

8 FLAMBAGEM

É o fenômeno que ocorre quando uma carga axial de compressão, atuando em uma barra, ocasiona uma flexão lateral, na direção do menor raio de giração de sua seção transversal, rompendo a peça com uma carga menor que a carga de ruptura a compressão simples.

8.1 ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS

Seja a coluna AB de comprimento L para suportar uma dada força P (Figura 8.1). A coluna é articulada em ambas as extremidades e P é uma força axial centrada, ou seja, aplicada no centroide da seção transversal. Se a área da seção transversal A da coluna é selecionada de maneira que o valor $\sigma = P/A$ da tensão em uma seção transversal seja menor do que a tensão admissível σ_{adm} para o material usado, e se a deformação axial $\delta = PL/AE$ estiver dentro das especificações dadas, podemos concluir que a coluna foi projetada corretamente.

No entanto, na medida em que o carregamento é aplicado, a coluna pode flambar, ou seja, em vez de permanecer reta, ela subitamente se curvará de maneira acentuada (Figura 8.1). Portanto, uma coluna que sofreu flambagem sob a ação de uma força que ela deveria suportar não foi projetada corretamente.

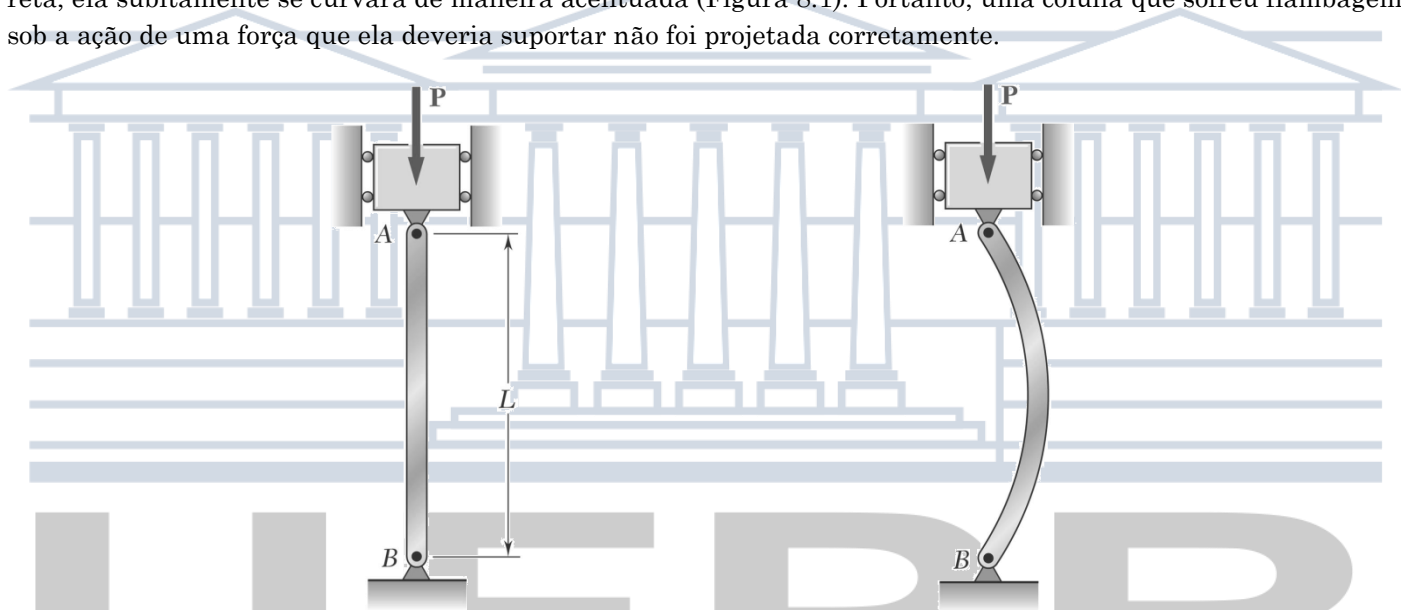


Figura 8.1: Coluna com carga centrada sofrendo flambagem.

A avaliação desse deslocamento lateral será feita considerando-se um modelo simplificado de duas barras rígidas AC e BC conectadas em C por um pino e uma mola de torção com constante de rigidez K, conforme ilustra a Figura 8.2.

Se as duas barras e as duas forças P e P' estiverem perfeitamente alinhadas, o sistema permanecerá na posição de equilíbrio mostrada na Figura 8.3a enquanto não for perturbado. Caso C seja movimentado ligeiramente para a direita, de maneira que cada barra forme agora um pequeno ângulo $\Delta\theta$ com a vertical (Figura 8.3b), o sistema poderá se afastar ainda mais daquela posição. No primeiro caso, dizemos que o sistema é estável e, no segundo, que ele é instável.

Para determinar se o sistema constituído de duas barras é estável ou instável, consideram-se os esforços que atuam na barra AC (Figura 8.3c). Esses esforços consistem em dois momentos, um formado por P e P' de valor $P(L/2)\sin \Delta\theta$, que tende a afastar a barra da linha vertical, e outro momento M exercido pela mola, que tende a trazer a barra de volta para sua posição vertical original. Como o ângulo de deflexão da mola é $2\Delta\theta$, o momento M é $M = K(2 \Delta\theta)$. Se o segundo momento for maior do que o primeiro, o sistema tende a retornar à sua posição original de equilíbrio, o sistema nesse caso é estável. Se o primeiro momento for maior do que o do segundo, o sistema tende a se afastar de sua posição de equilíbrio original sendo, nesse caso, instável. O valor da carga para o qual os dois momentos se equilibram é chamado de carga crítica e é representado por P_{cr} .

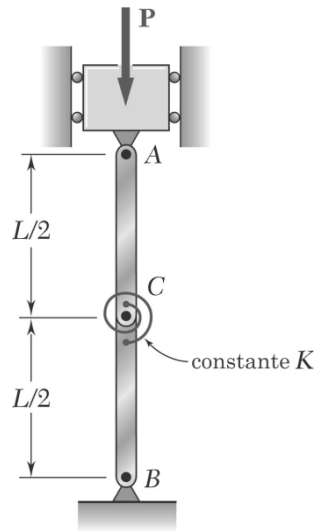


Figura 8.2: Modelo simplificado para análise da flambagem.

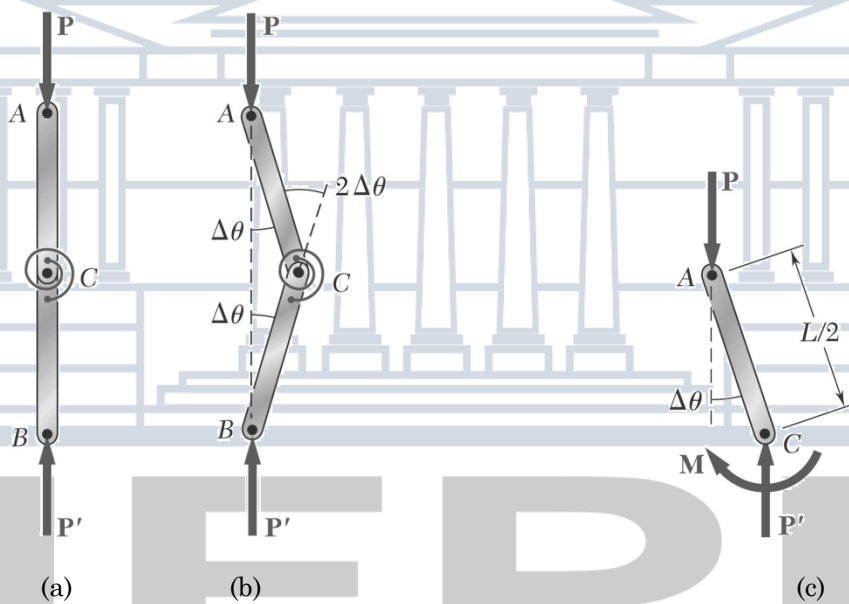


Figura 8.3: Modelo simplificado de flambagem. Equilíbrio estável (a), equilíbrio instável (b) e esforços internos na articulação (c).

O valor de P_{cr} é calculado igualando-se os dois momentos, ou seja:

$$P_{cr} \left(\frac{L}{2} \right) \sin \Delta\theta = K(2\Delta\theta)$$

Equação 8.1

Como está se considerando pequenas deformações, pode-se admitir que $\sin \Delta\theta \cong \Delta\theta$, portanto:

$$P_{cr} = 4 \frac{K}{L}$$

Equação 8.2

O sistema é estável para cargas $P < P_{cr}$ e é instável para cargas $P > P_{cr}$.

Supondo que o sistema seja perturbado a tal ponto que saia do equilíbrio estável, ou seja, a carga P aplicada é maior que a carga crítica P_{cr} . Nesse caso o sistema se afastará da vertical e, após algumas oscilações, se

estabilizará em uma nova posição de equilíbrio, conforme ilustra a Figura 8.4a.

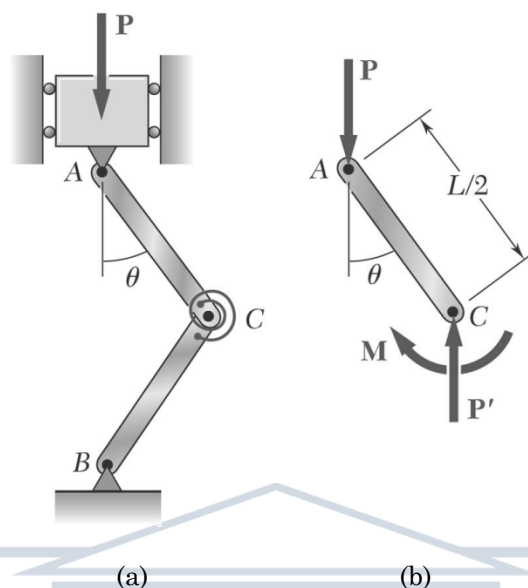


Figura 8.4: Posição de equilíbrio instável (a) e esforços internos na articulação (b).

Considerando o equilíbrio do corpo livre AC (Figura 8.4b), obtém-se uma equação similar à Equação 8.1, mas envolvendo o ângulo finito θ , ou seja:

$$P \left(\frac{L}{2} \right) \sin \theta = K(2\theta)$$

Equação 8.3

ou

$$\frac{PL}{4K} = \frac{\theta}{\sin \theta}$$

Equação 8.4

O valor de θ correspondente à posição de equilíbrio representada na Figura 8.4 é obtido resolvendo a Equação 8.4 por tentativa e erro. Mas observado que, para qualquer valor positivo de θ , tem-se $\sin \theta < \theta$, a Equação 8.4 resulta em um valor de θ diferente de zero somente quando o membro esquerdo da equação for maior do que 1. Lembrando-se da Equação 8.2, nota-se que esse é o caso de equilíbrio instável, pois foi assumido que $P > P_{cr}$.

No entanto, se tivesse sido considerado que $P < P_{cr}$, a segunda posição de equilíbrio mostrada na Figura 8.4 não existiria e a única posição de equilíbrio possível seria a correspondente a $\theta = 0$. Verifica-se então que, para $P < P_{cr}$, a posição $\theta = 0$ deve ser estável.

8.2 FÓRMULA DE EULER

Retornando à coluna AB considerada na seção anterior (Figura 8.1), o objetivo é determinar o valor crítico da força P, isto é, o valor P_{cr} da força para o qual a posição mostrada na Figura 8.1 deixa de ser estável. Se $P > P_{cr}$, o menor desalinhamento ou perturbação fará a coluna flambar, isto é, a coluna assumirá outra configuração de equilíbrio como a mostrada na Figura 8.1. Para tal determinação, deve-se definir as condições sob as quais a configuração da flambagem é possível.

Como a coluna pode ser considerada uma barra colocada em uma posição vertical e submetida a uma força axial, chamando de x a distância da extremidade A da coluna até um dado ponto Q de sua linha neutra, e de y a deflexão desse ponto (Figura 8.5). Consequentemente, o eixo x será vertical e orientado para baixo, e o eixo y

horizontal e orientado para a direita.

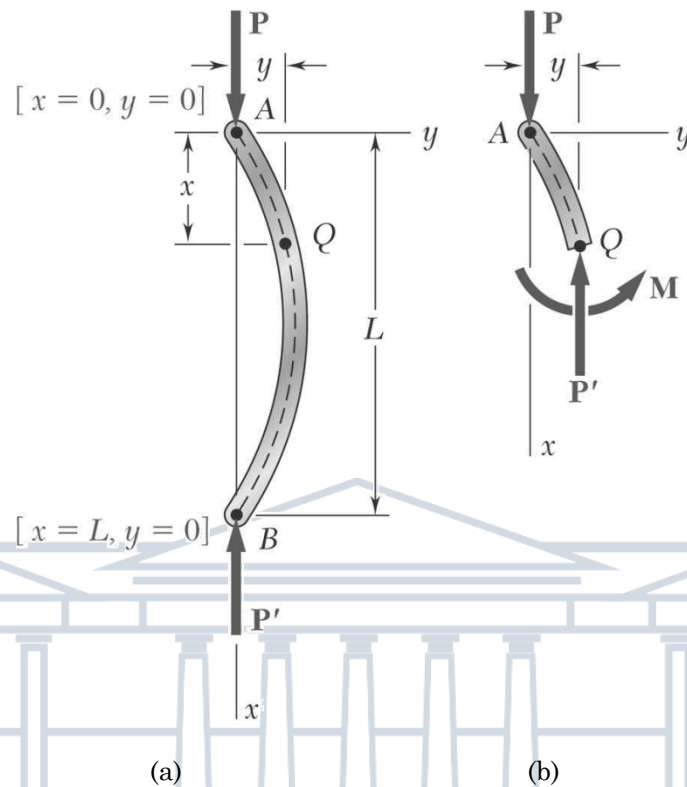


Figura 8.5: Diagrama de corpo livre da coluna (a) e o diagrama de corpo livre no ponto Q (b).

Considerando o equilíbrio do corpo livre AQ (Figura 8.5b), conclui-se que o momento fletor em Q é $M = -Py$. Substituindo esse valor de M na equação diferencial da linha neutra, Equação 4.56, chega-se a:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = -\frac{P}{EI}y$$

Equação 8.5

Transpondo o último termo e chamando de $p^2 = -P/EI$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + p^2y = 0$$

Equação 8.6

Essa é uma equação diferencial linear homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes, que é a mesma equação diferencial para movimento harmônico simples exceto, naturalmente, que a variável independente agora é a distância x e não o tempo t . A solução geral da equação é:

$$y(x) = C_1 \sin(px) + C_2 \cos(px)$$

Equação 8.7

Os coeficientes C_1 e C_2 da Equação 8.7 são calculados em função das condições de contorno nas extremidades A e B da coluna. A primeira condição de contorno, de acordo com os eixos da Equação 8.5a, é em $x = 0, y = 0$. Substituindo esses valores na Equação 8.7, chega-se a conclusão de que $C_2 = 0$. A segunda condição de contorno é em $x = L, y = 0$. Substituindo na Equação 8.7, obtém-se:

$$C_1 \sin(pL) = 0$$

Equação 8.8

Essa equação é satisfeita se $C_1 = 0$, ou se $\sin(pL) = 0$. Se a primeira dessas condições é satisfeita, a Equação 8.7 se reduz a $y = 0$ e a coluna estará reta. Para que a segunda condição seja satisfeita, devemos ter $pL = n\pi$, ou substituindo $p = (-P/EI)^{1/2}$ e resolvendo para P :

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}$$

Equação 8.9

O menor dos valores de P é aquele correspondente a $n = 1$, portanto:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Equação 8.10

A expressão obtida é conhecida como fórmula de Euler, em homenagem ao matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783).

Se $P < P_{cr}$, a condição $\sin(pL) = 0$ não pode ser satisfeita, e a solução dada pela Equação 8.8 não existe. Portanto, $C_1 = 0$, é a única configuração possível para a coluna, sendo a configuração reta. Assim, para $P < P_{cr}$, a configuração reta da é estável.

No caso de uma coluna com seção transversal circular ou quadrada, o momento de inércia I da seção transversal em relação a qualquer eixo que passa pelo centroide será o mesmo, e a coluna poderá então flambar em qualquer um dos planos, exceto pelas restrições que poderão ser impostas pelos vínculos nas extremidades. Para outras formas de seção transversal, a força crítica deve ser calculada fazendo $I = I_{\min}$ na Equação 8.10. Se ocorrer a flambagem, ela será em um plano perpendicular ao eixo principal de inércia correspondente."

O valor da tensão correspondente à força crítica é chamado de tensão crítica e é representado por σ_{cr} . Fazendo $I = Ai^2$, em que A é a área da seção transversal e i o seu raio de giração:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E Ai^2}{AL^2}$$

Equação 8.11

ou

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/i)^2}$$

Equação 8.12

A relação L/i é chamada de índice de esbeltez da coluna. Claramente o valor mínimo do raio de giração i deverá ser usado no cálculo do índice de esbeltez e da tensão crítica em uma coluna.

8.3 FÓRMULA DE EULER PARA DIFERENTES APOIOS

8.3.1 COLUNA ENGASTADA NA BASE E LIVRE NO TOPO

No caso de uma coluna com uma extremidade livre A suportando uma força P e uma extremidade engastada B

(Figura 8.6a), observamos que a coluna se comportará como a metade superior de uma coluna biarticulada (Figura 8.6b). A força crítica para a coluna da Figura 8.6a é então a mesma da coluna biarticulada da Figura 8.6b e pode ser obtida por meio da fórmula de Euler, usando um comprimento de coluna igual a duas vezes o comprimento L real da coluna dada.

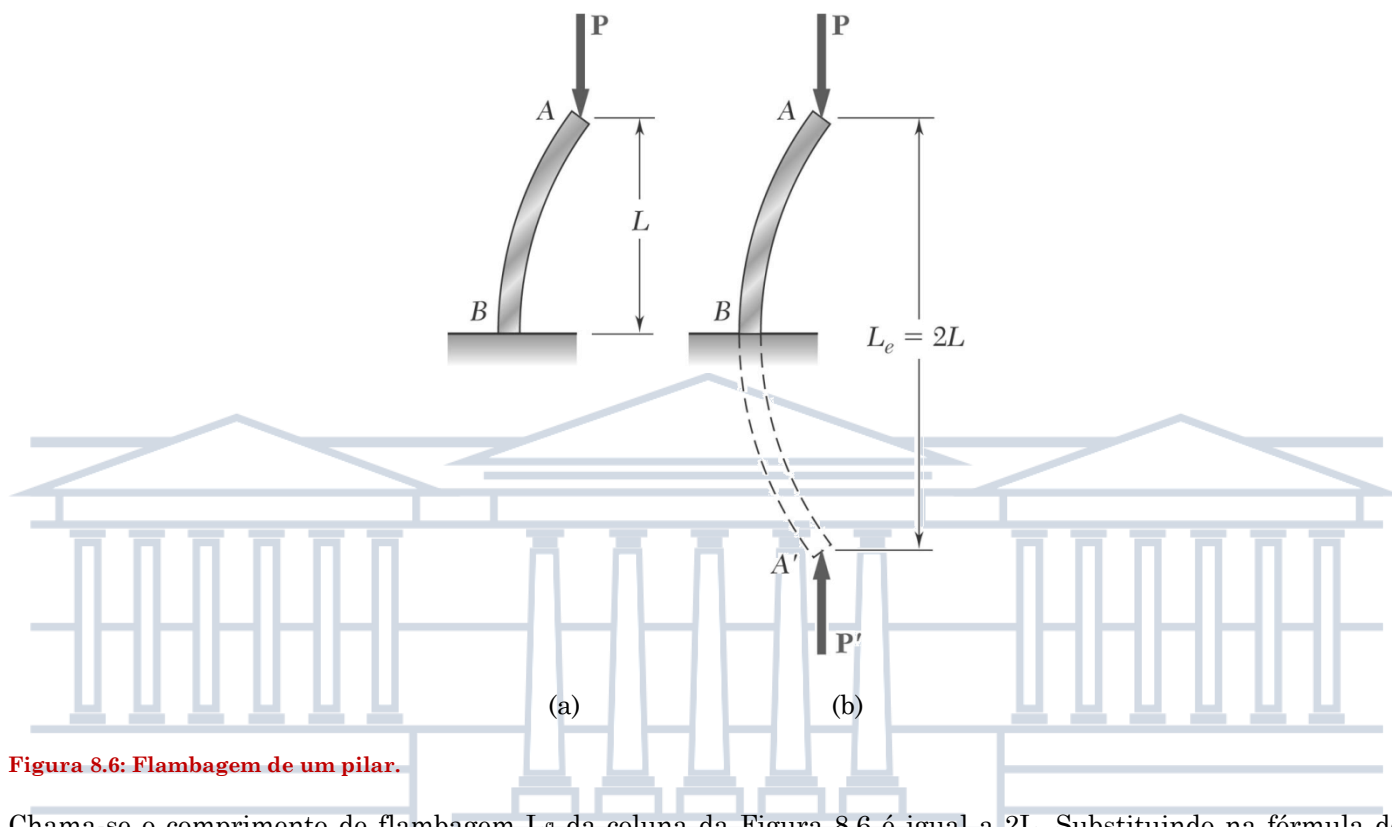


Figura 8.6: Flambagem de um pilar.

Chama-se o comprimento de flambagem L_{fl} da coluna da Figura 8.6 é igual a $2L$. Substituindo na fórmula de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{fl}^2}$$

Equação 8.13

A tensão crítica é encontrada de uma maneira análoga por meio da equação:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L_{fl}/i)^2}$$

Equação 8.14

A relação L_{fl}/i é chamada de índice de esbeltez da coluna e, no caso considerado aqui, é igual a $2L/i$.

8.3.2 COLUNA ENGASTADA NA BASE E NO TOPO

Considerando em seguida uma coluna com duas extremidades engastadas A e B suportando uma força P (Figura 8.7a). A simetria dos vínculos e do carregamento em relação a um eixo horizontal que passa pelo ponto médio C requer que a força cortante em C e as componentes horizontais das reações em A e B sejam zero (Figura 8.7b). Conclui-se que as restrições impostas na metade superior AC da coluna pelo engastamento em A e pela metade inferior CB são idênticas (Figura 8.7c). A parte AC deve, portanto ser simétrica em relação ao seu ponto médio D, e esse ponto deve ser um ponto de inflexão, em que o momento fletor é zero.

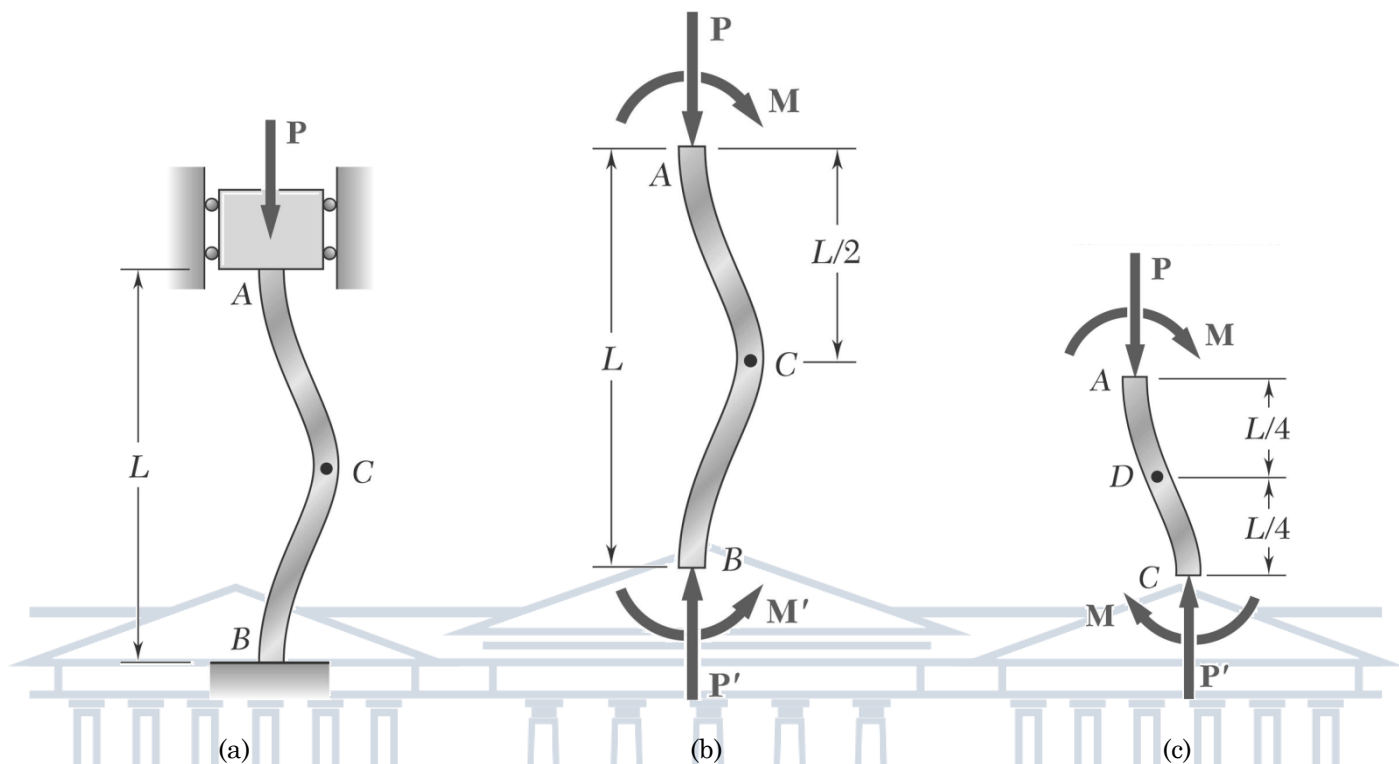


Figura 8.7: Coluna biengastada (a), diagrama de corpo livre (b) e esforços internos em C (c).

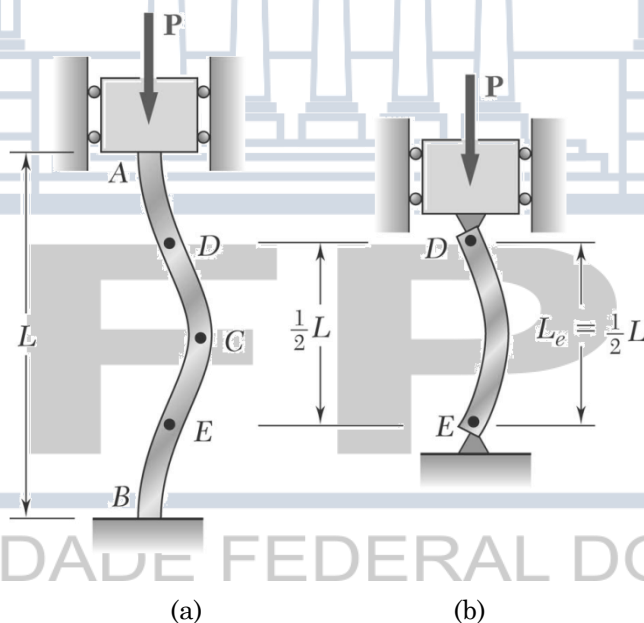


Figura 8.8: Comportamento da coluna biengastada na região central.

Um raciocínio similar mostra que o momento fletor no ponto médio E da metade inferior da coluna também deve ser zero (Figura 8.8a). Como o momento fletor nas extremidades de uma coluna biarticulada é zero, conclui-se que a parte DE da coluna da Figura 8.8a deve se comportar como uma coluna biarticulada (Figura 8.8b). Conclui-se então que o comprimento de flambagem de uma coluna com duas extremidades engastadas é $L_{fl} = L/2$.

8.3.3 COLUNA COM UMA EXTREMIDADE ENGASTADA E UMA ARTICULADA

No caso de uma coluna com uma extremidade engastada B e uma extremidade articulada A suportando uma força P (Figura 8.9a), devemos escrever e resolver a equação diferencial da linha neutra para determinar o comprimento de flambagem da coluna. No diagrama de corpo livre da coluna inteira (Figura 8.9b), observamos em primeiro lugar que uma força transversal V atua na extremidade A, além da força axial P, e que V é

estaticamente indeterminada.

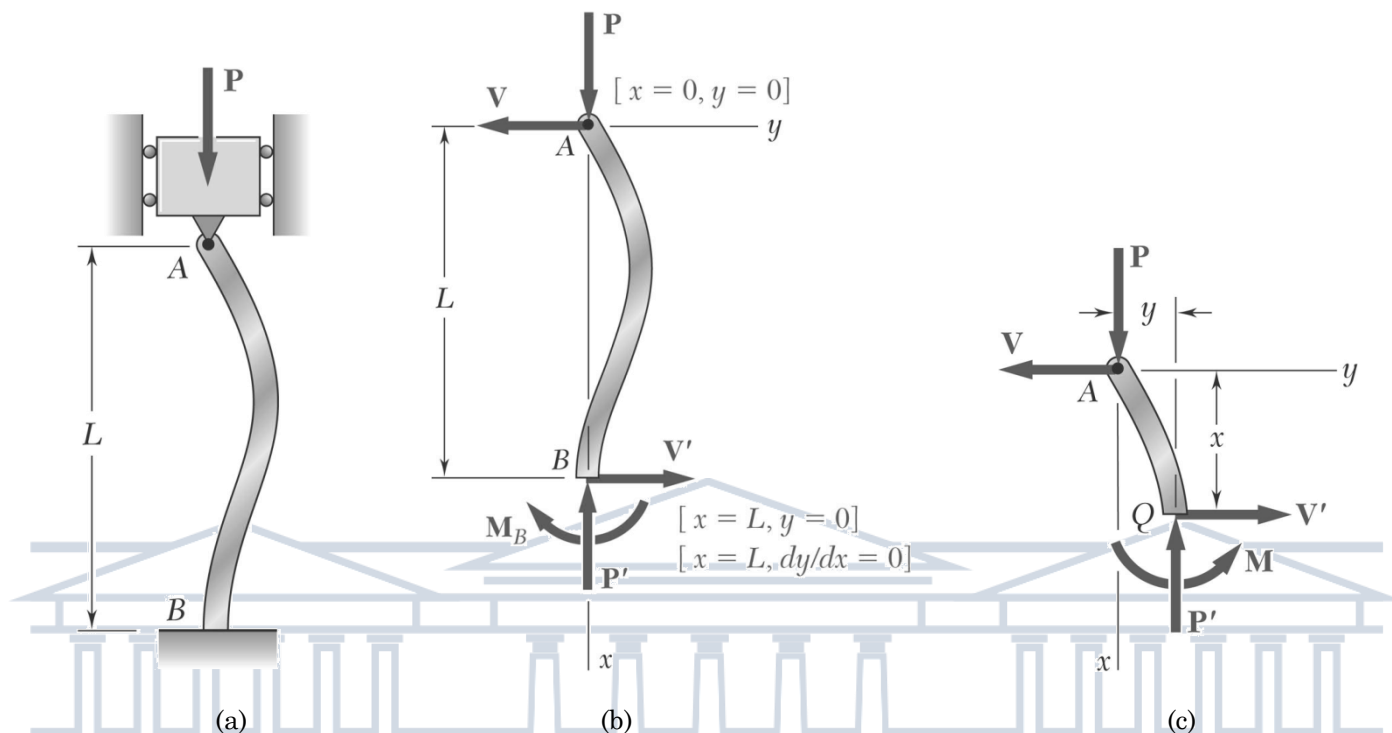


Figura 8.9: Coluna engastada e articulada (a), seu diagrama de corpo livre (b) e os esforços internos em Q (c).

Considerando agora o diagrama de corpo livre de uma parte AQ da coluna (Figura 8.9c), conclui-se que o momento fletor em Q é $M = -Py - Vx$.

Substituindo esse valor na equação diferencial da linha neutra:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = -\frac{P}{EI}y - \frac{V}{EI}x \quad \text{Equação 8.15}$$

Transpondo o termo em y e fazendo:

$$p^2 = \frac{P}{EI} \quad \text{Equação 8.16}$$

Escreve-se:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + p^2y = -\frac{V}{EI}x \quad \text{Equação 8.17}$$

Essa é uma equação diferencial linear, não homogênea de segunda ordem com coeficientes constantes. Observando que os membros esquerdos das Equação 8.6 e Equação 8.18 são idênticos, conclui-se que a solução geral da Equação 8.18 pode ser obtida adicionando uma solução particular da Equação 8.18 à solução Equação 8.7 obtida da Equação 8.6. Pode-se facilmente ver que uma solução particular como essa é:

$$y(x) = -\frac{V}{p^2 EI} x \quad \text{Equação 8.18}$$

Ou, usando a Equação 8.16:

$$y(x) = -\frac{V}{p} x \quad \text{Equação 8.19}$$

Adicionando as soluções da Equação 8.6 e da Equação 8.19, escreve-se a solução geral como:

$$y(x) = C_1 \operatorname{sen}(px) + C_2 \cos(px) - \frac{V}{p} x \quad \text{Equação 8.20}$$

As constantes C_1 e C_2 e o valor da força transversal desconhecida V são obtidos com base nas condições de contorno indicadas na Equação 8.9b. Fazendo primeiro $x = 0$, $y = 0$ na Equação 8.20, conclui-se que $C_2 = 0$. Fazendo na sequência, $x = L$, $y = 0$, chega-se a:

$$C_1 \operatorname{sen}(pL) = \frac{V}{p} L \quad \text{Equação 8.21}$$

A terceira condição de contorno é que a inclinação da linha neutra na extremidade B é igual a zero, portanto fazendo $x = L$ e $dy/dx = 0$:

$$\frac{dy}{dx} = C_1 p \operatorname{sen}(px) - \frac{V}{p} \quad \text{Equação 8.22}$$

Então:

$$C_1 p \operatorname{sen}(pL) = \frac{V}{p} \quad \text{Equação 8.23}$$

Dividindo a Equação 8.21 pela Equação 8.23, membro a membro, conclui-se que uma solução na forma Equação 8.20 só pode existir se:

$$\operatorname{tg}(pL) = pL \quad \text{Equação 8.24}$$

Resolvendo-se essa equação por tentativa e erro, chega-se que o menor valor de pL que a satisfaz é:

$$pL = 4,4934 \quad \text{Equação 8.25}$$

Usando a Equação 8.16 e substituindo o valor de p na Equação 8.25, e resolvendo para P , obtem-se o valor da força crítica para a coluna da Figura 8.9a:

$$P_{cr} = \frac{20,19EI}{L^2}$$

Equação 8.26

O comprimento de flambagem da coluna é obtido substituindo-se $L = L_{fl}$ na Equação 8.10 e igualando a Equação 8.26:

$$\frac{\pi^2 EI}{L_{fl}^2} = \frac{20,19EI}{L^2}$$

Equação 8.27

Resolvendo para L_{fl} , conclui-se que o comprimento de flambagem de uma coluna com uma extremidade engastada e outra articulada é $L_{fl} = 0,699 L \cong 0,7 L$.

Os comprimentos de flambagem referentes a várias condições de apoios são mostrados na Figura 8.10: Comprimento de flambagem para colunas com diversas condições de apoio.

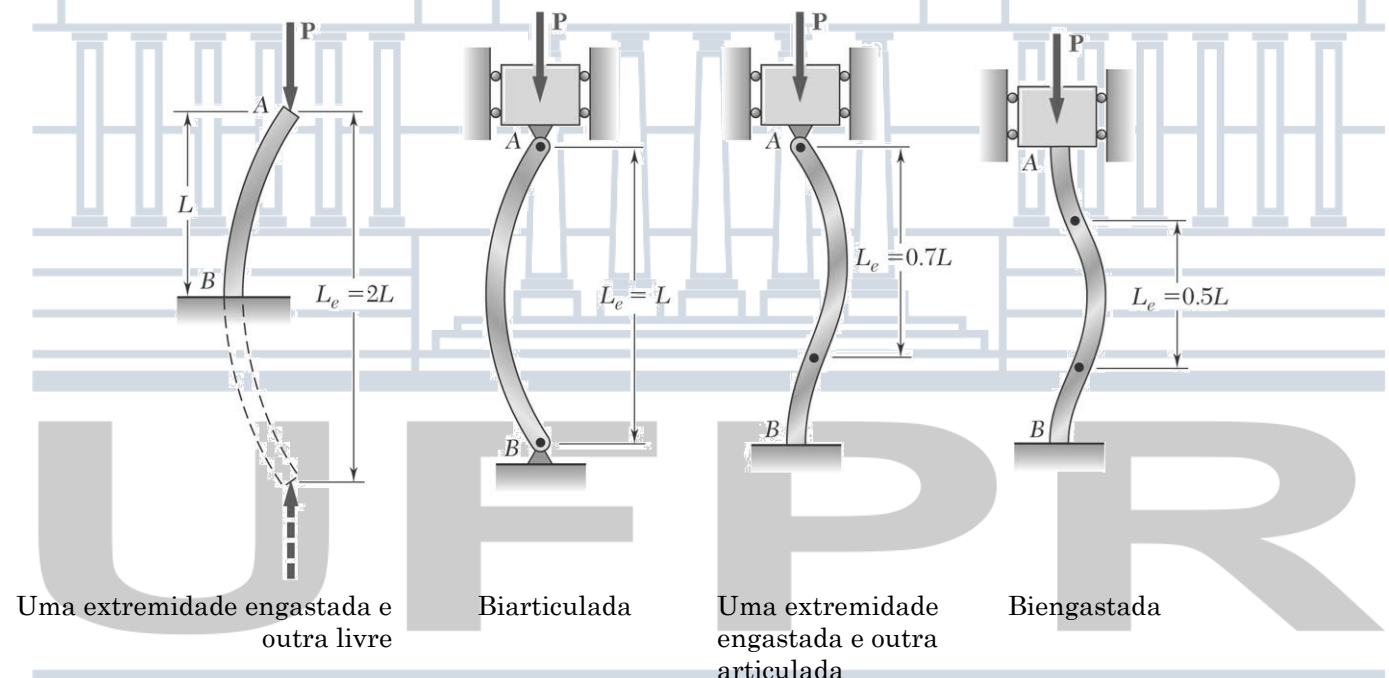


Figura 8.10: Comprimento de flambagem para colunas com diversas condições de apoio.

8.4 FÓRMULA DA SECANTE

Observando que a força P aplicada a uma coluna nunca é perfeitamente centrada, e chamando de e a excentricidade da força, isto é, a distância entre a linha de ação de P e o eixo da coluna (Figura 8.11a), substitui-se a força excêntrica dada por uma força centrada P e um momento $M_A = Pe$ (Figura 8.11b). Não importa o tamanho da força P e a excentricidade e , o momento M_A resultante sempre provocará alguma flexão na coluna (Figura 8.11c).

À medida que aumenta a força excêntrica, tanto o momento M_A quanto a força axial P também aumentam, e ambos farão a coluna flexionar ainda mais.

Visto dessa maneira, o problema de flambagem não é uma questão de determinar por quanto tempo a coluna pode permanecer reta e estável sob uma força cada vez maior, mas sim quanto se pode permitir que a coluna flexionasse sob uma força cada vez maior, sem que a tensão admissível seja ultrapassada e sem que a deflexão

$y_{\max}$ se torne excessiva.

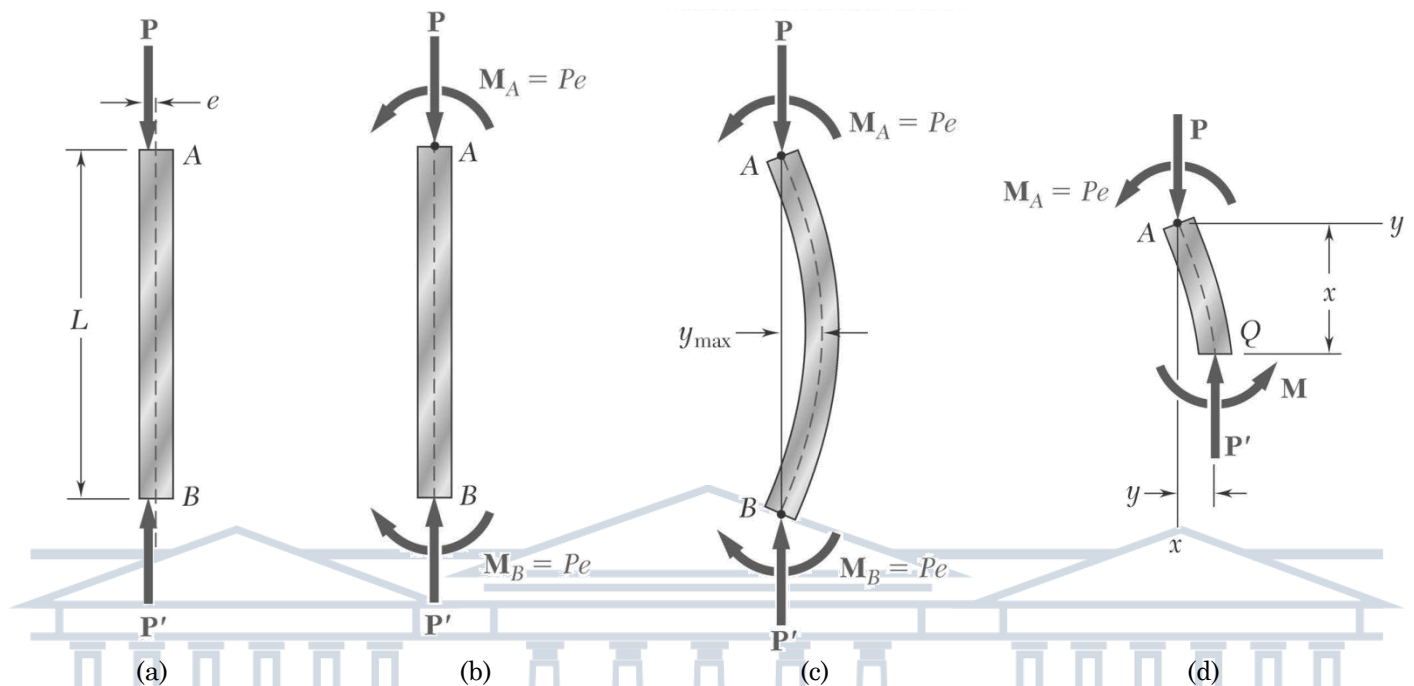


Figura 8.11: Coluna com carga axial excêntrica (a), momento relativo a excentricidade da carga P (b), deflexão causada pelo momento M_A (c) e esforços internos no ponto Q (d).

Primeiro escreve-se e resolve-se a equação diferencial da linha neutra, adotando o mesmo procedimento usado anteriormente. Com o diagrama de corpo livre de uma parte AQ da coluna, de acordo com os eixos de coordenadas mostrados na Figura 8.11d, conclui-se que o momento fletor em Q é:

$$M = -Py - M_A = -Py - Pe \quad \text{Equação 8.28}$$

Substituindo M na equação diferencial da linha neutra:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = -\frac{P}{EI}y - \frac{P}{EI}e \quad \text{Equação 8.29}$$

Transpondo o termo em y e utilizando a Equação 8.16:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + p^2y = -p^2e \quad \text{Equação 8.30}$$

A obtenção da solução dessa equação segue o mesmo procedimento usado para a Equação 8.17 e, portanto, a solução é dada por:

$$y(x) = C_1 \sin(px) + C_2 \cos(px) - e \quad \text{Equação 8.31}$$

Em que o último termo é a solução particular da equação. As constantes são obtidas com as condições de contorno. A primeira é $x = 0, y = 0$, que resulta em:

$$C_2 = e$$

Equação 8.32

A segunda é $x = L$, $y = 0$, que leva a:

$$C_1 \sin(pL) = e[1 - \cos(pL)]$$

Equação 8.33

Sabendo-se que:

$$\sin(pL) = 2 \sin\left(\frac{pL}{2}\right) \cos\left(\frac{pL}{2}\right)$$

Equação 8.34

e

$$1 - \cos(pL) = 2 \sin^2\left(\frac{pL}{2}\right)$$

Substituindo na Equação 8.33:

$$C_1 = e \operatorname{tg}\left(\frac{pL}{2}\right)$$

Equação 8.35

Equação 8.36

Substituindo os valores encontrados de C_1 e C_2 na Equação 8.31, chega-se a equação da linha neutra:

$$y(x) = e \left[\operatorname{tg}\left(\frac{pL}{2}\right) \sin(px) + \cos(px) - 1 \right]$$

Equação 8.37

O valor da deflexão máxima é obtido fazendo-se $x = L/2$ na Equação 8.37 e utilizando-se a Equação 8.16.

$$y_{\max} = e \left[\sec\left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}}\right) - 1 \right]$$

Equação 8.38

Observa-se na expressão acima que $y_{\max}$ se torna infinito quando:

$$\frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} = \frac{\pi}{2}$$

Equação 8.39

Embora fisicamente a deformação não se torna infinita, torna-se demasiadamente grande e portanto inaceitável. Portanto, não se pode deixar que o valor da carga P atinja o valor de P_{cr} , obtido resolvendo-se a Equação 8.39 para P .

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{Equação 8.40}$$

Que é o mesmo valor obtido anteriormente para uma coluna com uma força centrada. Resolvendo Equação 8.40 para EI e substituindo na Equação 8.38, pode-se escrever uma equação alternativa para y_{max} , em função de P_{cr} .

$$y_{max} = e \left[\sec \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \right) - 1 \right] \quad \text{Equação 8.41}$$

A tensão máxima σ_{max} ocorre na seção da coluna em que o momento fletor é máximo, isto é, na seção transversal onde se localiza o ponto médio C, e pode ser obtida somando-se as tensões normais provocadas, respectivamente, pela força axial e pelo momento fletor que atuam naquela seção.

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} + \frac{M_{max}c}{I} \quad \text{Equação 8.42}$$

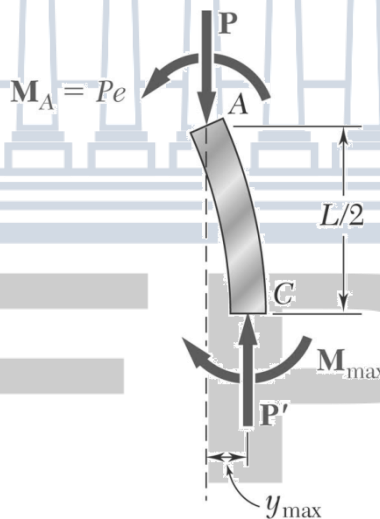


Figura 8.12: Diagrama de corpo livre da coluna com os esforços no ponto de momento máximo.

Com base no diagrama de corpo livre da parte AC, conclui-se que:

$$M_{max} = -Py_{max} - M_A = -P(y_{max} - e) \quad \text{Equação 8.43}$$

Substituindo na Equação 8.42 e recordando que o momento de inércia pode ser escrito em função do raio de giração, $I = Ai^2$:

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{(y_{max} - e)c}{i^2} \right] \quad \text{Equação 8.44}$$

E substituindo y_{max} pelo valor obtido na Equação 8.41.

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{ec}{i^2} \sec \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \right) \right]$$

Equação 8.45

Lembrando que c é a distância da linha neutra até o ponto de maior tensão de flexão na seção transversal. A equação obtida pode ser usada com qualquer condição de contorno, desde que seja usado o valor apropriado para a força crítica, seção 8.3.

Nota-se que, como $\sigma_{\max}$ não varia linearmente com a força P , o princípio da superposição não se aplica na determinação da tensão provocada pela aplicação simultânea de várias forças; deve ser calculada, inicialmente, a força resultante, e depois pode ser usada a Equação 8.45 para determinar a tensão correspondente. Pela mesma razão, qualquer coeficiente de segurança dado deve ser aplicado à força, e não à tensão.

Substituindo-se o valor de P_{cr} dado por Equação 8.40 com $L = L_{fl}$ e resolvendo para a relação P/A na frente dos colchetes na Equação 8.45, escreve-se:

$$\frac{P}{A} = \frac{\sigma_{\max}}{1 + \frac{ec}{i^2} \sec \left(\frac{L_{fl}}{2i} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right)}$$

Equação 8.46

Essa equação é chamada de fórmula da secante, ela define a força por unidade de área, P/A , que provoca determinada tensão máxima $\sigma_{\max}$ em uma coluna com determinado índice de esbeltez, L_{fl}/i , para um dado valor da relação ec/i^2 , em que e é a excentricidade da força aplicada. Nota-se que, como P/A aparece em ambos os membros, é necessário resolver a equação por tentativa e erro para obter o valor de P/A correspondente a uma dada coluna e condição de carregamento.

A Equação 8.46 foi usada para desenhar as curvas mostradas na Figura 8.13 para uma coluna de aço, considerando os valores de E e σ_E (tensão de escoamento) mostrados na figura. Essas curvas permitem determinar a força por unidade de área P/A , que faz a coluna escoar para valores dados das relações L_{fl}/i e ec/i^2 ."

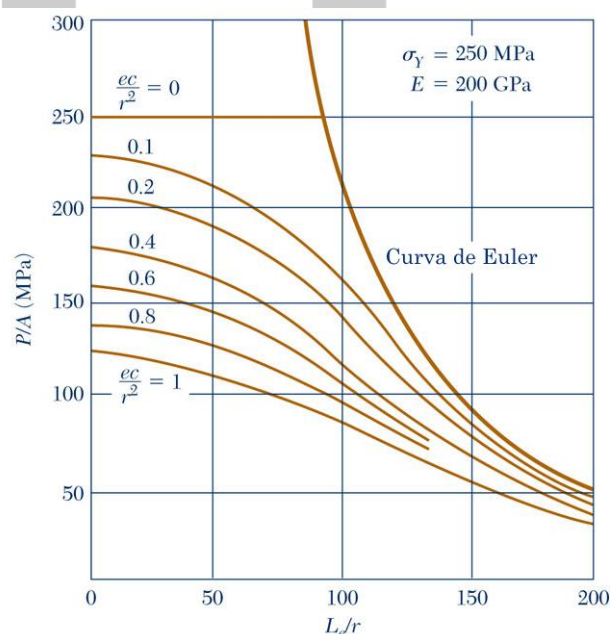


Figura 8.13: Força por unidade de área, P/A , provocando escoamento na coluna

Observa-se que para pequenos valores de L_{ef}/i , a secante é aproximadamente igual a 1 na Equação 8.46, e a relação P/A pode ser considerada igual a?

$$\frac{P}{A} = \frac{\sigma_{\max}}{1 + \frac{ec}{i^2}}$$

Equação 8.47

