

O objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações na estrutura (esforços normais, cortantes, fletores, torsores e deslocamentos), visando efetuar verificações de estados limites últimos e de serviço.

A análise estrutural deve ser feita com um modelo que permita representar a resposta da estrutura e dos materiais estruturais, levando-se em conta todos os esforços solicitantes relevantes.

Análises mais refinadas como, por exemplo, a interação solo-estrutura e o comportamento semirrígido das ligações, devem ser consideradas em casos onde a resposta aproximada a essas e outras solicitações não seja satisfatória.

3.1 Tipos de Análise Estrutural

O tipo de análise estrutural pode ser classificado de acordo com considerações do comportamento do material e dos efeitos dos deslocamentos da estrutura.

Quanto aos materiais

Os esforços internos podem ser determinados por:

- a) Análise global elástica (diagrama tensão-deformação elástico-linear);
- b) Análise global plástica: diagrama tensão-deformação rígido-plástico, elastoplástico perfeito ou elastoplástico não-linear.

A análise global elástica é sempre permitida, de acordo com a NBR 8800, mesmo que os esforços resistentes da seção transversal sejam avaliados considerando-se a plasticidade.

A mesma norma também permite o uso de uma análise global plástica para seções compactas (definidas em 3.5), desde que as seções e as ligações possuam capacidade de rotação suficiente para formação de rótulas plásticas e redistribuição de esforços solicitantes. A estabilidade da estrutura deve ser verificada para essa condição.

A não-linearidade do material pode ser considerada em alguns casos, de forma indireta, efetuando-se uma análise elástica reduzindo-se a rigidez das barras.

Por fim, a NBR 8800 permite o uso da redistribuição de momentos em vigas.

Quanto ao efeito dos deslocamentos

Em relação aos deslocamentos, a NBR 8800 usa a seguinte classificação:

P- Δ deslocamentos horizontais dos nós da estrutura ou efeitos globais de segunda ordem;

P- δ deslocamentos decorrentes da não-retilidade dos eixos das barras ou efeitos locais de segunda ordem.

Os esforços internos podem ser determinados por:

- a) Análise com efeitos de primeira ordem, com base na geometria indeformada da estrutura;

b) Análise com efeitos de segunda ordem, com base na geometria deformada da estrutura.

A análise com efeitos de segunda ordem deve ser usada sempre que os deslocamentos afetarem de forma significativa os esforços internos.

Métodos de análise que podem ser utilizados para a avaliação dos efeitos de segunda ordem de acordo com a NBR 8800, são os que consideram direta ou indiretamente a influência da geometria deformada da estrutura (efeitos P- δ e P- Δ), das imperfeições iniciais, do comportamento das ligações e da redução de rigidez dos elementos componentes (quer pela não-linearidade do material, quer pelo efeito das tensões residuais).

3.2 Classificação das estruturas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais

As estruturas são classificadas quanto à sensibilidade a deslocamentos laterais em estruturas de pequena deslocabilidade, média deslocabilidade ou grande deslocabilidade.

Para a classificação utiliza-se uma relação entre o deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem, Δ_2 , e aquele obtido na análise de primeira ordem, Δ_1 , considerando todos os andares, verificado para cada um, e todas as combinações últimas de ações (Normais, Especiais e Excepcionais)

Estruturas de Pequena Deslocabilidade:

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \leq 1,1 \quad (3.1)$$

Estruturas de Média Deslocabilidade:

$$1,1 \leq \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \leq 1,4 \quad (3.2)$$

Estruturas de Grande Deslocabilidade:

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \geq 1,4 \quad (3.3)$$

Aproximação do Deslocamento Lateral

O deslocamento lateral do andar relativo à base obtido na análise de segunda ordem e aquele obtido na análise de primeira ordem, pode ser aproximado de maneira aceitável pelo coeficiente B_2 , em a consideração das imperfeições iniciais de material, sendo:

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \cong B_2 = \frac{1}{1 - \frac{1}{R_s} \frac{\Delta_h}{H} \sum N_{Sd} \sum H_{Sd}} \quad (3.4)$$

na qual:

$\sum N_{Sd}$ é carga gravitacional total que atua no andar considerado, englobando as cargas atuantes nas subestruturas de contraventamento e nos elementos que não pertençam a essas subestruturas;

R_s é um coeficiente de ajuste, igual a 0,85 nas estruturas onde o sistema resistente a ações horizontais é constituído apenas por subestruturas de contraventamento formadas por pórticos nos quais a estabilidade lateral é assegurada pela rigidez à flexão das barras e pela capacidade de transmissão de momentos das ligações e igual a 1,0 para todas as outras estruturas;

Δ_h é o deslocamento horizontal relativo entre os níveis superior e inferior (deslocamento interpavimento) do andar considerado, obtido da análise de primeira ordem, na estrutura original. Se Δ_h possuir valores diferentes em um mesmo andar, deve ser tomado um valor ponderado para esse deslocamento, em função da proporção das cargas gravitacionais atuantes ou, de modo conservador, o maior valor;

$\sum H_{Sd}$ é a força lateral no andar, produzida pelas forças horizontais de cálculo atuantes, usadas para determinar Δ_h e obtida na estrutura original;

H é a altura do andar (distância entre eixos de vigas de dois andares consecutivos ou entre eixos de vigas e a base, no caso do primeiro andar).

3.3 Sistemas Resistentes a Ações Horizontais

Por conveniência de análise, é possível identificar, dentro da estrutura, subestruturas que, devido à sua grande rigidez a ações horizontais, resistem à maior parte ou até a totalidade dessas ações, sobrando às demais partes da estrutura apenas o efeito das cargas verticais.

Subestruturas de contraventamento: são responsáveis por absorver os esforços horizontais, podem ser pórticos em forma de treliça, paredes de cisalhamento, incluindo aquelas que delimitam os núcleos de serviço dos edifícios, e pórticos nos quais a estabilidade é assegurada pela rigidez à flexão das barras e pela capacidade de transmissão de momentos das ligações.

Elementos contraventados: são os demais elementos da edificação, elementos que não participam dos sistemas resistentes a ações horizontais. As forças que estabilizam esses elementos devem ser transferidas para as subestruturas de contraventamento e ser consideradas no dimensionamento destas últimas.

Os elementos que não dependem das subestruturas de contraventamento para sua estabilidade são ditos elementos isolados. São elementos cujo comportamento independe do restante da estrutura. Elementos contraventados podem ser tratados também como elementos isolados.

3.4 Exigências de projeto para a estabilidade das barras componentes da estrutura

Estabilidade individual dos componentes da estrutura

A estabilidade individual dos componentes da estrutura e as imperfeições locais desses elementos já estão incorporadas às expressões de dimensionamento na NBR 8800.

Elementos de Contenção Lateral

Os elementos projetados para conter lateralmente vigas e pilares em alguns pontos, definindo comprimentos destravados entre esses pontos, devem atender às exigências de resistência e rigidez.

Essas exigências podem ser substituídas por uma análise de segunda ordem, que inclua as imperfeições geométricas iniciais das vigas e pilares a serem contidos lateralmente.

Imperfeições Geométricas Iniciais

Caso se opte por incluir as imperfeições geométricas dos elementos contidos lateralmente a utilizar as exigências de rigidez, essas imperfeições geométricas iniciais devem ser tomadas na forma de uma imperfeição equivalente global de $\Delta = L/500$ ou local de $\delta = L/1000$, conforme o tipo de contenção adotado, onde L é o comprimento destravado do elemento.

Se os elementos forem projetados para conter lateralmente mais de um pilar ou viga, devem ser considerados os efeitos das imperfeições de todos esses pilares ou vigas multiplicados pelo fator de redução α_{red} , dado por:

$$\alpha_{red} = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \quad (3.5)$$

onde m é o número de pilares ou vigas a serem contidos lateralmente.

Permite-se também que as imperfeições geométricas sejam representadas por forças equivalentes, denominadas forças nocionais, que provoquem, nas vigas e pilares a serem contidos lateralmente, efeitos equivalentes aos das referidas imperfeições, como exemplificado na Figura 3.1.

Esses efeitos devem ser encarados como valores mínimos para cálculo do sistema de travamento, mas não precisam ser adicionados às demais forças atuantes nele.

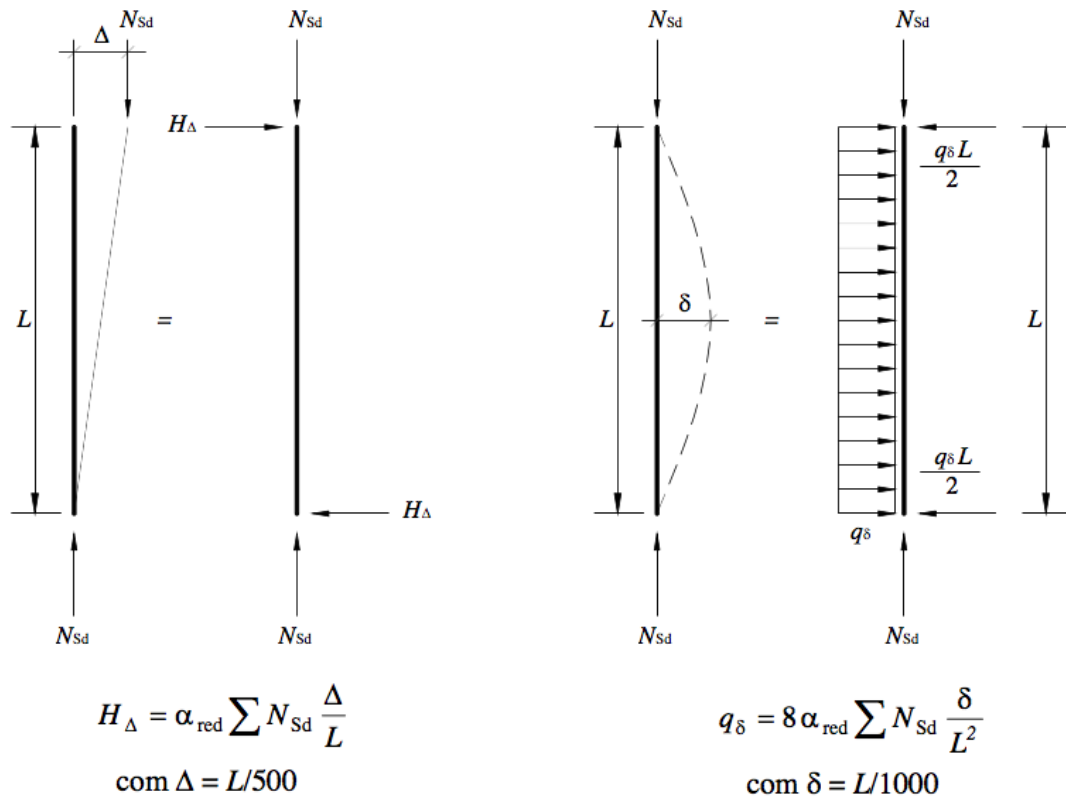


Figura 3.1: Forças Equivalentes (Nocionais)

3.5 Considerações para o Dimensionamento

Contenção Lateral

Um ponto de contenção lateral pode ser:

- Um nó de uma barra de uma subestrutura de contraventamento formada por um pórtico em forma de treliça ou por um pórtico no qual a estabilidade é assegurada pela rigidez à flexão das barras e pela capacidade de transmissão de momentos das ligações;
- Um ponto qualquer das subestruturas de contraventamentos citadas na alínea a) devidamente ligado a um nó dessas subestruturas;
- Um nó de um elemento contraventado devidamente ligado a uma subestrutura de contraventamento.

Esforços Solicitantes

A determinação dos esforços solicitantes, para as combinações últimas de ações, deve ser realizada por meio de análise elástica de segunda ordem. Para estruturas de pequena deslocabilidade, pode ser feita análise de primeira ordem.

Classificação das seções transversais

As seções transversais quando submetidas à compressão ou à flexão podem ser classificadas de acordo com a possibilidade da ocorrência de falhas por instabilidades antes de atingir a resistência última (seção transversal totalmente plastificada). Essa classificação é feita em função do parâmetro de esbeltez, λ , que relaciona larguras de partes da seção transversal com suas respectivas espessuras.

Dependendo do valor do parâmetro de esbeltez λ dos componentes comprimidos em relação ao parâmetro de esbeltez de plastificação λ_p , que indica a esbeltez limite para que a seção seja completamente plastificada, e do parâmetro de esbeltez elástico λ_r , que indica a esbeltez limite para que não ocorra plastificação da seção transversal, as seções transversais são classificadas em:

Compactas: seções com todos os elementos comprimidos com λ não superior a λ_p e cujas mesas são ligadas continuamente à(s) alma(s) ($\lambda \leq \lambda_p$). As seções compactas são capazes de desenvolver uma distribuição de tensões totalmente plástica, com grande rotação antes do início da flambagem local. Essas seções

são adequadas para análise plástica, devendo no entanto, para esse tipo de análise, ter um eixo de simetria no plano do carregamento quando submetidas à flexão, e ser duplamente simétricas quando submetidas à força axial de compressão, figura 3.2;

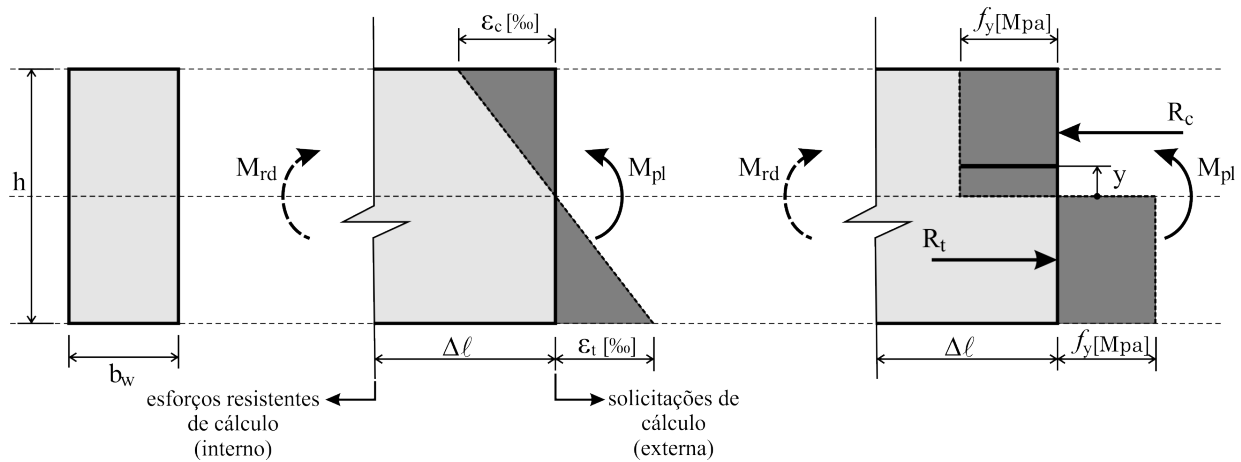


Figura 3.2: Desenvolvimento de Tensões de flexão em uma seção Compacta.

Semicompactas: seções que possuem um ou mais elementos comprimidos com λ excedendo λ_p , mas não λ_r ($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$). Nas seções semicompactas, os elementos comprimidos podem atingir a resistência ao escoamento, levando-se em conta as tensões residuais, antes que a flambagem local ocorra, mas não apresentam grande capacidade de rotação, figura 3.3;

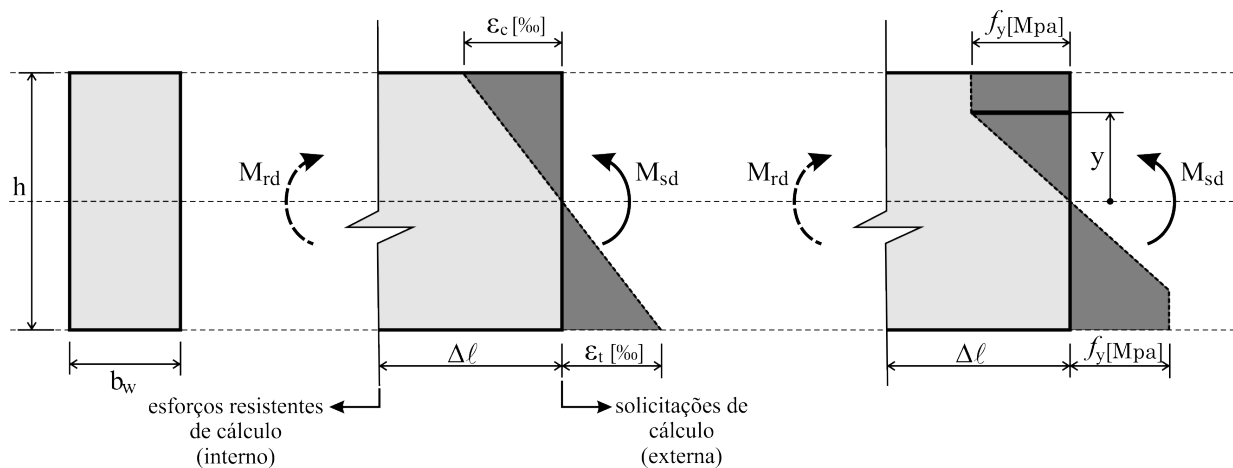


Figura 3.3: Desenvolvimento de Tensões de flexão em uma seção Semicompacta.

Esbeltas: seções que possuem um ou mais elementos comprimidos com λ excedendo λ_r ($\lambda > \lambda_r$). Nas seções esbeltas, um ou mais elementos comprimidos apresentam instabilidades em regime elástico, levando-se em conta as tensões residuais, figura 3.4.

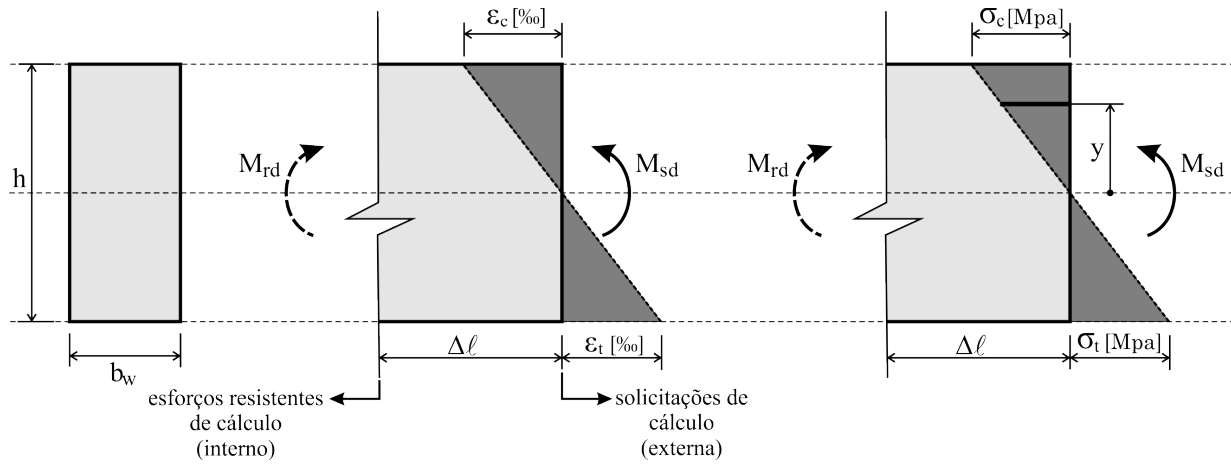


Figura 3.4: Desenvolvimento de Tensões de flexão em uma seção Esbelta, σ_c e σ_t são no máximo iguais a f_y .

Tipos e parâmetro de esbeltez de elementos componentes

Para efeito de flambagem local, os elementos componentes das seções transversais usuais, exceto as seções tubulares circulares, são classificados em:

AA quando possuem duas bordas longitudinais vinculadas, figura 3.5;

AL quando possuem apenas uma borda longitudinal vinculada, figura 3.6.

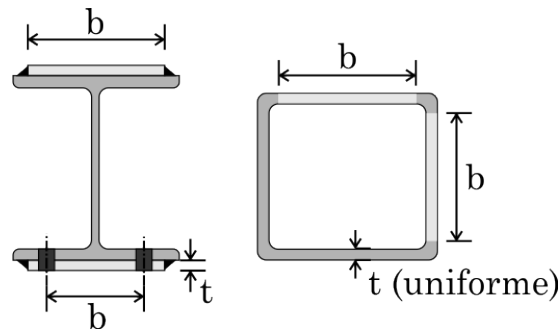


Figura 3.5: Exemplo de elementos AA na seção transversal.

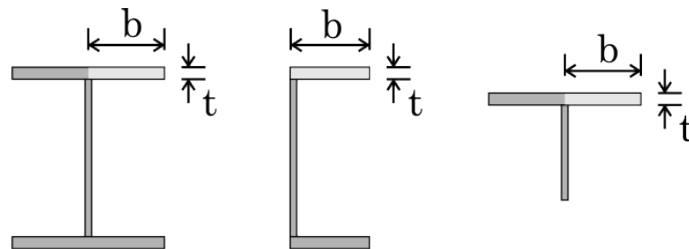


Figura 3.6: Exemplo de elementos AL na seção transversal.

O parâmetro de esbeltez λ dos elementos componentes da seção transversal é definido pela relação entre largura e espessura (relação b/t).

A largura b de alguns dos elementos AA mais comuns deve ser tomada como a seguir:

- Para almas de seções I, H ou U laminadas, a distância livre entre mesas menos os dois raios de concordância entre mesa e alma;
- para almas de seções I, H, U ou caixão soldadas, a distância livre entre mesas;
- para mesas de seções caixão soldadas, a distância livre entre as faces internas das almas;

- d) para almas e mesas de seções tubulares retangulares, o comprimento da parte plana do elemento (se esse comprimento não é conhecido, pode ser tomado como a largura total medida externamente menos três vezes a espessura);
- e) para chapas, a distância entre linhas paralelas de parafusos ou solda.

A largura b de alguns dos elementos AL mais comuns deve ser tomada como a seguir:

- a) para mesas de seções I, H e T, a metade da largura total da mesa;
- b) para abas de cantoneiras e mesas de seções U, a largura total do elemento;
- c) para chapas, a distância da borda livre à primeira linha de parafusos ou de solda;
- d) para almas de seções T, a altura total da seção transversal (altura da alma mais a espessura da mesa).

Flechas e Rotações na seção transversal

A norma NBR 8800 adota em suas considerações que os eixos das rotações na seção transversal e as direções dos comprimentos destravados são os mesmos. Uma forma de entender isso é que o comprimento destravado é definido em função da rotação da seção transversal, por exemplo, se a deflexão da peça ocorrer com rotações em torno do eixo x , idealiza-se que a deformada está associada diretamente a esse giro e portanto o comprimento destravado medido com essa deformada seria chamado de $L_{b,x}$.

Essa consideração segue a risca a ideia do giro da seção transversal em torno de um eixo de flexão, ao qual estão relacionadas as propriedades geométricas como inércia e raio de giração, porém viola o conceito de comprimento destravado ou comprimento de flambagem (quando se aplicar).

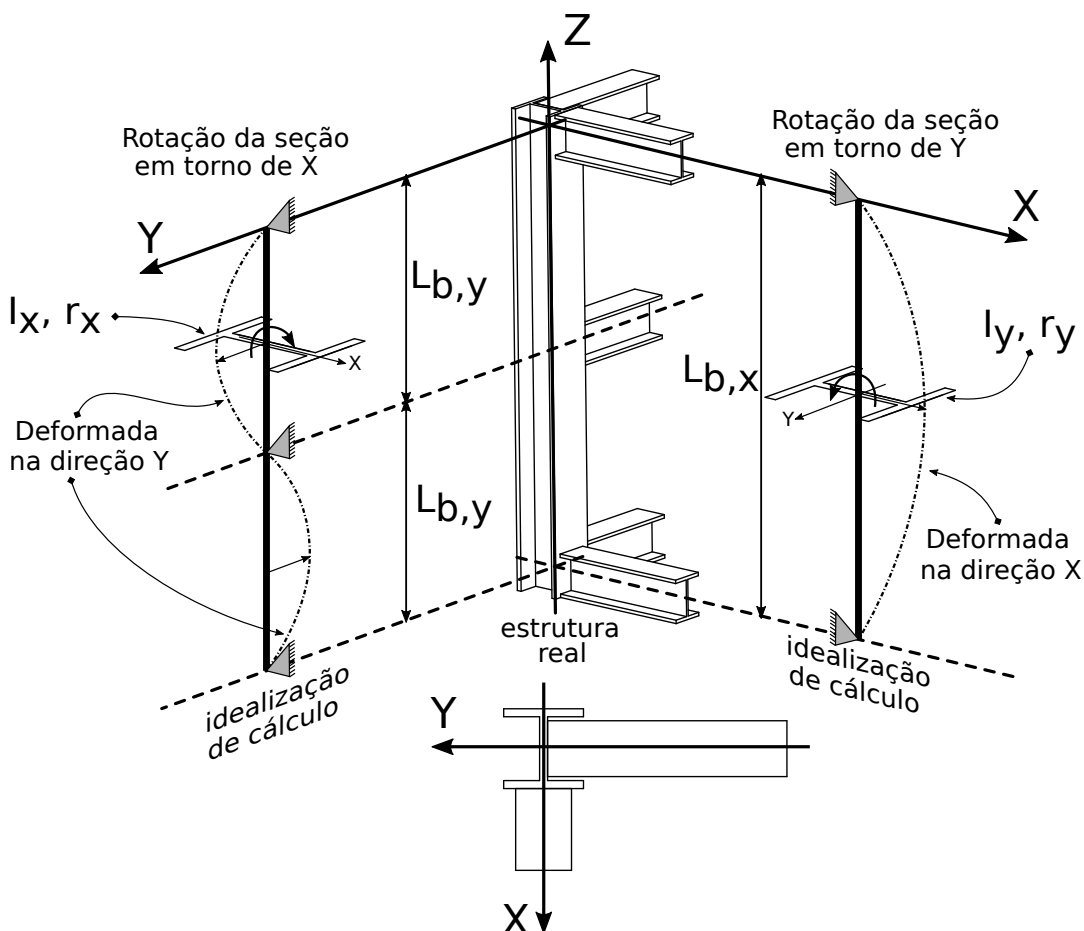


Figura 3.7: Ilustração das direções das flechas e das respectivas rotações na seção transversal.

A figura 3.7 ilustra as definições tanto do giro da seção na flexão em torno de um eixo quando às do comprimento destravado ou comprimento de flambagem (quando se aplicar).

Observe que pela definição a inércia, I , e o raio de giração, r ,¹ são calculados em torno de um eixo, ou seja, I_x e r_x é em torno de x , formato presente em muitas tabelas de perfis de diversos fabricantes. O comprimento destravado, $L_{b,x}$, conforme visto anteriormente, é definido como a distância entre dois pontos de contenção lateral ou entre um ponto de contenção lateral e uma extremidade (ligação) e que, portanto, deve ser medido na direção do eixo da contenção lateral ou ligação de extremidade. Esses pontos de contenção lateral ou ligações de extremos são idealizados como apoios no modelo estrutural, os quais seguem a mesma direção da contenção ou ligação original. Como a definição do comprimento destravado e também do comprimento de flambagem seguem a disposição desses apoios, devem ser medidos no mesmo plano ou mesma direção.

Resumindo, se o comprimento destravado é medido na direção x , plano X-Z, $L_{b,x}$, o raio de giração deve ser tomado em torno do eixo y , r_y , utilizando-se assim a correta definição de ambos os termos.

¹O raio de giração é definido como $r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_g}}$ ou $r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_g}}$, sendo A_g a área bruta da seção transversal e I_x ou I_y as inércias.