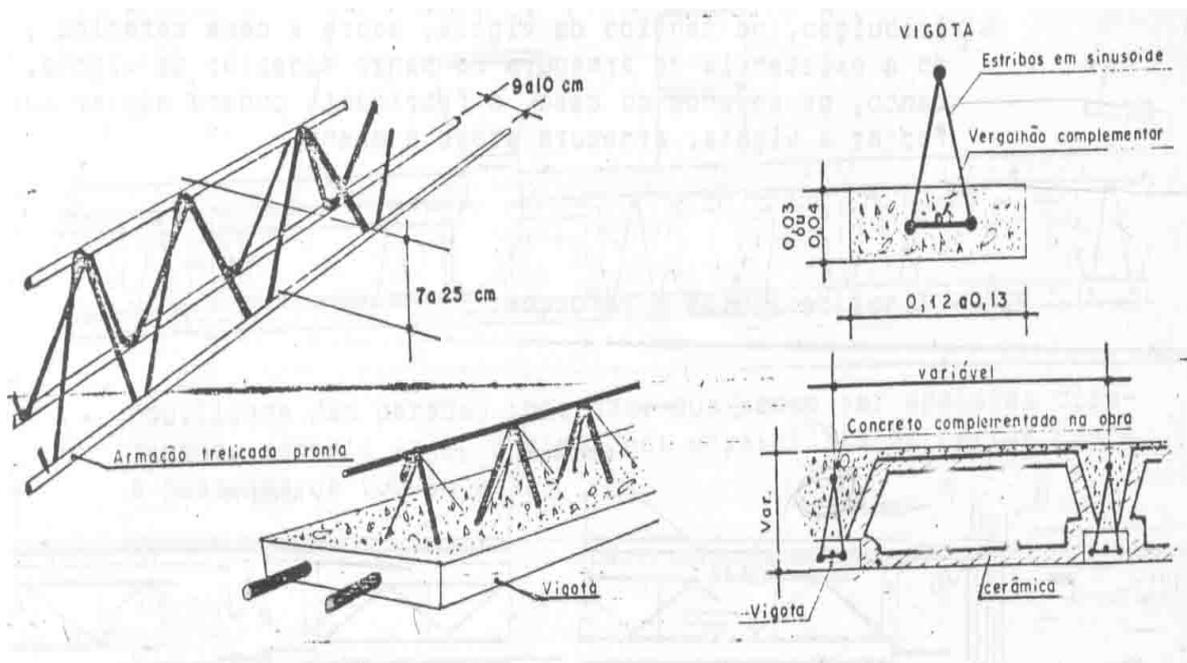


Figura 70 – Croqui para a confecção da laje.

Na colocação da laje, a vigota pré-fabricada deverá estar centrada no vão de modo que a superfície de contato do concreto seja a mesma para cada apoio. A viga é, então, colocada de maneira igualmente espaçada. Após, todas as intermediárias são colocadas entre as vigotas pré-fabricadas., que devem

estar sempre apoiadas pelo concreto, visto que os ferros não tem rigidez suficiente para tal.

Na figura 30 tem-se uma estrutura constituída por uma laje maciça, ou seja, feita em concreto armado e apoiada diretamente sobre os pilares, sem a presença de vigas.



Figura 71 - Laje cogumelo – Canteiro de obra da futura Paróquia São Jerônimo.

A laje é suportada diretamente pelos pilares e por este motivo recebe a denominação especial de laje cogumelo.

#### **5.2.1.2 - Carregamentos**

As cargas atuantes sobre a estrutura da laje curva da figura 70, supostas perpendiculares à laje, ocorrem devido ao peso dos elementos da cobertura, paredes e parte da estrutura (pilares, vigas, etc) imediatamente acima da mesma, além é claro do peso próprio da laje, que por se tratar de uma laje maciça de concreto armado possui um peso relativamente alto em relação aos demais tipos de lajes mais aplicados na construção civil.

Os carregamentos transitórios de construção também são atuantes durante esta etapa de construção da obra em questão. Como exemplo temos a passagem de operários, a presença de materiais de construção sobre a laje (vide os blocos de alvenaria sobre a laje), etc.

Após o termino da obra e durante a utilização da edificação, tem-se ainda a atuação de carregamento variável devido a presença de móveis e

transeuntes pela estrutura da laje. Tais carregamentos sempre devem ser considerados e aconselhadamente superestimados durante a etapa de execução do projeto estrutural.

### **5.2.1.3 - Considerações projetivas importantes**

O projeto estrutural das lajes é realizado baseado na Teoria das Placas. Devem ser avaliados criteriosamente:

- o dimensionamento à flexão simples: sob a condição mais desfavorável das ações, o concreto simples e a armadura devem ser solicitados com a máxima tensão permitida, e as suas deformações não podem ultrapassar certos limites máximos estabelecidos por norma;
- o dimensionamento aos esforços cortantes: os esforços cortantes são provocados pelas cargas verticais que atuam sobre a laje. Nesse dimensionamento deve-se verificar se a altura da laje exigida para combater os esforços de flexão é suficiente para dispensar a armadura transversal (que suporta os esforços cortantes);
- o estado de deformação: verifica-se se há a possibilidade da laje atingir um estado de deformação excessiva. Leva-se em conta para isso a deformação elástica inicial, a retração e a deformação lenta.

Ainda, as prescrições das normas brasileiras, e mais especificamente da norma NBR-6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado, devem ser atendidas.

Os tipos de laje mais comuns usados nas construções são as lajes maciças, as lajes cogumelos, as lajes nervuradas e as lajes mistas.

### **5.2.1.4 - Vantagens e desvantagens da laje cogumelo**

Algumas das vantagens em relação às lajes apoiadas sobre vigas e pilares são as seguintes:

- adaptabilidade a diversas formas ambientais;
- simplificação das formas;
- simplificação das armaduras;
- simplificação da concretagem;
- redução da altura total do edifício;
- redução do tempo de execução.

As principais desvantagens desse sistema estrutural são:

- punção das lajes;
- deslocamentos transversais das lajes;
- instabilidade global do edifício.

### 5.2.2 - Flexão nas placas: analogia com a flexão de vigas.

Pode-se dizer que o maior problema desse tipo de estrutura (laje cogumelo em especial) seja a pequena rigidez que o mesmo possui, o que pode comprometer a sua utilização em certas situações, como por exemplo em edifícios situados em regiões bastante sujeitas a ventos fortes ou até mesmo a catástrofes naturais de maior poder destrutivo.

Em relação à flexão, o ponto mais crítico de uma laje, torna-se a região central. Tal fenômeno pode ser explicado a partir da seguinte comparação:

Tomando uma faixa central de uma placa (laje) com duas bordas apoiadas, de largura unitária e uniformemente carregada, como se fosse uma viga, chega-se a conclusão de que a região mais deformada e crítica de uma viga (tensões normais mais elevadas) é a região central, uma vez que para a viga apresentada a maior flecha e máximo valor da tensão normal ocorre no meio do vão.

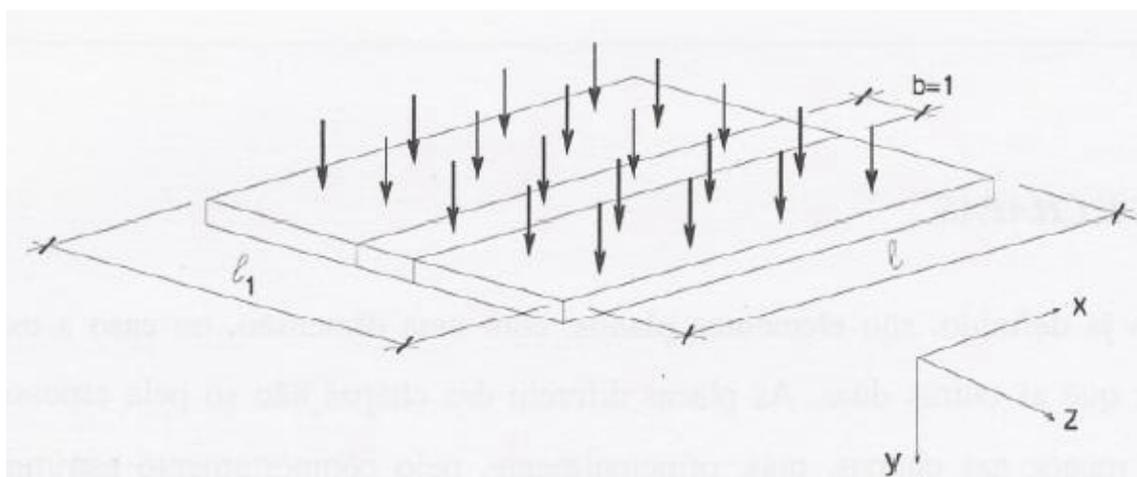


Figura 72 - Analogia da flexão de placa com a flexão de viga.

Pode-se verificar ainda que, devido à continuidade, a seção da faixa unitária não pode sofrer a distorção que é observada na seção da viga em flexão, implicando em deformações nulas na direção z (figura abaixo) e, por tanto, possibilitando o surgimento de tensões normais na direção z (que para o caso de vigas possui magnitude desprezível em comparação com as intensidades das demais tensões que ocorrem).

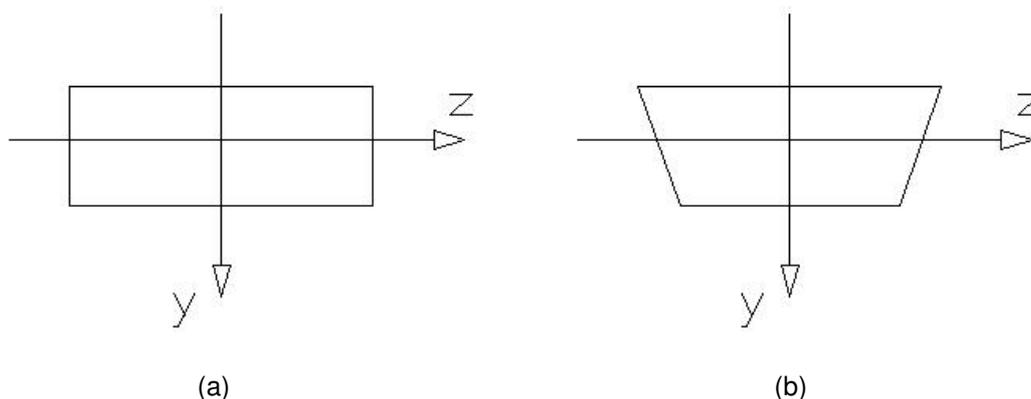


Figura 73 - (a) – viga distorcida; (b) – faixa da placa: não ocorre distorção.

Portanto para o caso de placas devem ser consideradas as tensões normais atuantes em seu plano (duas tensões normais), além da tensão de cisalhamento.

### 5.2.3 – Tabuleiro



Figura 74 – Superestrutura e tabuleiro de viaduto.

A estrutura da figura acima possui como principal sistema estrutural o tabuleiro da ponte que é constituído basicamente por laje em concreto armado. Observa-se ainda a ocorrência de vigas transversais para aumentar a rigidez à flexão da placa do tabuleiro (o que teoricamente não seria necessário caso a estrutura da laje fosse em concreto protendido).

É importante observar que caso a estrutura do tabuleiro fosse confeccionada em concreto protendido o vão livre poderia ser bem mais amplo. No entanto a escolha pela implantação de apoios intermediários pode ser

justificada por opções econômicas. Ademais a diminuição do vão central, devido a implementação de apoios intermediários, não acarretou em diminuição da pista de tráfego, pois estes situam-se em regiões fora da pista.

#### **5.2.3.1 - Carregamentos**

Os carregamentos em estruturas de pontes são constituídos de cargas permanentes, variáveis e excepcionais. Tão importante quanto o valor dos carregamentos é o momento e a ordem que os carregamentos atuam, principalmente nas pontes efetuadas em concreto protendido e nas em vigas pré-fabricadas e pré-moldadas em que ocorrem mudanças nas características da seção transversal.

Os carregamentos permanentes são aqueles que possuem valores constantes durante toda a vida útil da obra, compreendendo o peso próprio da estrutura: laje, transversinas, pavimentação, guarda-rodas, guarda-corpo. As ações variáveis são as que apresentam variações significativas em sua magnitude durante a vida útil da estrutura: as devidas à frenagem e à aceleração, à força centrífuga, ao vento, à variação de temperatura, e às cargas móveis. As ações excepcionais são aquelas com pouca probabilidade de ocorrer e com pouca duração, mas que devem ser levadas em consideração em função dos efeitos nocivos que elas provocam ao longo da vida útil da estrutura. Entre elas estão os choques de veículos nos pilares de viadutos em centros urbanos, esforços provenientes de abalos sísmicos, choque de veículos no guarda-rodas, choques provenientes de choques de navios nos pilares das pontes.

#### **5.2.4 - Cascas**

Na maioria dos casos as superfícies geometricamente definidas utilizadas nas estruturas em casca, são geradas basicamente por rotação ou através da translação de uma curva.

Quando ocorre o giro de uma curva, matematicamente conhecida, em torno de um eixo de rotação, a superfície é dita de revolução.

Cascas são estruturas de delgadas de superfície, não planas, que recebem cargas distribuídas e reagem através de esforços solicitantes de tração e compressão. Quando a espessura da casca é pequena, comparando-se com as outras dimensões, a rigidez a momento fletor é muito pequena, sendo considerada zero. Nesses casos as cascas podem ser estudadas pela

teoria da membrana, ou seja, as cargas externas serão absorvidas através de esforços solicitantes normais de compressão e tração. As estruturas em casca mais comuns são as cilíndricas e as esféricas.



Figura 75 – Casca cilíndrica da casa do lago.



Figura 76 – Detalhe da casca cilíndrica da casa do lago.



Figura 77 - Casca cilíndrica

A estrutura da figura acima é uma casca cilíndrica. Possui curvatura gaussiana nula pois um dos raios de curvatura tende ao infinito (i.e.: curvatura tende a zero) e o outro positivo. Portanto trata-se de uma superfície em casca desenvolvível.

#### 5.2.4.1 - Influência da curvatura no comportamento estrutural da casca

O tipo de curvatura que uma estrutura em casca apresenta é de extrema relevância na capacidade resistente da casca. A teoria de membrana para superfície de revolução fornece a seguinte expressão:

$$N_1/R_1 + N_2/R_2 = P \quad \text{Equação [2];}$$

Onde  $N_1$  e  $N_2$  são os esforços de superfície e  $P$  a força externa aplicada radialmente.

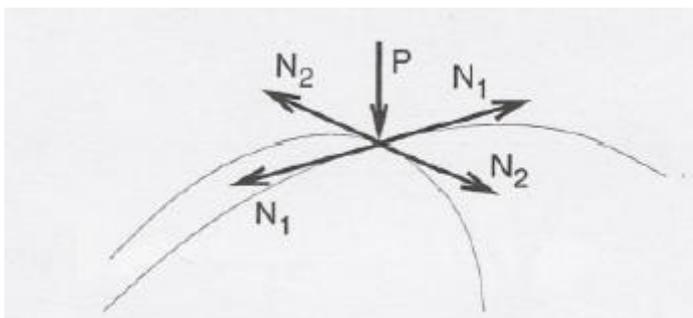


Figura 78 - Esforços de superfície em uma casca devido a carga concentrada.

Caso um índice de curvatura seja nulo, a absorção das forças será menos eficiente que nas cascas de dupla curvatura. Isto pode ser visualizado facilmente, pois se uma das curvaturas,  $1/R_1$  ou  $1/R_2$ , for nula a distribuição da força radial externa será mais restrita.

Assim conclui-se que a capacidade resistente de uma casca de índice de curvatura nulo é menor que a da casca de dupla curvatura, fato este que leva a conclusão de que as cascas de curvatura dupla são estruturalmente mais eficientes que as cascas de curvatura simples (como ocorre nas cascas cilíndricas.).

#### 5.2.4.2 - Expressividade arquitetônica

Além do excelente comportamento estrutural que apresenta, um outro fator que pode ser considerado determinante na escolha e implementação de sistemas estruturais em cascas diz respeito a sua grande imponência arquitetônica.

Tal expressividade pode ser atribuída em função de suas curvas suaves e nos formatos muitas vezes ousados das mesmas, sendo que o cálculo e construção de estruturas em cascas são normalmente considerados um verdadeiro desafio pelos engenheiros especializados na execução de projetos de tais estruturas.

### **5.3 - Elementos estruturais em blocos**

As estruturas de blocos são comumente empregadas nas fundações das edificações, com a função de transmitir os esforços da superestrutura ao solo. Os blocos de fundação podem estar diretamente apoiados sobre o solo (sapatas) ou apoiados sobre estacas ou tubulões para promover uma melhor distribuição dos esforços.

Entende-se por fundação a parte da estrutura que tem por objetivo transmitir ao terreno a carga da edificação. Para a escolha correta e dimensionamento da estrutura de fundação, necessita-se do cálculo das cargas atuantes sobre a mesma e do estudo do terreno. As fundações são classificadas em diretas (ou rasas) e indiretas (ou profundas). As superficiais são aquelas em que as camadas do sub-solo imediatamente abaixo da edificação tem capacidade de suportar as cargas que serão transmitidas. Já nas fundações profundas é necessário recorrer a camadas mais profundas de solo do terreno para suportar os esforços da estrutura.

## **6 - Fundações**

### **6.1 - Fundações Superficiais**

- **Sapatas isoladas:** são executadas em concreto armado, possuem formato retangular, podendo trabalhar a flexão. São utilizadas quando o terreno possui resistência suficiente para, em pequena área, resistir aos esforços a que estará submetido.

- **Sapatas corridas:** quando a resistência do terreno não é suficiente para resistir as cargas através de pontos isolados (onde estão os pilares), há necessidade de se aumentar a área de contato entre a fundação e o solo. Isto pode ser realizado com a utilização de fundações sob toda a superfície das paredes. Podem ser empregados, para esta execução, vários tipos de materiais, tais como: alvenaria de tijolos, alvenaria de pedras e concreto.

- **Alvenaria de tijolos:** devem ser utilizadas em terrenos secos (áridos) e para pequenas cargas. Após a escavação, executa-se um lastro de concreto magro.

Faz-se a levacão da alvenaria que é respaldada por uma cinta de amarração de concreto armado.

- **Alvenaria de pedras:** são utilizadas em terrenos úmidos e possuindo uma maior capacidade de carga que a alvenaria de tijolos. É importante a verificação do custo de aquisição dos blocos, a fim de viabilizar economicamente a sua execução. O processo construtivo é idêntico ao de alvenaria de tijolos.

- **Concreto:** uma outra forma de executar-se uma fundação superficial é com a utilização de alicerce de concreto. Pode ser de formato regular (paralelepípedo) ou ter a superfície superior inclinada (de acordo com a distribuição das forças) semelhante a sapata isolada. Devem ser utilizadas fôrmas de madeira para a execução do concreto.

-**Radiers:** são utilizadas quando o terreno tem baixíssima resistência, não há possibilidade de cravação de estacas ou é impossível escavar grande profundidade para atingir as camadas mais resistentes do terreno. Consiste de uma placa contínua de concreto armado com o objetivo de distribuir a carga em toda a superfície de contato com o terreno.

## 6.2 - Fundações Profundas

**Estacas:** As estacas são peças grandes que transferem as cargas dos pilares, às camadas mais profundas do terreno (uma parte por atrito lateral, que se desenvolve ao longo do fuste, e outra, pela resistência de ponta). Podem ser utilizadas de forma isolada ou em grupo e podem chegar ao canteiro de obras já executadas e, conseqüentemente, em condições de cravação ou moldadas no próprio solo;

**Estacas para cravação:** Estas estacas têm a característica de possuírem um comprimento pré-determinado, sendo cravadas, com auxílio de um bate-estaca, até a apresentação da "nega".

Existem vários tipos de estacas dentre os quais se destacam:

### a) Estacas de Madeira

As estacas de madeira empregam-se em terrenos permanentemente secos ou úmidos uma vez que esse material não suporta as alternativas de umidade e secura, o que provoca a sua deterioração em pouco tempo. O seu diâmetro varia em torno de 18 a 35 cm e o comprimento de 5 a 8 metros.

Essas estacas podem receber na sua extremidade inferior uma ponteira de aço para facilitar a penetração no solo, e na superior um anel provisório, também de aço, para evitar que sob as pancadas do macaco (peso), se esfaquelem. As estacas de madeira devem ser retas, tolerando-se uma ligeira curvatura de 1 a 2 % do comprimento. A sua carga não deve exceder de 60 kgf / cm<sup>2</sup>. É difícil encontrá-las no comércio com o comprimento necessário. Torna-se necessário a emenda, a qual se faz de topo ou a meia madeira e com chapas metálicas e parafusos. No entanto, sempre que possível deve ser evitado tal procedimento, uma vez que essas emendas poderão trazer problemas durante a cravação. A ligação das estacas com os pilares se dá através dos blocos de fundação. Pode haver mais de uma estaca para cada bloco.

#### b) Estacas Pré-moldadas de Concreto.

As estacas pré-moldadas podem ter a seção quadrada com os cantos chanfrados, sendo a dimensão mínima de 25 x 25 e a máxima de 40 x 40 cm. Empregam-se também seções circulares e poligonais. O seu comprimento alcança em média 12 a 14 metros.

A armadura é semelhante a dos pilares, sendo constituída por aços longitudinais e por estribos convenientemente afastados ou por uma espiral metálica. As primeiras constituem as estacas comuns e as outras as estacas cintadas. As estacas são moldadas horizontalmente, permanecendo por volta de 3 dias nas formas e 4 a 6 semanas ao ar livre antes do uso.

Quando em terreno muito duro, podem receber uma ponteira de aço, dispensável nos terrenos brandos, pois a simples ponta do concreto apresenta resistência suficiente. A armadura longitudinal concentra-se em forma de feixe na ponta da estaca, onde é amarrada ou soldada.

A cabeça é protegida contra o esboroamento, proveniente da percussão, por meio de um chapéu metálico ou mediante a interposição de uma tábua grossa. Utiliza-se a estaca sempre com maior comprimento que o necessário e depois da cravação degola-se a mesma, deixando-se parte da armadura para ancorar no bloco. Este bloco tem a função de distribuir a carga do pilar às estacas.

#### c) Estacas Metálicas.

As estacas de aço têm atualmente aplicação muito restrita, sendo usada nos países onde o aço tem um preço menor. As estacas de ferro são indicadas para os terrenos arenosos e lodosos, bem como para aqueles alternativamente úmidos e secos, em que a madeira não é aconselhável.

As estacas metálicas, pela facilidade com que se deixam cravar, sem choques ou vibrações, e pela boa resistência que apresentam, têm sido usadas de preferência nas construções marítimas. Caso não se obtenha a "nega" durante a cravação, é possível efetuar emendas nas mesmas, através de soldagem. Podem ser utilizados perfis metálicos isolados ou soldados em função da resistência que devem apresentar.

### **Estacas moldadas no solo**

As estacas moldadas no solo podem ser concretadas em invólucros especiais que se recuperam posteriormente ou nos próprios buracos cavados com equipamentos especiais.

Permitem cravação a grandes profundidades, com diâmetros variáveis e no comprimento pré-determinado no projeto de fundações.

Existe uma grande variedade de tipos de estacas moldadas no local. Destacam-se:

#### a) Estacas Strauss

São muito empregadas desde o princípio deste século e com elas iniciou-se uma grande série de tipos de estacas concretadas no terreno. Hoje há tipos semelhantes, de criação mais recente, porém atendendo ao mesmo princípio. Para a sua execução não é exigida nenhuma aparelhagem especial, apenas um pequeno bate estacas.

Inicialmente crava-se no terreno um tubo de aço (com o diâmetro correspondente ao diâmetro da estaca). A seguir, coloca-se determinada quantidade de água dentro do tubo, ao mesmo tempo em que se retira a lama ali formada, através de um peso-sonda. Cravado o tubo, enrosca-se um novo tubo na extremidade do anterior, repetindo-se o processo. Atingida a profundidade desejada, imobiliza-se o mesmo, lançando-se concreto no seu interior. Soca-se com o maço este concreto que se expande no solo, formando um bulbo. Terminado o bulbo passa-se a execução do fuste, lançando-se novas quantidades de concreto que se apiloam ao mesmo tempo em que se efetua a retirada parcial do tubo, elevando-o de 20 a 30 cm de cada vez. Desta

maneira vão se formando diversas protuberâncias, dando origem a uma estaca com saliências em todo o seu comprimento e, por conseqüência, um alto coeficiente de atrito.

Esse tipo de estaca requer grande cuidado na sua execução, especialmente quando se trabalhar abaixo do lençol freático, para evitar a entrada de água dentro do molde.

#### b) Estacas Franki

Consiste, este processo, em fazer-se atuar um pesado maço (peso) de um bate-estaca (1 a 4 toneladas) sobre um tampão de concreto quase seco ou de cascalho e areia (bucha), colocados dentro de um tubo de aço de grande altura.

O atrito desenvolvido entre o tubo e o tampão é suficiente para que, sob a ação dos golpes do maço, o tubo seja enterrado.

Neste processo de cravação, por percussão, o solo é comprimido (sem a retirada de terra), o que proporciona um excesso de vibração nas edificações vizinhas.

Atingida a profundidade desejada, imobiliza-se o tubo e lança-se o concreto quase seco no seu interior e volta-se a percutir até a expulsão do tampão. Socando-se com o maço, o concreto espalha-se na zona não revestida pelo tubo, formando um bulbo.

Terminado o bulbo, passa-se a execução do fuste. Para isso, coloca-se previamente a armadura, sendo que o maço trabalha por dentro dela. Em seguida, lançam-se novas quantidades de concreto que se apiloam, ao mesmo tempo em que se efetua a retirada parcial do tubo, elevando-o de 20 a 30 cm de cada vez. Desta maneira vão se formando diversas saliências, dando origem a uma estaca com irregularidades em todo o seu comprimento, aumentando o seu atrito com o terreno.

Geralmente o diâmetro do tubo varia entre 30 e 60 cm. Devido as saliências o diâmetro do fuste da estaca torna-se superior ao do tubo, podendo alcançar 50 a 80 cm, conforme a natureza das diversas camadas de terreno atravessados pela estaca.

Por serem moldadas, na ocasião de cravação, com o comprimento desejado, economizam tempo e dinheiro.

Com uma capacidade de 10 a 20 toneladas, melhor estabilidade devido a sua base alargada, boa verticalidade e superfície do fuste bastante rugosa, em contato com o terreno fortemente comprimido, tornam as estacas Franki um dos tipos mais recomendados para fundações.

Este tipo de estaca, devido a compactação do solo, apresenta o inconveniente de gerar um excesso de vibração nas edificações vizinhas, podendo danificá-las. Também pode haver um estrangulamento do concreto caso haja um desmoronamento de solo, causado por uma extração do tubo realizada de modo imperfeito.

Tratando-se de trabalho oneroso e especializado (para evitar os defeitos acima citados), tal tipo de fundação somente deve ser contratado com empresas especializadas.

#### c) Estacas Broca.

Esta estaca é executada com retirada do solo, utilizando-se uma broca rotativa, cujo diâmetro varia de acordo com a carga a ser transmitida pelo respectivo pilar e tendo, por consequência, uma estaca para cada pilar.

O processo é realizado através da penetração no solo da citada broca, movida por um rotor, em todo o seu comprimento. Posteriormente, a broca é retirada, deslocada para longe do furo e invertido o seu sentido de giro. Tal inversão faz com que toda a terra, retida entre os "passos" da broca, caia no terreno. Este processo é realizado até que a estaca alcance a profundidade determinada no projeto de fundações.

Em seguida, é lançado o concreto com rapidez, de modo a evitar-se a queda de terra para o interior do buraco. Em alguns tipos de terrenos, há necessidade da colocação de "camisas" junto a superfície do terreno, a fim de não permitir também um possível desmoronamento do solo

#### d) Estacas Raiz

Este tipo de estaca pode ser executado na direção vertical ou inclinada, mediante o uso de rotação ou roto-percussão com circulação de água.

Completada a perfuração com revestimento total do furo, é colocada a armadura necessária, procedendo-se, em seguida, a argamassagem do fuste com a correspondente retirada do tubo de revestimento. Esta argamassagem é executada de baixo para cima, aplicando-se regularmente uma pressão

controlada e variável, em função da natureza do terreno, cujo valor atinge até 0,4 MPa.

Este procedimento, além de aumentar consideravelmente o valor do atrito lateral, garante também a integridade do fuste, permite conseguir-se uma resistência maior para a argamassa utilizada.

O processo de perfuração, não provocando vibrações nem qualquer tipo de descompressão do terreno, em conjunto com o reduzido tamanho de equipamento torna este tipo de estaqueamento indicado para várias situações específicas.

#### e) Estacas de Grande Diâmetro.

Estas estacas, cujo processo de escavação é semelhante às estacas broca, são utilizadas raramente nas construções. Por terem uma capacidade de carga muito grande (até 1000 ton) devem ser utilizadas somente em obras de grande porte.

Podem ser executadas em terrenos cujo lençol freático está próximo a superfície, uma vez o escarificador é envolvido por uma espécie de camisa, possibilitando a retirada de lama.

A profundidade pode atingir até 30 metros sendo o diâmetro máximo de 2,20 metros.

Conforme a carga do pilar varia o diâmetro da estaca, tendo, portanto, uma estaca para cada pilar.

#### f) Estacas de Hélice Contínua.

Também é um processo semelhante a estaca Broca, diferenciando-se apenas que o processo de escavação é contínuo, ou seja, as brocas são emendadas a partir do momento em que tenham penetrado no solo em todo o seu comprimento.

Atingindo o comprimento estipulado no projeto de fundações, é injetado concreto (a brita é substituída por pedrisco, com um “slump” em torno de 20 e o consumo de cimento é de 400 kg/m<sup>3</sup>), a medida que a broca vai sendo retirada e, eventualmente, em função de um controle de pressão no painel do equipamento, o peso da broca pode fazer pressão sobre a massa de concreto.

Após a conclusão da concretagem são colocadas barras de aço para fazer a ancoragem com o futuro bloco de fundação.

- **Estacas Tubulão** Apesar de ser semelhante a uma estaca, este tipo de fundação é considerado como direta, pois a sua resistência é transmitida ao solo através de sua base.

Inicialmente executa-se parte da estaca em concreto na superfície, sendo a mesma oca, de forma a permitir a passagem de uma pessoa (mínimo 60 cm).

Após concluído este primeiro estágio, a estaca é escorada. Na seqüência, a terra é retirada de sua base, por um operário que penetra no seu interior, numa altura igual a altura do módulo existente na superfície.

Retira-se o escoramento, permitindo que a estaca penetre no solo, pois não existe mais sustentação na sua base. Depois da descida da mesma, todo o processo é repetido.

Quando a estaca atingir o lençol d'água, uma campânula é fixada no topo da estaca, injetando-se ar comprimido. Nesta campânula existe uma "chaminé" com válvulas, por onde se processa a retirada de terra, com a utilização de um balde, quando da continuidade do processo de escavação. Continua-se assim a escavação (abaixo do nível da água) sob ar comprimido, de modo a impedir que a água penetre no tubo.

Quando atingida a cota da escavação, é realizado o alargamento da base e a concretagem, que também são feitos sob efeito de ar comprimido.

## **7 - Acompanhamento da construção do novo prédio da FEC**

### **7.1 - Fundação: Estaca Strauss**

A fundação utilizada na estrutura do novo prédio de aulas da FEC é do tipo Estaca Strauss. Como visto, trata-se de uma fundação profunda, feita com concreto e moldada no local da obra.

Inicialmente, coloca-se o tubo de molde do mesmo diâmetro da estaca e procede-se a perfuração do terreno por meio de um balde a fim de penetrar e remover a lama existente. Quando atingido o comprimento ideal da estaca, preenche-se o tubo com concreto em trechos que vão de 0,5 a 1m e que são socados seguidamente por um pilão a medida que vai se extraindo o molde.

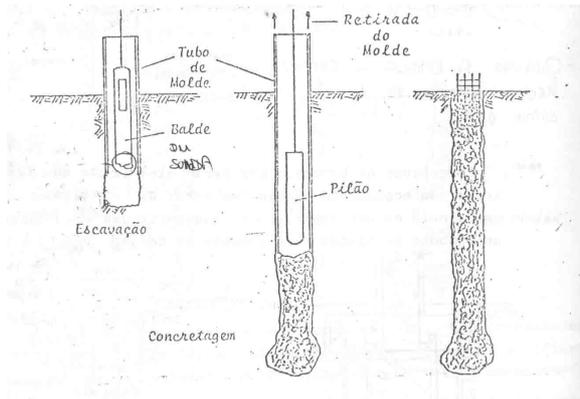


Figura 79 – Modelo de estacas utilizado na obra.

As estacas tem como objetivo transmitir carga a camadas profundas, conter empuxos laterais e compactar o terreno. Foram utilizadas ao todo na obra **146 estacas**.



Figura 80 – Colocação dos tubos.



Figura 81 - Concretagem das estacas.

## 7.2 – Sistemas estruturais em alvenaria

A alvenaria estrutural é um processo construtivo que consiste no uso de paredes como principal estrutura de suporte da edificação, sendo dimensionada a partir de cálculos racionais. Esse sistema construtivo envolve basicamente peças industrializadas de dimensões e peso que a fazem manuseáveis, ligadas por argamassa, tornando o conjunto monolítico. Estas peças industrializadas podem ser feitas em:

- Cerâmicas (tijolos maciços furados ou blocos);
- Concreto (blocos maciços ou furados);
- Sílico-calcáreos (blocos e tijolos maciços);

A alvenaria de tijolos sempre foi muito utilizada na construção de prédios de 1 a 5 pavimentos devido a vantagens como flexibilidade, economia e valor estético.

A base estrutural de um projeto em alvenaria se assenta nos seguintes princípios:

- Alvenaria suporta grandes tensões de compressão e pequenas tensões de tração.
- Todo o momento fletor deve ser evitado, ou nas zonas de aparecimento de tração devem ser previstos reforços convenientes.

As principais vantagens do uso da alvenaria estrutural são:

- Técnicas de execução simplificadas;
- Facilidade de treinamento de mão de obra;
- Menor diversidade de materiais;
- Facilidade de controle;
- Eliminação de interferências no projeto;
- Facilidade de integração com outros sub-sistemas;
- Excelente flexibilidade e versatilidade de formas;
- Flexibilidade no planejamento de execução da obra;

- Facilidade de organização do processo de produção;
- Grande potencial de redução de custos;

Apesar das grandes vantagens, a alvenaria estrutural apresenta algumas limitações, tais como:

- Planejamento minucioso da obra, já que mudanças de última hora que exijam quebra de paredes ou abertura de portas e janelas são inviáveis;
- Não é possível fazer retoques e preencher com massa possíveis erros de execução;

Para que uma obra com alvenaria estrutural transcorra sem maiores problemas é necessário um projeto bem estudado e elaborado, utilização de mão de obra qualificada e treinada e materiais de alta qualidade. A alvenaria estrutural, ao contrário do que se pensa, pode ser empregada tanto em edificações de interesse social quanto em obras de médio e alto padrão, podendo também ser empregada em muros de arrimo, caixas d'água e edifícios comerciais de grande porte.

Os sistemas estruturais em termos de alvenaria estrutural se dividem em dois principais tipos:

- Sistema estrutural totalmente estruturado: Nesse caso, os elementos estruturais da estrutura são lajes, vigas e pilares previamente dimensionados, com a finalidade de resistir ao seu peso próprio e a todas as cargas atuantes. O material usado nesse caso é escolhido de acordo com o projeto e pode ser concreto armado, madeira, alumínio ou aço.

Nesse casos, as paredes funcionam como elementos de vedação, sem nenhuma responsabilidade estrutural, podendo ser removidas sem trazer danos ao equilíbrio da estrutura. Esse sistema é tradicionalmente usado em edificações de grande porte.

- Sistema estrutural de alvenaria portante: Nesse tipo de sistema, a alvenaria tem a finalidade de resistir ao carregamento da edificação, tendo, portanto, paredes com função resistente. Dessa forma, a remoção de qualquer parede compromete o equilíbrio da estrutura. As lajes da edificação são normalmente

em concreto armado ou pré-protendido, podendo ser pré-fabricadas ou moldadas no próprio local da obra.

- Sistema estrutural com estruturas mistas: Sempre que adotarmos materiais estruturais diferenciados teremos uma estrutura mista. Nestes casos, qualquer elemento a ser removido deve ser analisado e substituído ou reforçado quando necessário. A remoção de um elemento por em risco o equilíbrio da edificação.

### **7.2.1 – Paredes de alvenaria estrutural**

São elementos estruturais de alvenaria, definidos que possuem uma das dimensões muito menor do que as outras duas, apoiadas de modo contínuo em sua base.

De acordo com a sua utilização são classificadas em:

#### · Paredes de vedação

São aquelas que resistem apenas ao seu próprio peso, e tem como função separar ambientes ou fechamento externo, não possuindo função estrutural.

#### · Paredes estruturais ou portantes

Tem a finalidade de resistir ao seu peso próprio e outras cargas advindas de outros elementos estruturais tais como lajes, vigas, paredes de pavimentos superiores, telhado, dentre outros.

#### · Paredes de contraventamento ou enrijecedoras

Paredes estruturais projetadas para enrijecer o conjunto, tornando-o capaz de resistir também a cargas horizontais como aquelas provocadas pelo vento.

### **7.2.2 - Utilização de elementos de reforço**

Como dito anteriormente, a abertura de portas e janelas em estruturas de alvenaria deve ser planejada e bem executada. Quando a concentração desses elementos é alta em determinadas paredes, bem como há a necessidade de abertura de grandes vãos ou do apoio de vigas em paredes, torna-se necessária a utilização de elementos de reforço, que evitam o acúmulo de tensões em determinadas áreas do projeto. São eles:

### 7.2.2.1 – Vergas

Quando é necessário abrir janelas ou portas com mais de 1,5 metros em uma parede de alvenaria, deve-se prever a necessidade de um reforço estrutural, chamado verga.

A verga é um elemento estrutural sujeito a momento fletor que tem a finalidade de absorver as reações das lajes que sobre ela se apoiam e de eventuais paredes de pavimentos superiores que se estendam em seu vão.

Nestes casos, a verga é calculada como uma viga e devemos prolongar o seu comprimento de apoio, de maneira a criar uma maior área para a distribuição do efeito de suas reações, reduzindo a tensão desenvolvida na alvenaria.

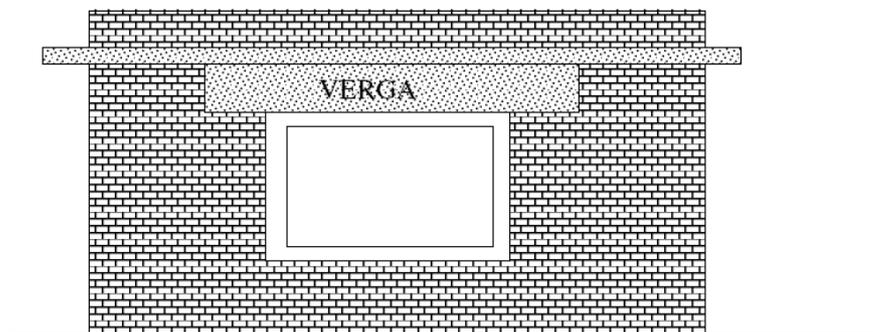


Figura 82 - Verga aplicada em uma construção.

A distribuição das tensões no comprimento da verga não é uniforme e segue o modelo abaixo mostrado, onde:

R : Reação da Verga;

B : Comprimento do apoio;

b : Espessura real da parede (descontadas as espessuras de reboco);

q1 : Carga proveniente de pavimentos superiores;

sadm : Tensão admitida para a alvenaria;

smáx: Tensão máxima desenvolvida no apoio.

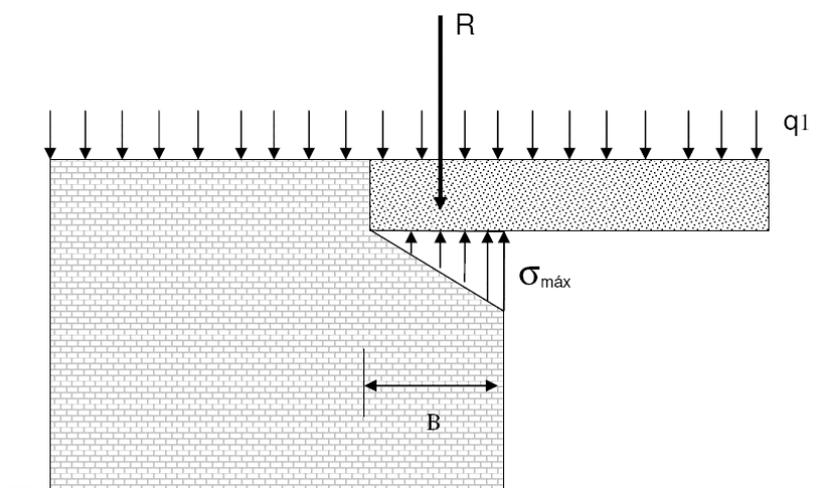


Figura 83 – Modelo de tensões em uma viga.

### 7.2.2.2 – Cinta

É um elemento estrutural semelhante a viga que se apoia sobre as paredes de alvenaria portante, normalmente construídas em concreto. Ela tem como finalidade distribuir cargas, uniformizando a tensão exercida sobre a alvenaria.

Esse elemento de reforço previne recalques diferenciais não considerados e auxilia no contraventamento e no amarramento das paredes.

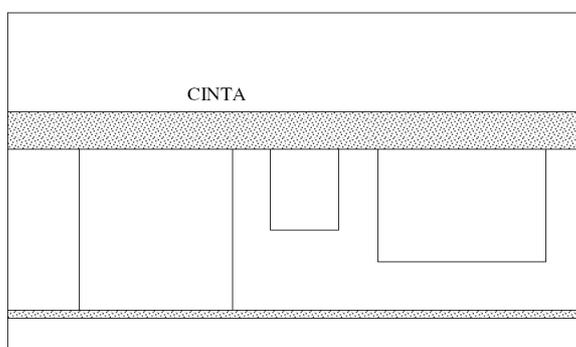


Figura 84 – Exemplo de cinta.

### 7.2.2.3 – Coxins

No local em que as vigas se apoiam na alvenaria, dependendo da reação transmitida e da tensão desenvolvida, pode haver a necessidade de se aumentar esta área de apoio. Esse aumento pode ser feito através de coxins,

que são elementos auxiliares que devem possuir no mínimo a altura da viga que apóia e comprimento calculado em função da reação da mesma.

Este comprimento deve ser suficiente para não criar na alvenaria tensões normais maiores do que as admitidas.

Para que a distribuição de tensões na parede seja uniforme, o coxim deve ser rígido. Ele se comporta como um prolongamento lateral da viga e pode ser considerado uma peça com dois balanços, sujeita a Momento Fletor e Esforço Cortante.

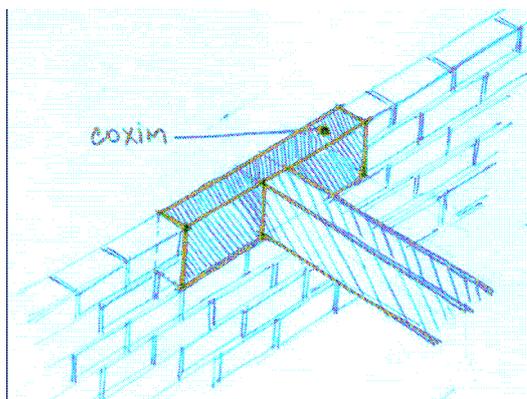


Figura 85 – Detalhe da utilização de coxim.

### 7.2.3 - Elementos de alvenaria (blocos)

Os elementos de alvenaria são peças industrializadas, em formato de paralelepípedo e que podem ser dos seguintes tipos:

- Tijolos de Barro Cozido: tijolo comum, tijolo baiano, tijolo furado e tijolo laminado.
- Tijolo de Solo Cimento
- Blocos de Concreto: três furos (antigo), dois furos (mais usado) e canaleta.
- Blocos para Alvenaria Armada
- Blocos para Alvenaria Auto Portante
- Blocos de concreto celular
- Tijolos de Vidro

### 7.2.4 – Blocos de concreto

A normalização brasileira define basicamente dois tipos de blocos de concreto, de acordo com sua aplicação: o bloco vazado de concreto simples

para alvenaria sem função estrutural, e com função estrutural, o bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural.

Qualquer que seja a aplicação, o bloco deve ser vazado, ou seja, sem fundo, aproveitando os furos para a passagem das instalações e para a aplicação do graute, um concreto de alta plasticidade.

Os blocos de concreto permitem ao levantamento de paredes com maior velocidade, devido ao tamanho maior das peças quando comparadas aos tijolos convencionais, além de permitirem que as paredes sejam erguidas com alinhamento mais definido. Além disso, as paredes permitem a passagem de tubulações destinadas às instalações elétricas, telefônicas e sanitárias, eliminando o trabalho de cortar as paredes para embutir as canalizações. Os blocos de concreto podem ter diferentes funções, tais como:  
Blocos de Vedação: fechamento de vãos de prédios;  
Blocos Aparentes ou Arquitetônicos: função decorativa;  
Blocos Estruturais: permitem que as instalações elétricas e hidráulicas fiquem embutidas já na fase de levantamento da obra.

Os Blocos de Vedação e os Blocos Estruturais feitos de concreto são aparentemente idênticos, porém os Blocos Estruturais possuem paredes mais grossas, o que lhe confere maior resistência aos esforços de compressão, já que estes são utilizados para dar sustentação às construções.

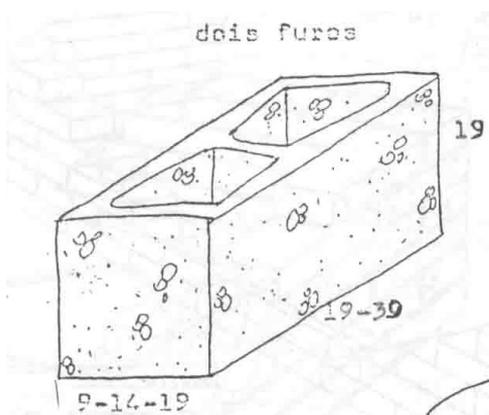


Figura 86 – Bloco de concreto com dois furos.

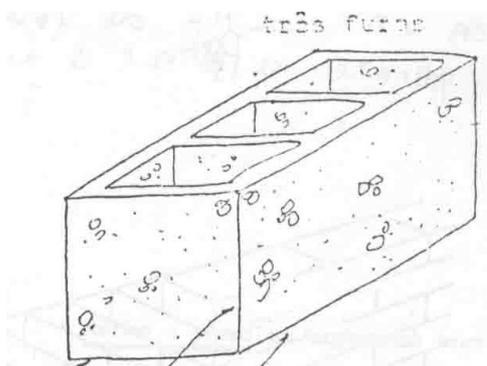


Figura 87 – Bloco de concreto com três furos.



Figura 88 – Bloco do tipo canaleta.

No novo prédio de aulas da FEC os blocos de alvenaria estrutural utilizados foram os de concreto. Na obra, foram usados tanto os blocos de concreto comuns, como aqueles de dois furos, quanto os do tipo canaleta.



Figura 89 – Blocos de concreto utilizados na obra. Respectivamente, bloco comum e canaleta.

No levantamento das paredes de alvenaria, inicialmente, impermeabiliza-se a alvenaria de embasamento, que é constituída pelas duas primeiras fiadas de bloco acima da viga baldrame. Essa impermeabilização é necessária para combater as infiltrações da água vinda do solo. Primeiro, são

levantados os cantos da parede, para que se possa nivelar o resto da parede a partir de uma linha puxada entre os dois cantos.

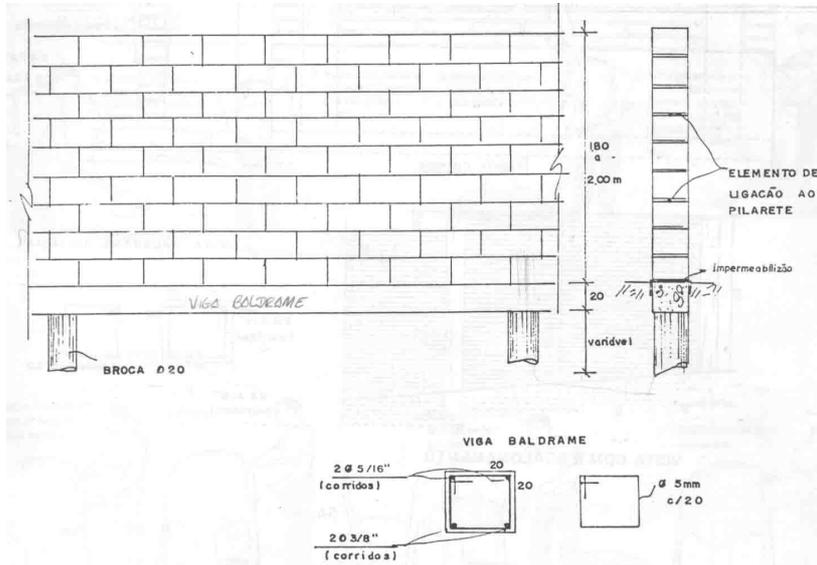


Figura 90 – Esquema de montagem da parede de alvenaria e detalhe da viga baldrame.

A amarração dos blocos de concreto é do tipo ajuste de corrente (dentada).



Figura 91 – Esquema de amarração corrente dentada.

Para fazer as cintas de amarramento das paredes são utilizados blocos de concreto do tipo canaleta.



Figura 92 – Detalhe do bloco tipo canaleta usado na amarração das paredes.

Como forma de sustentação à estrutura devido à abertura de janelas e vãos, foram utilizadas também **vergas**, elementos de reforço para as paredes.



Figura 93 – Detalhe do uso de vergas nas portas e janelas.

## 8 – Conclusão

De acordo com as análises realizadas, foi notado que a simples observação de sistemas estruturais em uma dada edificação pode ser considerada um excelente exercício para alunos que estejam iniciando o estudo a respeito de sistemas estruturais. A observação de exemplos práticos desperta o espírito investigativo, ou seja, o interesse em descobrir o funcionamento da estrutura, desencadeando um posterior estudo teórico.

Conclui-se ainda que a importância dos sistemas estruturais não está restrita somente a função de esqueleto resistente da construção. É notória a sua relação com a arquitetura, uma vez que muitos sistemas estruturais são visíveis na construção terminada.

A escolha dos materiais de construção adequados, como discutido, são outros aliados fundamentais para o sucesso de um sistema estrutural e conseqüentemente da obra como um todo.

Portanto, para a aplicação de um sistema estrutural, não se deve observar apenas as necessidades estruturais da obra. Além de relevar o peso da construção e os carregamentos externos, por exemplo, é necessário levar em conta fatores tão importantes quanto o sistema estrutural em si, a saber: estudo e especificação dos materiais adequados, estudo e determinação de soluções econômicas e harmonia entre estrutura e arquitetura.

## 9 - Referências Bibliográficas

**Bauer, L.A.F;** Materiais de construção; v.2; 2ª ed., ED. LTC, 1985

**Berr, F. P. Johnston Jr, E. R.,** volume 1, Mecânica vetorial para Engenheiros, 5ª edição, editora Makron Books do Brasil Editora Ltda, São Paulo, 1994.

**Chamecki, S.;** “Curso de estática das construções”, Editora Científica, Rio de Janeiro, 1956;

**Costa, E. V.** Curso de Resistências dos Materiais, volume 1, São Paulo, editora nacional, 1974;

**Doro, P. S,** “Sistemas estruturais para edificações”, Campinas (SP), 2000;

**Hibbeler, R.C.** Estática: Mecânica para engenharia, vol. 1; 10ª edição; Editora Pearson; São Paulo; 2005;

**Petrucci, E. G. R.** Materiais de Construção. 2ª Ed. Porto Alegre, Editora Globo, 1976;

**Popov, E. P.** Engineering mechanics of solids, New Jersey, Ed.: Prentice Hall; 1990;

**Ricardo, O.G.S.** Teoria das estruturas. São Paulo, Mcgraw hill do Brasil / EDUSP, 1978;

**Ricardo, O.G.S.** Introdução à Resistência dos Materiais, Campinas. Editora universidade de Campinas, 1977;

**Salvadori, M.** Why buildings stand up – The strength of architecture. New York, W.W. Norton & Company, 1990;

**Soares, A. M. M.; Hanai, J. B.** “Análise estrutural de pórticos planos de elementos pré-fabricados de concreto considerando a deformabilidade das ligações”, Cadernos de Engenharia de Estruturas; São Carlos, 2001;

**Timoshenko, S.P.** Resistência dos materiais, volume 1, 3ª edição, editora Livro técnico S.A, Rio de Janeiro, 1966;

<http://www.lami.pucpr.br/cursos/estruturas/Parte01/FrameCurso1Completo.htm> - acessado em 14/08/2007;

<http://usuarios.upf.br/~zacarias/Notas de Aula Madeiras.pdf> - acessado em 14/08/2007;

<http://www.cpqec.ufrgs.br/morsch/mecanica/aula/a09.pdf> - acessado em 28/09/07;

<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec802/Vigas/EEESC/Vigas.pdf> - acessado em 28/09/07;

<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arg000/esp214.asp> - acessado em 28/10/2007.