

Capítulo 1

Introdução

1.1 Histórico

Embora o primeiro metal a ser empregado pelo homem tenha sido, provavelmente, uma liga de cobre, o desenvolvimento da metalurgia ocorreu devido à necessidade da manufatura do ferro e de sua famosa liga, o aço. A tonelagem de ferro e de aço produzida anualmente representa cerca de 95% da tonelagem total de metais produzida no mundo.

Desde quando o homem utiliza o ferro? Essa é uma pergunta que os arqueólogos ainda não conseguiram responder. Eles, no entanto, encontraram um punhal e um bracelete de ferro dentro da Grande Pirâmide do Egito, e atestam que os artefatos datam de mais de 5000 a. C.!

Como o homem descobriu o ferro? Essa é uma outra pergunta de difícil resposta. Dizem que após um grande incêndio na floresta do Monte Ida na antiga Tróia (hoje Turquia), o solo ficou repleto de uma forma grosseira de ferro devido à grande quantidade do minério nele contido. Entretanto, a maior parte dos historiadores acredita que o homem descobriu o ferro nos locais de queda de meteoritos.

O domínio da metalurgia do ferro e do aço tem influenciado, desde sempre, o curso da História. Por exemplo, na batalha de Maratona (490 a. C.) os gregos derrotaram o numeroso exército persa devido ao uso de armadura de ferro pelos combatentes gregos. No Brasil, a decisão de apoiar as Forças Aliadas na 2ª Guerra Mundial foi uma troca com o governo norte-americano pela construção da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

O aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro e de uma pequena quantidade

de carbono (entre 0,002% e 2%), além de outros elementos como silício, manganês, fósforo e enxofre. A manufatura do aço é conhecida há mais de 2000 anos. Com certeza, o primeiro aço foi obtido quando os elementos constituintes da liga se fizeram presentes acidentalmente durante a forja do ferro. Com o tempo, o aço passou a ser produzido introduzindo-se carvão vegetal na forja do ferro: a superfície do metal absorvia parte do carbono do carvão que era inserido martelando o metal. A repetição desse caro processo resultava numa camada externa de aço.

Devido ao custo, o emprego do aço ficou durante muito tempo restrito à fabricação de talheres e ferramentas de corte. Em meados do século XIX, o inglês Sir Henry Bessemer¹ e o norte-americano William Kelly² descobriram, independentemente, que ao se insuflar ar quente na fundição do ferro retirava-se-lhe a maior parte das impurezas. A partir daí, a produção em escala industrial do aço tornou-se viável, transformando o aço no principal metal construtivo.

No Brasil, o início da construção metálica coincide, praticamente, com o início da nossa siderurgia. A nossa primeira usina foi a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira implantada em 1921 para a produção de fios, arames farpados, perfis leves, etc. Em 1940, foi criada a Comissão Executiva do Plano Siderúrgico Nacional, e em plena guerra (1941) iniciou-se a construção da CSN em Volta Redonda - RJ que entrou em operação em fins de 1946. A finalidade da CSN era a produção de chapas, trilhos e perfis que, inicialmente, seguiam a padronização americana.

Para obter a auto-suficiência na produção do aço, o governo patrocinou a partir da década de 1960 a ampliação do parque siderúrgico nacional. Surgiram dessa política novas usinas como, por exemplo, a Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) em Cubatão - SP, a USIMINAS em Ipatinga - MG, a Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) em Vitória - ES, e a Aço Minas em Ouro Branco - MG. O Brasil produz atualmente cerca de 25 milhões de toneladas de aço por ano, exportando parte de sua produção.

Para difundir o emprego do aço na construção civil, a CSN criou em 1953 a Fábrica de Estruturas Metálicas (FEM) que iniciou a qualificação da mão-de obra nacional para o fabrico e o projeto de obras metálicas.

¹Henry Bessemer, engenheiro metalurgista e inventor inglês nascido em Charlton em 1813, falecido em Londres em 1898.

²William Kelly, inventor norteamericano nascido em Pittsburgh em 1811, falecido em Louisville em 1888.

As principais empresas do ramo siderúrgico que operam hoje (2006) no Brasil são: Arcelor Brasil, CSN, Gerdau e Usiminas. Todas elas são conglomerados de outras empresas com plantas em diversas cidades. A Arcelor Brasil, por exemplo, é resultado da união da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, CST e Vega do Sul, sendo uma subsidiária do Grupo Arcelor.

1.2 Produção

As matérias-primas necessárias à confecção do aço são o minério de ferro e o carvão mineral. No Brasil, temos auto-suficiência de minério de ferro, exportando-o para diversos países, e insuficiência de carvão mineral, importando-o da Europa e Austrália. O processo de fabricação do aço pode ser resumido em quatro etapas: produção do coque e do sinter, produção do ferro-gusa, produção do aço, conformação.

O coque é obtido aquecendo-se o carvão, em fornos fechados, à temperatura de 1300°C durante cerca de 18 horas. É um material poroso, composto principalmente por carbono, de alta resistência mecânica e alto ponto de fusão.

O sinter é o resultado da aglomeração dos grãos de minério de ferro sob chama. Para aglutinar o minério empregam-se outros materiais, ditos fundentes, como calcário e areia de sílica.

A produção do ferro-gusa é feita em alto-forno, que é uma enorme cuba onde se misturam coque, sinter e fundentes. O oxigênio necessário à queima é injetado sob pressão por meio de tubos, cunhados de ventaneiras. A temperatura no interior do alto-forno atinge 1500°C. O carbono do carvão se combina com o oxigênio do minério, reduzindo o minério a ferro.

O ferro-gusa em alta temperatura é retirado do alto forno e levado para a aciaria em carros torpedos (vagões revestidos internamente por refratários). É na aciaria que se dá a produção do aço. O ferro-gusa é posto numa panela, denominada conversor, na qual se injeta oxigênio sob alta pressão. O conversor reduz a quantidade de carbono, silício e fósforo presentes no ferro-gusa refinando-o. Acrescenta-se sucata de aço para o ajuste da composição da liga e para o controle da temperatura. As impurezas do metal são eliminadas tanto na forma de escória, quanto na forma de gases.

Para “acalmar” o aço, o conversor derrama-o numa outra panela: é a metalurgia de panela. O termo acalmar significa reduzir a quantidade de oxigênio, tendo por finalidade

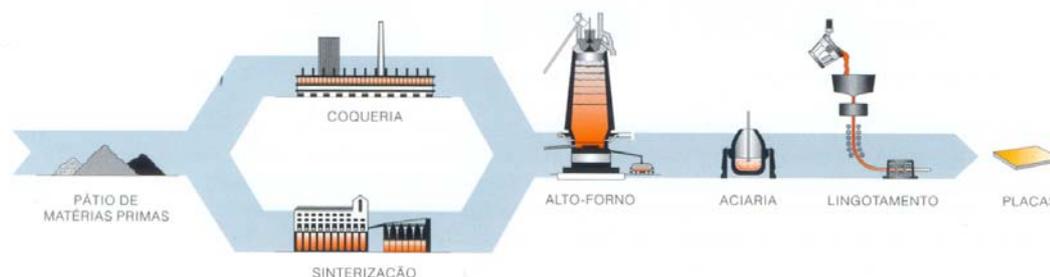


Figura 1.1 Produção do aço.

diminuir o número de vazios. Para tanto, adicionam-se elementos desoxidantes como o alumínio e o silício que reagem com o oxigênio, desgaseificando o aço líquido. Quanto ao grau de desgaseificação, os aços se classificam como: efervescentes, capeados, semi-acalmados e acalmados. Os aços efervescentes e capeados são empregados no fabrico de chapas finas. Os produtos siderúrgicos corriqueiros, como barras e chapas grossas, provêm de aços semi-acalmados. Os aços acalmados são utilizados em produtos especiais.

Da panela, o aço fundido é descarregado nas lingoteiras para confecção dos lingotes (blocos de aço de forma tronco-cônica). Nas usinas modernas se realiza o processo de lingotamento contínuo, no qual o aço é transferido para o conjunto distribuidor/molde onde se inicia a solidificação do aço. O metal enrubrecido é retirado continuamente por rolos extratores sendo cortado a maçarico originando tarugos e placas.

Por último, executa-se a conformação do aço para obtenção das chapas e perfis (denominação usual dada às barras metálicas). As chapas são obtidas a partir da conformação por debastadores, enquanto que os perfis são obtidos da conformação por laminadores (os perfis podem também ser obtidos cortando-se as chapas e unindo as partes convenientemente por meio de solda). O processo de produção do aço é resumido na Figura 1.1.

1.3 Vantagens e Desvantagens

O aço é talvez o mais versátil dos materiais estruturais. As vantagens do aço como metal construtivo provêm de sua natureza física e de seu processo industrial. As principais propriedades físicas do aço são descritas a seguir.

- *Alta razão resistência - peso*: a alta razão entre a resistência e o peso do aço permite a confecção de estruturas leves.
- *Baixa fluência*: a baixa fluência do material garante que a resistência da estrutura não reduz consideravelmente com o tempo.
- *Comportamento elástico*: o comportamento físico próximo à hipótese de ser um material homogêneo, isotrópico e elástico linear facilita a análise e o dimensionamento.
- *Durabilidade*: a durabilidade do material é praticamente infinita, desde que haja manutenção adequada (pesquisas com novos aços têm apontado a dispensa da pintura sob certas condições).
- *Ductilidade*: a natureza dúctil possibilita a redistribuição das tensões nos pontos de concentração, e torna visível a iminência de ruína da estrutura.
- *Tenacidade*: a tenacidade do aço permite que durante a fabricação, transporte e montagem hajam pontos na peça sujeitos a grandes deformações sem aparência visível de danos.

As principais características da indústria do aço são padronização, mecanização e reuso. As peças de aço são, geralmente, fabricadas em série nas oficinas e sua montagem é bem mecanizada, reduzindo o tempo de execução da obra, o que propicia retorno ao investimento a curto prazo, além do uso de pouco espaço para montagem (não é necessário grande canteiro de obra). Quando desmontadas, as peças podem ser reaproveitadas ou, em último caso, tornar sucata reciclável.

Quanto às desvantagens construtivas do aço podemos mencionar as seguintes.

- *Manutenção*: a maior parte dos aços comerciais está sujeita a problemas de corrosão quando expostos à atmosfera, necessitando de pintura e manutenção periódica. Os custos de manutenção podem ser reduzidos especificando-se aços resistentes à corrosão.
- *Proteção contra incêndios*: em situações de incêndio, a resistência do aço é drasticamente reduzida. Além disso, as peças de aço de um compartimento sob fogo são capazes de conduzir calor suficiente para que se inicie a combustão dos móveis e equipamentos dos compartimentos adjacentes. Para evitar esse cenário, a estrutura metálica de uma

edificação deve ser protegida por materiais com característica termo-isolante e sistemas de aspersão d'água nos andares da edificação.

- *Susceptibilidade à flambagem*: uma peça de aço quando comprimida está mais susceptível à flambagem (perda da estabilidade do equilíbrio) devido à esbeltez inerente (característica do projeto ótimo de uma estrutura de aço).

A industrialização da construção padroniza as edificações, restringindo sua plasticidade estética.

1.4 Comparativo de Custos

Faz-se aqui um breve comparativo de custos entre obras em estrutura de concreto armado moldado *in loco* e obras em estrutura de aço. Os quesitos de comparação são custos de projeto, despesas permanentes (funcionários, água, energia, etc.), fundações, estrutura (pilares, vigas, lajes e escadas), limpeza, administração (remuneração da construtora), acabamentos e instalações.

O comparativo é feito para as seguintes edificações: um shopping (Tabela 1.1), um edifício comercial de 20 pavimentos (Tabela 1.2), um edifício residencial de 4 pavimentos (Tabela 1.3).

Tabela 1.1 Custo de um shopping.

Quesito	Estrutura de concreto	Estrutura de aço
Projeto	4, 30%	3, 96%
Despesas permanentes	11, 25%	9, 25%
Fundações	6, 75%	5, 73%
Estrutura	18, 25%	17, 73%
Limpeza	4, 05%	2, 41%
Administração	7, 50%	6, 50%
Acabamentos e instalações	47, 90%	47, 90%
Total	100, 00%	93, 48%

Tabela 1.2 Custo de um edifício comercial de 20 pavimentos.

Quesito	Estrutura de concreto	Estrutura de aço
Projeto	4,35%	3,60%
Despesas permanentes	14,90%	13,45%
Fundações	7,58%	6,89%
Estrutura	16,01%	18,09%
Limpeza	3,52%	2,40%
Administração	12,00%	8,50%
Acabamentos e instalações	41,64%	41,64%
Total	100,00%	94,57%

Tabela 1.3 Custo de um edifício residencial de 4 pavimentos.

Quesito	Estrutura de concreto	Estrutura de aço
Projeto	3,02%	2,16%
Despesas permanentes	12,46%	6,40%
Fundações	6,05%	3,35%
Estrutura	17,32%	23,05%
Limpeza	0,39%	0,30%
Administração	10,00%	8,50%
Acabamentos e instalações	50,76%	50,76%
Total	100,00%	94,52%

Fazemos as observações a seguir com relação às Tabelas 1.1 - 1.3.

- *Projeto*: o projeto de uma estrutura de aço é de responsabilidade da empresa que fornece a estrutura.
- *Despesas permanentes*: reduz com a estrutura de aço por ser de rápida execução.
- *Fundações*: é mais barata com a estrutura de aço pela redução de peso.
- *Estrutura*: a estrutura de concreto é normalmente mais barata.

- *Limpeza*: gastos com remoção de entulhos favorecem a estrutura de aço.
- *Administração*: a terceirização da aquisição e montagem da estrutura de aço reduz o custo de administração da obra.
- *Acabamentos e instalações*: consideramos independentes do tipo de estrutura.
- *Total*: custo menor se a estrutura é de aço, embora o custo com a estrutura propriamente dita seja mais reduzido para a de concreto.

1.5 Aços Estruturais

A química do aço, isto é, sua composição, é a principal responsável pelas propriedades físicas do material. Por exemplo, quanto maior o teor de carbono no aço maior a resistência mecânica, menor a ductilidade, e menor a soldabilidade. Para fins estruturais empregam-se o *aço-carbono* e o *aço de baixa liga*. A diferença entre eles está na composição química. De preferência, os aços estruturais devem apresentar patamar de escoamento bem definido, boa ductilidade e boa soldabilidade.

A resistência mecânica do aço-carbono é devida, sobretudo, às quantidades de carbono e de manganês da liga, sendo o teor dos elementos constituintes da liga limitado a: $C \leq 1,7\%$; $Mn \leq 1,65\%$; $Si \leq 0,6\%$; $Cu \leq 1,7\%$. De acordo com o teor de carbono, classifica-se o aço-carbono como: baixo carbono ($C \leq 0,15\%$), moderado ($0,15\% < C < 0,29\%$), médio carbono ($0,30\% < C < 0,59\%$), e alto carbono ($0,60\% < C < 1,70\%$). Os aços de baixo carbono e moderado têm patamar de escoamento bem definido e boa soldabilidade.

Além do carbono e manganês, o aço de baixa liga deve sua elevada resistência mecânica a outros elementos constituintes da liga, como o colúmbio, vanádio, crômio, silício, cobre e níquel. A soma dos teores dos elementos da liga é limitada em 5%, daí o nome “baixa liga”. Os elementos presentes na liga permitem obter aços de alta resistência mecânica com baixo teor de carbono e boa soldabilidade.

No Brasil, os principais aços estruturais são o MR-250 (aço-carbono de média resistência com tensão de escoamento igual a 250 MPa e de ruptura igual a 400 MPa) e o AR-345 (aço de baixa liga de alta resistência com tensão de escoamento igual a 345 MPa e de ruptura igual a 450 MPa).

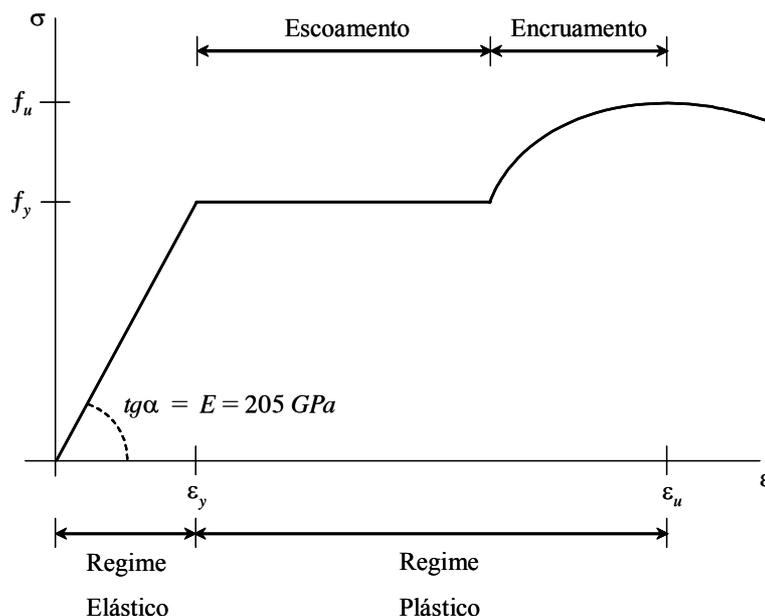


Figura 1.2 Relação tensão-deformação.

1.6 Relação Tensão-Deformação

Imagine um corpo de prova de seção transversal A e comprimento L . Num ensaio de tração simples, o esforço de tração T deforma a peça, alongando-a da quantidade ΔL . À medida que T aumenta, ΔL também aumenta. Sejam $\sigma = T/A$ e $\varepsilon = \Delta L/L$ as medidas de engenharia para a tensão e deformação. A Figura 1.2 esboça a relação tensão-deformação dos aços estruturais obtida do ensaio de tração simples. Admite-se que o comportamento à compressão seja similar.

Para tensões inferiores à tensão de escoamento f_y , a relação tensão-deformação é linear e o material encontra-se no regime elástico. Para tensões superiores a f_y , o material escoar, entrando no regime plástico. O significado do termo “escoar” refere-se a um aumento exagerado nas deformações, sem que haja um aumento significativo dos valores de tensão. Talvez a tensão de escoamento seja a mais importante propriedade do aço para o projetista, pois está presente em diversos procedimentos de cálculo.

Mesmo após escoar, o aço continua a resistir a carregamentos crescentes de tração. Diz-se, nesse caso, que o material encrua. A tensão pode aumentar até que o valor de ruptura f_u seja atingido. Não é de interesse do projetista trabalhar na região de encruamento ao longo da peça, para evitar deslocamentos excessivos.

1.7 Estados Limites

A introdução da segurança no projeto estrutural se faz levando em conta os seguintes fatores:

- as incertezas ligadas às ações;
- as incertezas ligadas ao cálculo dos esforços solicitantes (incluindo erros teóricos da análise estrutural, os erros numéricos de cálculo, as imprecisões geométricas construtivas e a variabilidade das características mecânicas de deformabilidade dos materiais estruturais);
- as incertezas ligadas às resistências dos materiais estruturais;
- a responsabilidade da estrutura.

Historicamente, o primeiro método de introdução da segurança no projeto estrutural adotado foi o das tensões admissíveis. Por este método, a segurança é introduzida por meio de um coeficiente de segurança interno α , impondo-se como critério de segurança que as maiores tensões que aparecem por ocasião da utilização da estrutura não ultrapassem o valor das correspondentes tensões nominais de ruptura ou escoamento dos materiais, divididas por $\alpha > 1$. O quociente da tensão de ruptura, ou de escoamento, por α recebe o nome de tensão admissível. O método das tensões admissíveis procura, assim, quantificar todos os fatores que influem na segurança usando um único coeficiente α aplicado nas tensões.

Com o passar do tempo, os projetistas perceberam que seria impossível levar em conta todos os fatores na introdução da segurança no projeto estrutural, de forma racional e coerente, por meio de um único coeficiente. É indispensável a consideração de pelo menos dois coeficientes: o coeficiente de majoração das ações γ , e o coeficiente de minoração das resistências ϕ . Assim, o critério de segurança a adotar é o de que as ações majoradas por γ devem produzir esforços solicitantes que a estrutura possa suportar, mesmo quando estes coexistem com as resistências minoradas por ϕ .

A majoração das ações é feita a partir das chamadas ações nominais ou características S_n (ações que, em geral, têm uma probabilidade de apenas 5% de serem ultrapassadas desfavoravelmente), e a minoração das resistências é feita a partir das chamadas resistências nominais ou características R_n (resistências que, em geral, têm uma probabilidade de apenas 5% de serem ultrapassadas desfavoravelmente). Essa filosofia de projeto denomina-se *método*

dos estados limites que é a base atualmente da norma brasileira NBR 8800, e de muitas outras normas. Para uma dada peça deve-se ter

$$\sum \gamma S_n \leq \phi R_n.$$

Alguns acham bobagem e não econômico projetar estruturas com valores, aparentemente, altos para γ e baixos para ϕ . Entretanto, as incertezas de projeto são tantas que é preferível usá-los a passar noites em claro desejando ter feito o contrário (quem assim procede deve, com razão, denominá-los fatores de ignorância).

O termo estado limite refere-se a uma condição na qual a estrutura, ou parte dela, não mais satisfaz a finalidade para a qual foi projetada. Distinguem-se dois tipos de estado limite: o último e o de utilização. O *estado limite último* corresponde à ruína por ruptura, por plastificação, por instabilidade, por fadiga, por fratura, etc. O *estado limite de utilização* preocupa-se com quesitos que afetam as condições de uso da edificação, tais como deslocamentos, vibrações e deformações.

O estado limite, último ou de utilização, é uma filosofia de projeto usada no mundo inteiro e que veio para substituir aquela baseada nas tensões admissíveis. Os diversos parâmetros envolvidos no cálculo estrutural como, por exemplo, as cargas que atuam na estrutura, as resistências dos materiais constituintes, etc., são variáveis estatísticas que seguem uma certa distribuição de frequência (geralmente, uma distribuição gaussiana). A natureza probabilística desses parâmetros é a base dos estados limites. Hoje, não mencionamos que uma estrutura seja 100% segura. Todo projeto envolve uma dose de risco que se procura fixar dentro de padrões aceitáveis.

A estrutura não deve ser capaz apenas de resistir às cargas de projeto. É necessário, também, que ela resista às cargas de serviço tal que o desempenho da edificação não seja comprometido. Por exemplo, um edifício alto deve ser projetado de forma que os deslocamentos laterais devido ao vento sejam tais que não cause desconforto (medo, enjôo) aos seus ocupantes. Sob o ponto de vista da resistência, o edifício deve ser projetado de tal maneira que ele resista, digamos, ao maior vento já registrado nos últimos 50 anos, mesmo que ele e seus ocupantes sofram avarias.

A norma brasileira enfoca, sobretudo, requisitos de estado limite último, dando, em alguns casos, liberdade ao projetista para exercitar o bom senso quanto ao estado limite de utilização. Isso não significa que os requisitos de utilização sejam de menor importância.

Entretanto, a preocupação com a vida e a segurança das pessoas é, naturalmente, mais restritivo ao projeto. É por isso que as questões referentes à resistência da estrutura não são deixadas para o julgamento do projetista.

1.8 Carregamento

No projeto metálico a tarefa mais difícil e, quiçá, mais importante, é a definição do carregamento, pois toda carga que possa solicitar a edificação deve ser levada em conta.

De uma maneira geral, as cargas são classificadas como *permanentes* ou *variáveis*, dependendo se sua magnitude e direção são constantes ou não. A partir da definição tem-se que o peso próprio da estrutura, dos pisos, das paredes, do revestimento e acabamento, das instalações e equipamentos fixos são cargas permanentes; e que as cargas oriundas do uso e ocupação da edificação, dos equipamentos móveis, das divisórias e do vento são cargas variáveis.

A variabilidade do peso próprio de uma peça depende do controle de qualidade na sua confecção. Se a peça for confeccionada sob rigoroso controle seu peso é dito ser de pequena variabilidade. É impossível saber, *a priori*, a qualidade da confecção de todas as peças da nossa estrutura. Para tanto, a norma NBR 8681 estipula a seguinte regra. Se o peso próprio das peças estruturais for maior do que 75% do peso permanente de toda a edificação, considerar-se-á que o carregamento permanente da edificação é de pequena variabilidade, caso contrário, de grande variabilidade.

Quando de natureza catastrófica, a carga variável é dita *excepcional*. Os ventos extraordinários, as explosões, os impactos, os terremotos, etc. são alguns exemplos.

Segundo a NBR 8800, a máxima solicitação de cálculo $S_{d,máx}$ e a mínima solicitação de cálculo $S_{d,mín}$ são obtidas da seqüência de combinação de carregamentos (L_{C1}, L_{C2}, \dots):

$$S_{d,máx} = \text{máx}(L_{C1}, L_{C2}, \dots) \quad S_{d,mín} = \text{mín}(L_{C1}, L_{C2}, \dots)$$

com

$$L_{Ci} = \sum_j \gamma_{g,j} G_j + \gamma_{q,i} Q_i + \sum_{k \neq i} \psi_k \gamma_{q,k} Q_k.$$

Uma dada combinação consiste de ações permanentes G , ações variáveis Q , fatores de carga γ_g e γ_q , e fatores de combinação ψ . O número de combinações de carregamentos a ser levado

em conta no projeto é igual ao número de cargas variáveis que atuam na estrutura.

É importante observar que não se deve combinar ações excepcionais entre si, nem ações variáveis que não ocorram simultaneamente como, por exemplo, sobrepressão e sucção de vento. Da mesma forma, se uma ação Q_i for desfavorecida por uma ação Q_k , então $\gamma_{q,k} = 0,0$.

Os valores de γ_g , γ_q , ψ são definidos nas Tabelas 1.4 - 1.6. Se o carregamento G_j desfavorece a ação Q_i aplica-se o valor de γ_g mostrado entre parênteses na Tabela 1.4. Se a ação variável Q_k é da mesma natureza de Q_i , tem-se $\psi_k = 1,0$.

Tabela 1.4 Coeficiente γ_g .

Combinação	Ação permanente	
	Grande variabilidade	Pequena variabilidade
Normal	1,4 (0,9)	1,3 (1,0)
Construtiva	1,3 (0,9)	1,2 (1,0)
Excepcional	1,2 (0,9)	1,1 (1,0)

Tabela 1.5 Coeficiente γ_q .

Combinação	Ação variável		
	Requalque	Temperatura	Outros
Normal	1,2	1,2	1,4
Construtiva	1,2	1,0	1,2
Excepcional	0,0	0,0	1,0

Tabela 1.6 Fator de combinação ψ .

Carregamento	
Sobrecarga em pisos de bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8
Cargas de equipamentos e sobrecargas em outros pisos	0,7
Cargas de vento	0,6
Temperatura	0,6
Outros	1,0

Exemplo 1.1 O nó de uma treliça que compõe a estrutura de suporte de um telhado está sujeito às seguintes forças nominais:

- (a) coberta (sobrecarga): $P_{q1} = 6,0$ kN
- (b) carga de vento (sobrepessão): $P_{q2} = 2,0$ kN
- (c) carga de vento (sucção): $P_{q3} = -3,0$ kN
- (d) equipamentos (carga variável): $P_{q4} = 8,0$ kN
- (e) alvenaria (peso próprio): $P_{g1} = 1,0$ kN
- (f) estrutura (peso próprio): $P_{g2} = 0,7$ kN.

Determine a força de cálculo para o estado limite último.

Solução

Na combinação de cargas vamos considerar que o carregamento permanente seja de grande variabilidade, pois $P_{g2} \leq 0,75(P_{g1} + P_{g2})$. Portanto,

$$L_{C1} = 1,4P_{g1} + 1,4P_{g2} + 1,4P_{q1} + 0,6(1,4P_{q2}) + 1,0(1,4P_{q4}) = 24 \text{ kN}$$

$$L_{C2} = 1,4P_{g1} + 1,4P_{g2} + 1,4P_{q2} + 0,7(1,4P_{q1}) + 0,7(1,4P_{q4}) = 19 \text{ kN}$$

$$L_{C3} = 0,9P_{g1} + 0,9P_{g2} + 1,4P_{q3} = -2,7 \text{ kN}$$

$$L_{C4} = 1,4P_{g1} + 1,4P_{g2} + 1,4P_{q4} + 1,0(1,4P_{q1}) + 0,6(1,4P_{q2}) = 24 \text{ kN}.$$

As forças de cálculo para o dimensionamento no estado limite último são $P_{d,\text{máx}} = 24$ kN e $P_{d,\text{mín}} = -2,7$ kN. ■

1.9 Projeto Estrutural

Projeto é uma mistura de arte e ciência: o engenheiro de estruturas se vale de intuição, conhecimento técnico-científico e normas para o desenvolvimento de estruturas que gozem de segurança, funcionalidade e economia.

É essencial o emprego de uma boa norma de projeto, pois ela nos fornece diversas recomendações oriundas de estudos teóricos, ensaios experimentais, e práticas. O projetista deve se habituar à idéia de que as normas não foram feitas para tolher sua criatividade, mas para ser uma valiosa ajuda e guia de trabalho. A norma brasileira para “Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios” NBR8800 (1986) segue em grande parte as recomendações da norma americana “Load and Resistance Factor Design” editada em 1986 pela AISC (*American Institute of Steel Construction*).

O projeto estrutural de uma obra em aço envolve três atividades distintas:

- *Projeto de engenharia*: desenvolve-se a concepção da estrutura, o levantamento das cargas, a análise estrutural e o dimensionamento dos perfis;
- *Projeto de fabricação*: elabora-se desenhos detalhados de todas as peças e componentes da estrutura;
- *Projeto de montagem*: representa-se a estrutura sob a forma de diagramas mostrando a identificação, o posicionamento e a sequência de montagem das peças.

O projeto é também um processo sistemático de busca do ótimo, geralmente com objetivo de reduzir custos. Vamos nos limitar aqui ao projeto de estruturas de peso mínimo (lembre-se que o aço é um material homogêneo, portanto minimização de peso significa minimização de custos). O procedimento iterativo de projeto é classicamente subdividido nas seguintes etapas:

1. *Concepção*: escolha do sistema estrutural (treliça, pórtico, etc.) e de sua geometria (vãos, tipos de perfis, etc.);
2. *Predimensionamento*: escolha das seções transversais dos perfis por meio de tabelas dos fornecedores;
3. *Determinação do carregamento*: avaliação das cargas e dos coeficientes de ponderação para obtenção das condições de carregamento;
4. *Análise*: obtenção dos deslocamentos, deformações e tensões nas peças;
5. *Verificação*: avaliação do atendimento de todos os critérios de projeto;
6. *Reanálise*: proposição de novas seções transversais, se necessário, e retorno ao passo 3.

O uso de recursos computacionais no projeto é corriqueiro. Entretanto, o conhecimento e o discernimento do engenheiro são, talvez, as únicas ferramentas indispensáveis para a realização de um bom projeto.