

A FLAMBAGEM

As estruturas arquitetônicas são formadas por elementos que devem transportar forças de compressão e de tração.

Na maioria das vezes é o peso que deve ser transportado para o chão.



Cada material tem uma determinada resistência característica à compressão ou à tração:

Material	Resist. à Compressão	Resist. à Tração
Madeira estrutural	100 kgf/cm ²	100 kgf/cm ²
Concreto	150 a 300 kgf/cm ²	-----
Tijolo Comum	50 kgf/cm ²	-----
Aço CA-50	5000 kgf/cm ²	5000 kgf/cm ²
Corda	-----	500 kgf/cm ²

Se tivermos um peso de 1000 kgf em cima de um pilar e este for de madeira, bastaria que ele tivesse 10 cm² de seção, mas intuitivamente sabemos que não poderá ser longo pois quebrará por flambagem.

Já a corda com 2 cm² de seção aguentará este peso.

O pilar transporta o peso por compressão o que provoca seu encurtamento. A corda transporta o peso por tração o que provoca seu alongamento.

A variação ∇L do comprimento é dada pela fórmula:

Variação do comprimento.	Força que o pilar ou a corda deve aguentar.	Seção do pilar ou corda.
	$\nabla L = F \times L / E \times S$	
	Comprimento inicial do pilar ou corda.	Módulo de Elasticidade. É característico para cada material.

E Módulo de Elasticidade de alguns materiais:

Madeira	140.000 kgf/cm ²
Concreto	240.000 kgf/cm ²
Tijolo Comum	70.000 kgf/cm ²
Aço CA-50	2.100.000 kgf/cm ²

O valor do módulo é inversamente proporcional, quanto maior seu número menos elástico será o material.

Os materiais nunca são perfeitamente homogêneos (pequenos defeitos, impurezas, falhas, solidificação ou cristalização irregular etc), não encurtam nem alongam uniformemente.

Quando tracionados, um lado estica mais que o outro.

O lado que alongou menos passa a ser mais solicitado, alongando mais, fazendo com que a peça tracionada fique sempre reta.

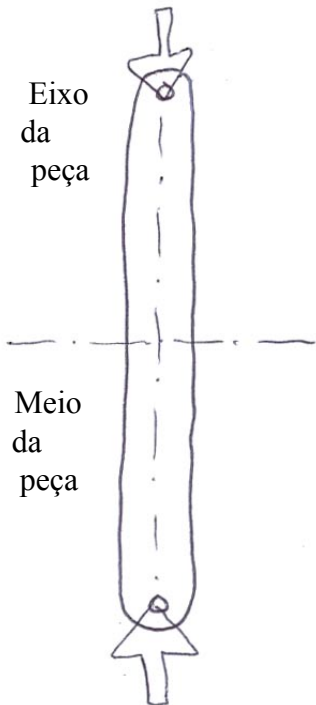
Quando comprimidos, algum dos lados vai encurtar mais que o outro.

O lado que encurtou mais, passa a ser mais solicitado e vai encurtar mais ainda, fazendo com que a peça comprimida tenda a encurvar.

Além disso, as forças nunca estão absolutamente centradas nos eixos das peças. Tudo o que tem calor vibra, mesmo que a força esteja no centro da peça, por mínimos instantes pela vibração, vai ficar apontando para fora do eixo e algum dos lados encurtará mais que o outro.

Mesmo que a diferença seja muito pequena o lado mais curto transportará mais carga que o outro e essa situação será irreversível.

Este fenômeno é chamado de FLAMBAGEM.

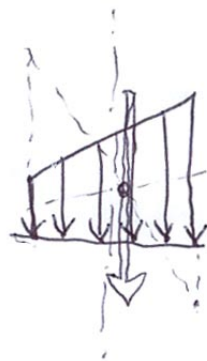


Vamos ver o que acontece com uma peça comprimida e articulada nos dois apoios:

Partimos da hipótese que desde o início qualquer peça comprimida sofre flambagem.

Pode ser imperceptível numa peça pouco esbelta e recebendo pouca carga observarmos encurtamento de algum dos lados, mas ele existe.

Colocando num gráfico o que acontece no meio do comprimento da peça comprimida, vamos ver que a resultante das forças de compressão sofre um desvio para o lado que encurtou mais.

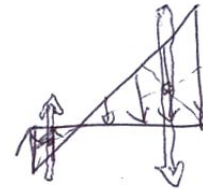


Resultante das forças de compressão

Se a peça for esbelta e a força de compressão grande, o lado mais comprimido vai encurtar bem mais que o outro lado, até que numa das faces a compressão é máxima, enquanto que na outra é nula.

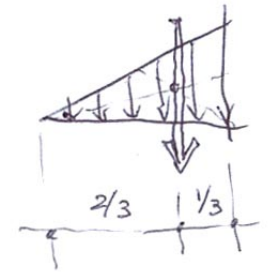
O gráfico vai ficar com a forma de um triângulo, a resultante das forças de compressão passará então a 1/3 da face mais comprimida. Importante notar que a peça com estas condições resiste somente à metade da capacidade de carga.

Se houver um aumento maior ainda das forças de compressão, começará a existir tração numa das faces, na outra compressão, teremos então flexão. A capacidade de resistência da peça a resistir tração impedirá a ruptura, mas é importante perceber que a capacidade de resistência à compressão da peça fica bastante reduzida.



Máxima resistência característica do material

A capacidade de resistência à compressão será a metade



A resultante passa a 1/3 de distância da face mais comprimida.

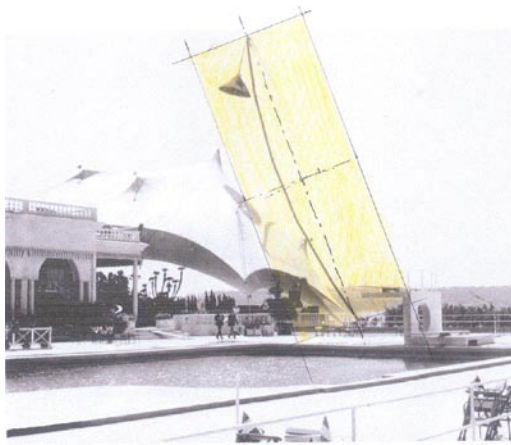
Este pilar curvo projetado por R. Taillibert e Frei Otto para o Teatro

Aberto Masque de Fer do Casino Palm Beach em Cannes, dá uma idéia de como imaginamos o que se passa dentro de uma peça comprimida.



Imaginemos que o pilar curvo é o caminho que faz a resultante das forças de compressão.

Na foto é difícil enxergar, mas existem cabos que impedem em duas direções o deslocamento horizontal do pilar.



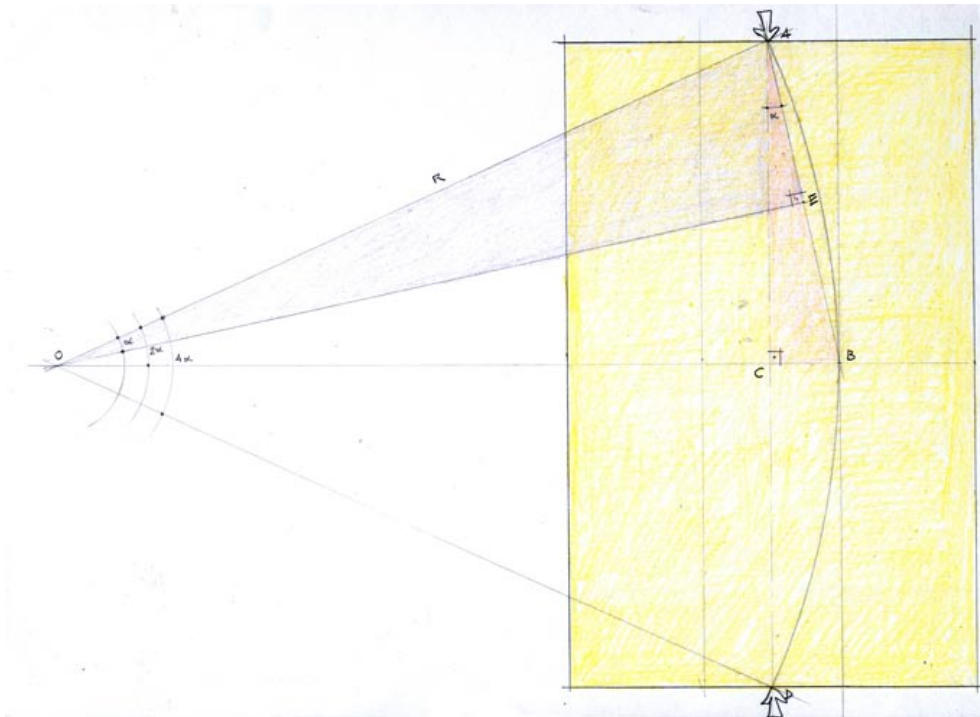
Desenhamos aqui como seria o pilar com a resultante passando pelo 1/3 no meio da largura do pilar.

Vemos que o pilar não seria nada esbelto, com certeza a curvatura do pilar poderia ter uma flecha menor, talvez não ficasse tão belo mas resistiria.

Se o pilar com a compressão encurtasse tanto de tal maneira que ficasse mais curto que a distância vertical inicial, ele poderia

passar para o outro lado e a estrutura entraria em colapso.

A hipótese então é que ele não pode encurtar mais que a distância Inicial entre os pontos de aplicação das forças. Essa situação vale então para qualquer peça comprimida.



O pilar desenhado ao lado está extremamente exagerado para enxergarmos a curva que passa pelos pontos de aplicação das forças de compressão e pelo terço da seção no meio do pilar.

Para calcularmos o comprimento da curva que passa pelos pontos de aplicação das forças de compressão e pelo terço da seção no meio do pilar, fazemos:

α é o ângulo cuja tangente é 1/6 da largura do pilar sobre a metade do comprimento do pilar.

O $\text{sen } 2\alpha =$ metade do comprimento do pilar sobre R, o raio.

O raio R, será então, o comprimento do pilar sobre 2 vezes o $\text{sen } 2\alpha$

A curva terá como comprimento então α vezes π vezes R, dividido por 180° .

Exemplo

A hipotenusa do triângulo ABC é muito pouco diferente da curva e é mais fácil de ser calculada; o dobro de seu comprimento menos a variação do comprimento da peça depois de carregada não pode ser menor que o comprimento inicial da peça, para que trabalhe somente à compressão.

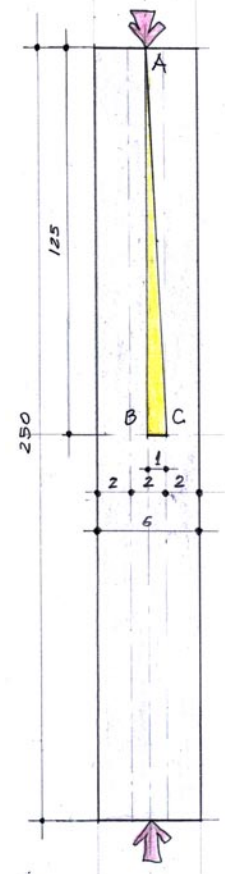
$$\text{Hipotenusa} = \sqrt{(125^2 + 1^2)}$$

$$\text{Hipotenusa} = 125,0039999$$

Multiplicado por 2, pois a hipotenusa é a metade do comprimento total: 250,0079998.

Aplicando-se a fórmula da variação do comprimento: $\nabla L = (F \times 250 \text{ cm}) / (140.000 \text{ kgf/cm}^2 \times (6 \times 16 \text{ cm}))$

Vamos substituir ∇L por 0,0079998 cm, para saber qual a força máxima que esse pilar suporta, sem que rompa por flambagem, nem comece a trabalhar à flexão.



$$F = (0,0079998 \text{ cm} \times 140.000 \text{ kgf/cm}^2 \times 96 \text{ cm}^2) / 250 \text{ cm}^2$$

$$F = 430 \text{ kgf}$$

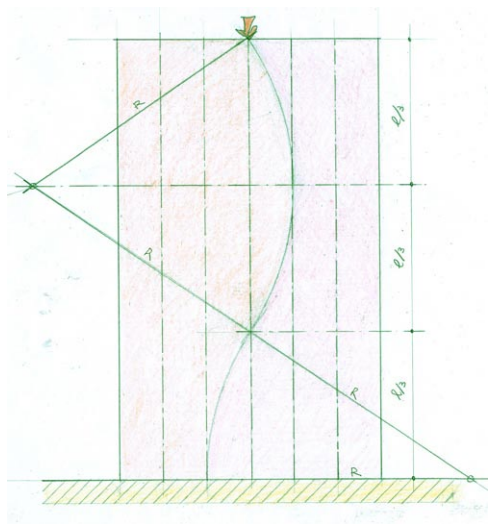
Valor muito baixo, por isso quando construímos pilares de madeira, costumamos usa-los dobrados, duas peças paralelas e travadas para aumentar sua inércia.

A madeira suporta bem tração também, então podemos colocar mais carga nesse pilar, até que uma das metades esteja trabalhando à tração e a outra à compressão, mas não podemos considerar que toda a metade da seção esteja suportando os 100 kgf/cm², pois somente a face externa trabalha com essa taxa enquanto que na parte central essa taxa é nula, usaremos então a média 50 kgf/cm².

$$\text{Metade da seção } 3 \times 16 = 48 \text{ cm}^2$$

$$48 \text{ cm}^2 \times 50 \text{ kgf} = 2400 \text{ kgf}$$

O pilar suporta a carga de 2400 kgf e pode assumir uma forma encurvada pois enquanto uma face encurta a outra alonga e qualquer força que atue horizontalmente gerando flexão, poderá levar esse pilar à ruptura, pois já está trabalhando no limite.



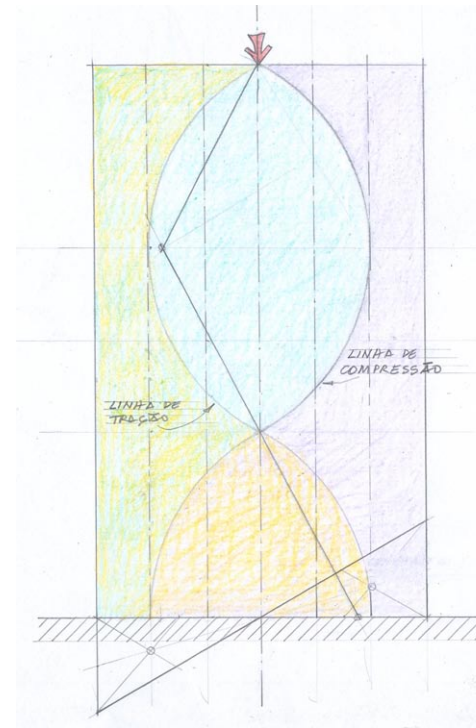
Peças comprimidas com uma das extremidades engastadas

O fato de peças possuírem uma das extremidades livres não altera a forma de verificação da flambagem, o que é importante verificar é a possibilidade de forças atuando perpendicularmente ao eixo provocando flexão.

As peças livres numa das pontas, necessariamente tem a outra extremidade engastada.

Para peças engastadas numa

das pontas, considerar o comprimento da peça como 2/3 do total e nas duas pontas considerar 1/2 do comprimento total.



Se a força for maior e a peça mais esbelta, vai haver flexão e o limite será com as curvas passando a 1/6 da face da peça.

Conclusão

A diferença entre esta proposta e a teoria tradicional da resistência dos materiais está em separar dois efeitos diferentes que ocorrem em peças comprimidas, a flambagem da flexão e que são tratadas conjuntamente.

As peças livres em uma das extremidades e engastadas na outra, cujos melhores exemplos são os da natureza, árvores, varas de bambu etc, estão mais sujeitas à flexão do que propriamente à flambagem.