ESTRUTURAS RÍGIDAS – INTRODUÇÃO

No reino de Mme. Mathématique

A madame coloca à disposição das outras ciências um vasto arsenal de recursos: números, geometrias, álgebras, vetores, sistemas de referência, funções, transformações lineares, matrizes, derivadas, integrais, equações algébricas, equações diferenciais, operadores, lógica, etc. Mas, não assume nenhuma responsabilidade pelo uso indevido desses recursos.

No mundo da Engenharia

Massa, força, tempo, velocidade, aceleração, trabalho e energia são entidades encontradas no mundo de madame Physique. Não existem no reino da madame. Embora os recursos da madame não sejam suficientes, são necessários para respaldar ou rejeitar as teorias formuladas pelos súditos de madame Physique.

Segundo Poincaré (354-412 ddb), uma teoria não tem de ser exata – ela tem de ser útil. Os engenheiros assinam em baixo. As forças bem comportadas, as domesticadas, podem ser representadas pelos vetores da madame. Ela ensina que interpolar é relativamente seguro. Adverte que extrapolar é incerto e pode ser muito perigoso. Viajar por mares nunca d'antes navegados...

As pirâmides e outras grandes construções antigas foram frutos do talento de poucos. As construções devem inspirar confiança aos moradores ou usuários. A intenção é que resistam às rajadas de vento, aos incêndios, às enchentes, aos furacões, aos terremotos e às explosões. Ou que desempenhem o melhor possível para a sobrevivência das pessoas. Devem ser duráveis e de fácil manutenção. E econômicas!

Materiais mais resistentes, e até inteligentes, e laboratórios cada vez mais sofisticados são imprescindíveis na arte de construir. Principalmente nas construções mais ousadas, as mega-construções. As que extrapolam o senso comum. Os insucessos de construções supostamente seguras devem ser considerados como experimentos realizados sem o viés da intervenção humana. Eu acho, tu achas, ele acha, ela acha, nós achamos, vós achais, eles e elas acham que será assim ou assado!

A passarela computacional

Uma passarela londrina foi inaugurada na virada do milênio. Sua arquitetura arrojada provocaria grande impacto. Os engenheiros projetistas achavam que ela teria plenas condições de servir aos pedestres. Achavam! Ela tremeu mais que vara verde! Por sorte não desabou e ninguém se feriu. É lícito fazer a seguinte encenação para levantar a causa do fiasco. Primeiro, investigar o comportamento dos usuários – esses vândalos! Não houve nenhum jogo de futebol naquele dia. Segundo, investigar as condições climáticas. O tempo londrino! Terceiro, investigar a construção da passarela. Cada construtor! Foi executada dentro das especificações técnicas, inclusive a fundação. Quarto, investigar o comportamento dos elementos estruturais. Cada material! Ensaios mostraram que seu comportamento elástico não diferia muito do comportamento dos materiais computacionais. Quinto, investigar um possível complô dos elementos estruturais unidos. Cada sindicato! Ensaios num modelo reduzido da passarela confirmaram o complô. E agora, José? Estabilizaram a passarela real com macacos hidráulicos reais. A passarela foi liberada ao público. Tentaram estabilizar a passarela computacional com macacos hidráulicos computacionais. Os softwares os recusaram por entenderem que eram desnecessários. Enviaram os softwares para a lixeira. Concluíram pela necessidade de afinar o modelo computacional para revisar os softwares. Afinal, contra fatos não há argumentos! A passarela real venceu a computacional.

Em algum lugar de Paris

Os franceses não podiam ficar pra trás. Decorria o ano 2004 da era cristã. Aproximadamente 11 (onze) meses após a inauguração de uma obra num aeroporto de Paris, ela desabou. Com vítimas!. Pior que isso...A encenação é semelhante à do conto da passarela. Mas circula pela internet que a causa teria sido uma temperatura anormal em Paris. Próxima de 4 (quatro) graus centígrados acima de zero! Discrepâncias térmicas dos materiais reais e dos computacionais? O fato é que desabou. Ainda nova. Ou por ser nova? Incertezas existem. Einstein que o diga. Mas, e as vítimas? De quem é a culpa? Do computador, é claro! Pesquisar é preciso.

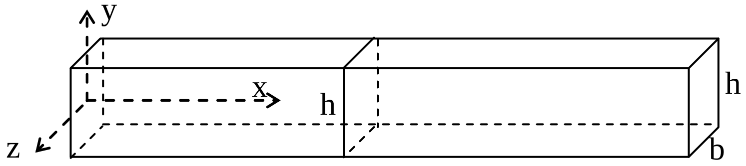
1m = 10dm	1dm = 10cm	1cm = 10mm

1. Corpos comestíveis

A barra de marmelada – 1D

Uma barra de marmelada tem a forma de um paralelepípedo reto. Na realidade, o paralelepípedo reto existe somente no reino da madame. Mas você pode imaginar um. Suas seis faces são paralelas e iguais duas a duas, e os ângulos formados pelas arestas são iguais a 90 graus.

O paralelepípedo reto será denominado simplesmente de //pípedo. Serão necessárias três dimensões para a especificação da geometria da barra da madame: o comprimento L e as dimensões ‘b’ e ‘h’ do retângulo.



A = b h

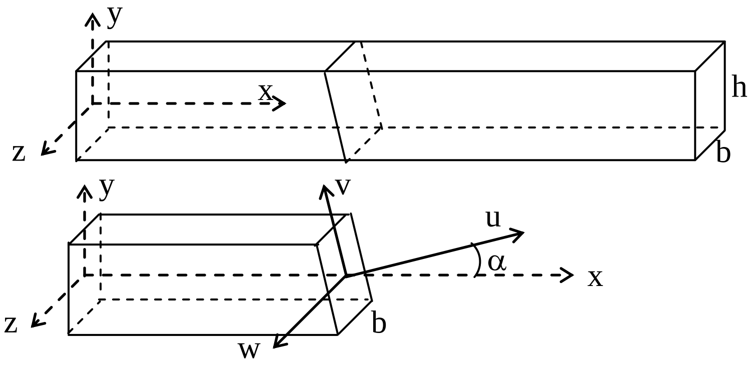
O eixo geométrico do //pípedo passa pelos pontos de cruzamento das diagonais dos retângulos. O eixo x do sistema de referência ortogonal Oxyz será tomado coincidente com o eixo geométrico. O eixo y será tomado paralelo ao lado de dimensão ‘h’ enquanto o eixo z será, evidentemente, paralelo ao lado de dimensão ‘b’. Você poderá simular esses eixos com três palitos.

Com uma faca você poderá cortar a barra de bananada do jeito que quiser – ela é sua! Mas há cortes privilegiados. Com a lâmina da faca perpendicular ao eixo x, o corte é denominado de transversal. A superfície plana formada é denominada de seção transversal reta, ou simplesmente, de seção transversal. Sua forma é retangular de dimensões ‘b’ e ‘h’. A área dessa superfície será igual a A = b×h.

Os dois pedaços serão ainda //pipédicos. O comprimento de um pedaço será igual a x e o do outro será L – x. Só você poderá dizer o valor escolhido da abscissa x do corte efetuado! Para x = 0 ou para x = L você não terá efetuado corte algum – as seções transversais serão simplesmente as duas faces do //pípedo.

Você poderá fazer cortes inclinados em relação ao eixo x. Os dois pedaços não terão mais a forma de um paralelepípedo. A ilustração mostra um corte com a lâmina paralela ao eixo z. A superfície plana ainda terá a forma de um retângulo de base ‘b’ e de altura maior que ‘h’.

O eixo u é tomado normal à superfície e fará um ângulo α com o eixo x. O eixo w é tomado paralelo ao eixo z. Os eixos u e v pertencerão, portanto, ao plano definido pelos eixos x e y. Você pode simular esses eixos com palitos. São eixos de referência da seção inclinada.



Corte a barra com a lâmina inclinada em relação ao eixo x, e paralela ao eixo y. Quais são as diferenças do corte anterior? Utilize palitos para visualizar melhor os dois cortes.

Você poderá cortar a barra com a lâmina paralela ao plano xy, e com o seu fio passando pelo eixo x. Poderá cortar outra barra de bananada com a lâmina paralela ao plano xz, e passando também pelo eixo x. Esses cortes dividirão cada uma das barras em duas bandas. As superfícies planas de ambas serão retangulares e de comprimento L. São denominadas de seções longitudinais. Quais são as dimensões dos retângulos de cada uma? Qual delas terá volume maior? Será realmente necessário cortar as barras? Ou você poderia apenas manifestar sua intenção utilizando apenas uma barra?

Uma característica da barra de bananada é que seu comprimento L é bem maior que as dimensões ‘b’ e ‘h’. A geometria da maioria das vigas e pilares de uma construção é semelhante à da barra de marmelada. As vigas ‘T’, os perfis ‘I’ e os perfis ‘T’ são assim denominados porque suas seções transversais têm a forma de um ‘T’ ou de um ‘I’. Elementos estruturais que têm o comprimento bem maior que as dimensões da seção transversal são denominados de unidimensionais (1D), ou, simplesmente, de barras. Enquanto as dimensões da seção transversal têm a mesma ordem de grandeza, a dimensão do comprimento destoa. É comum, portanto, especificar as dimensões da seção transversal numa unidade de medida (centímetro), e o comprimento da barra em outra unidade (metro).

$3{,}141 < \pi < 3{,}142$	$\pi \cong 3{,}14$

/

A salsicha – 1D

As salsichas do reino da madame são cilíndricas. O eixo geométrico é eixo de simetria radial. Você poderá locar o eixo x coincidente com ele. E os eixos y e z? Não haverá preferência. Qualquer seção transversal será uma superfície circular de diâmetro D. A forma da superfície longitudinal será retangular de dimensões D e L, onde L é o comprimento da salsicha. Qual será a forma de uma seção inclinada? Pilares de concreto armado de seção circular são também elementos 1D. Exemplares podem ser vistos e admirados na agência do BB da UnB.

A pizza – 2D

Se uma pizza fosse perfeitamente circular e se sua espessura fosse constante ela seria cilíndrica. Sua aparência é, porém, bem diferente da salsicha. É que sua espessura é muito menor que seu diâmetro. Seria mais bem classificada como disco. A “barra” de chocolate diamante negro teria a forma de um paralelepípedo se não fosse chanfrada. Sua espessura é também muito menor que as outras duas.

As chapas, as lajes circulares e retangulares, as vigas-parede e os pilares-parede têm essas características. O comprimento e a largura preponderam em relação à espessura. Esses elementos estruturais são classificados como bidimensionais (2D) ou laminares. As unidades de medida típicas seriam o centímetro (espessura) e o metro (diâmetro, comprimento e a largura).

A rapadura – 3D

Há rapaduras //pipédicas que têm suas três dimensões mais ou menos equivalentes, da mesma ordem de grandeza. Os blocos de concreto armado têm também uma geometria semelhante. São classificados como elementos estruturais tridimensionais (3D) ou volumétricos. Suas dimensões são especificadas numa mesma unidade de comprimento.

$$\frac{a}{b}+\frac{c}{d}=x \qquad b\neq 0 \qquad d\neq 0$$

$$a+\frac{bc}{d}=bx \qquad da+bc=dbx \qquad x=\frac{ad+bc}{bd}$$

/

2. Corpos elásticos

Alongamento - contração

As gomas elásticas de amarrar cédulas são extremamente flexíveis. Suas seções transversais são circulares ou retangulares. Ao esticá-las, você notará que as dimensões dessas seções diminuem. Elas emagrecem! O fenômeno ocorre também com as barras, os cabos e os tirantes submetidos a esforços de tração. A área da seção transversal diminuirá e as tensões aumentarão.

Você terá a oportunidade de presenciar um ensaio de tração de uma barra de aço. Ela arrebentará quando a força atingir um determinado valor. Enquanto a barra estiver em regime elástico, você não será capaz de visualizar sua contração lateral. O efeito só poderá ser registrado por meio de instrumentos de alta precisão.

Encurtamento - expansão

Ao comprimir axialmente um pedaço de salsicha, você notará que ela engorda! As dimensões das seções transversais das barras aumentam quando comprimidas. Os pilares também engordam! A área da seção transversal aumentará.

Ensaios de compressão axial de corpos de prova de concreto são realizados para a determinação da resistência à compressão do concreto. Há dois tipos: cilíndricos e cúbicos. São também padronizados pelas normas técnicas. A olho nu você não conseguirá perceber a expansão da seção transversal em regime elástico.

Uma salada de movimentos

Topa executar os movimentos que acontecem com os elementos estruturais de uma construção? Fixe uma extremidade de uma barra de marmelada em uma morsa. Não aperte demais para não esmagar a barra. Faça os movimentos indicados a seguir, apenas o suficiente para deformá-la – pequenos movimentos. 1)estique a barra (translação na direção x). Observe que você teve de comprimir sua extremidade para poder esticá-la; 2)torça a barra (rotação em torno do eixo x). 3)mova a mão somente na direção do eixo y (translação y). 4)agora, somente na direção do eixo z (translação z). 5)gire a mão em torno do eixo y (rotação em torno de y). 6)agora, em torno do eixo z (rotação em torno de z). Repita o ensaio com uma barra nova, mas execute primeiro as operações ímpares e depois as pares. Por exemplo, na ordem: 1 – 3 – 5 – 2 – 4 - 6. Ponha as duas barras ensaiadas sobre um prato. Elas terão a mesma forma? Elas voltarão às suas formas originais? Pegue duas barras novas e repita os ensaios, mas comprimindo-as em vez de esticá-las. Repita os ensaios com barras mais curtas e mais longas. E se você substituísse a barra de marmelada pela salsicha?

3. Corpos rígidos

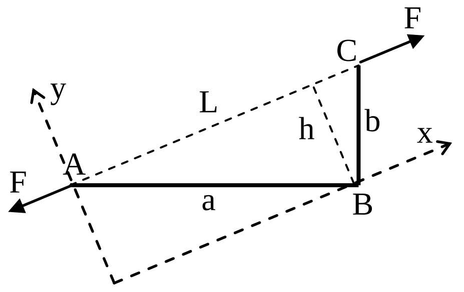
Os corpos comestíveis são extremamente deformáveis. Uns menos que outros, como a rapadura. Os dentes são mais rígidos que todos eles, mas não são rígidos. A “barra” de chocolate é mais flexível que a rapadura. Esta é mais rígida que aquela. Um bloco maciço de aço na forma da rapadura seria extremamente rígido, mas não seria rígido.

Corpo rígido é aquele que não sofre variação na sua forma - não se deforma. Uma vez esférico de diâmetro D, sempre esférico de diâmetro D! Você pode moldá-lo nas mais variadas formas – a seu gosto! Nada é capaz de deformar ou de destruir um corpo rígido. Nem a energia do Einstein. Nem o tempo. Você pode fixá-lo na posição que quiser. Ou imaginá-lo livre no espaço.

O corpo rígido não existe no mundo de madame Physique. É encontrado somente no reino da madame. E agora, José? Como aplicar forças a um corpo rígido? Para sair desse xeque-mate os engenheiros fingem que forças são vetores. Para simular uma força de 100 kN, digamos, eles imaginam um vetor na mesma direção e sentido da força, e de intensidade igual a 100. E funciona? Desde que as forças concordem em obedecer também às regras da álgebra vetorial da madame – as forças domesticadas! Testes são realizados em laboratórios com barras ou estruturas pouco deformáveis.

O corpo rígido da madame nos livra de todas as deformações do mundo de madame Physique. Não haverá deformação por força axial. Não haverá deformação por flexão. Não haverá deformação por cortante. Não haverá deformação por torção. Não haverá nenhum efeito colateral, como o da expansão ou da contração da seção transversal. Nos livra de qualquer trabalho! Melhor que isso...

Um corpo rígido sem peso tem a forma ABC. A distância entre os pontos A e C é igual a $L = \sqrt{a^2 + b^2}$. Se você aplicar as forças F nos pontos A e C, nada acontecerá ao corpo rígido ABC. Os comprimentos ‘a’ e ‘b’ não sofrerão alterações. O ângulo reto continuará reto. A distância L continuará a mesma.



Para o sistema de referência indicado, as relações de equilíbrio estático serão:

$\Sigma F_x = 0$	$F - F = 0$	$F(1-1) = 0$	$F \times 0 = 0$
$\Sigma M_B = 0$	$F\,h - F\,h = 0$	$F(h-h) = 0$	$F \times 0 = 0$

Portanto, elas são satisfeitas para qualquer valor da força F. As forças F tendem a flexionar as barras AB e BC - elas produzirão o momento de flexão de maior magnitude F×h em B. Mas as barras rígidas não sofrerão essa flexão. Produzirão também esforços normais e cortantes. Mas elas não sofrerão deformações axiais e nem transversais. O trabalho realizado pelas forças F será identicamente nulo. Viu? Não havendo deformações, as dimensões ‘a’, ‘b’ e ‘h’ não se alterarão. Não havendo deformações, você terá certeza de que não haverá alteração na direção das forças. Uma vez numa direção, sempre na mesma direção! O momento fletor em B não terá de ser recalculado. O trabalho das forças continuará nulo.

Brevemente você será apresentado às estruturas isostáticas e hiperestáticas. Suas barras serão consideradas corpos rígidos para efeito da formulação das relações de equilíbrio estático. Tal como na degustação acima. Logo, essas relações de equilíbrio só serão válidas no reino da madame. Os engenheiros as aceitam como uma primeira aproximação. Como um ponto de partida - um v_0.

$a = a$	$a - a = 0$	$a \neq 0$	$a(1-1) = 0$	$a \times 0 = 0$
$a = a$	$a - a = 0$	$a \neq 0$	$(1-1)a = 0$	$0 \times a = 0$

/

Topa uma malhação algébrica no reino da madame? Duas barras rígidas têm forma cilíndrica. Uma tem comprimento L_0 e diâmetro D_0. A outra tem comprimento L_1 (maior que L_0) e diâmetro D_1. Quais são as condições exigidas pela madame para que tenham volumes iguais?

$A_0 = \pi D_0^2 / 4$ $\qquad\qquad$ $A_1 = \pi D_1^2 / 4$

$V_0 = A_0 L_0$ $\qquad\qquad$ $V_1 = A_1 L_1$

$V_1 = V_0$ $\qquad\qquad$ $A_1 L_1 = A_0 L_0$

Poderíamos parar por aqui. Como não deu pra cansar, vamos continuar com a malhação.

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{A_0}{A_1} \qquad\qquad \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{A_0 - A_1}{A_1}$$

$$L_1 > L_0 \quad \Rightarrow \quad A_0 > A_1 \quad \Rightarrow \quad D_0 > D_1$$

$$\frac{L_1 - L_0}{L_0} = \varepsilon$$ {para facilitar a malhação – é um número adimensional positivo}

$$\varepsilon = \frac{A_0}{A_1} - 1 \qquad\qquad \frac{A_0}{A_1} = 1 + \varepsilon$$

$b \neq 0$	$\frac{a}{b} = k$	$a = kb$	$a - b = (k-1)b$
$d \neq 0$	$\frac{c}{d} = k$	$c = kd$	$c - d = (k-1)d$

$$\frac{a-b}{b} = \frac{c-d}{d} = k - 1$$

/

$$\left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 = 1+\varepsilon \qquad\qquad \frac{D_0}{D_1} = \sqrt{1+\varepsilon}$$

$$\frac{D_0 - D_1}{D_0} = \frac{\sqrt{1+\varepsilon}-1}{\sqrt{1+\varepsilon}} \qquad\qquad \frac{D_1 - D_0}{D_0} = \frac{1-\sqrt{1+\varepsilon}}{\sqrt{1+\varepsilon}}$$

$$\frac{D_1 - D_0}{D_0} = \varepsilon_T$$ {idem – será um número adimensional negativo}

$$\varepsilon_T = \frac{1-\sqrt{1+\varepsilon}}{\sqrt{1+\varepsilon}} \qquad\qquad (1+\varepsilon_T)\sqrt{1+\varepsilon} = 1$$

Por que definir os números ε e ε_T ? Não há necessidade alguma. Entretanto, eles são úteis para fazer as contas, passo a passo. Enfatizam também que são grandezas sem dimensão – adimensionais. Que ε relaciona os comprimentos (dimensões das seções longitudinais) enquanto ε_T relaciona os diâmetros (dimensões das seções transversais) das duas barras rígidas. Permitiram ainda apresentar a condição numa forma assaz elegante. A madame recomenda. Nós acatamos.

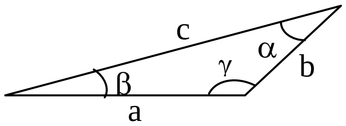
• A regra das proporções da madame permite outra malhação.

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{A_0}{A_1} \qquad\qquad \frac{L_1 - L_0}{L_1} = \frac{A_0 - A_1}{A_0}$$

$$L_1 > L_0 \quad\Rightarrow\quad A_0 > A_1 \quad\Rightarrow\quad D_0 > D_1$$

$$\frac{L_1 - L_0}{L_1} = \varepsilon_1$$ {captou a diferença ?} $$\varepsilon_1 = 1 - \frac{A_1}{A_0}$$

$$\frac{\operatorname{sen}\alpha}{a} = \frac{\operatorname{sen}\beta}{b} = \frac{\operatorname{sen}\gamma}{c}$$



/

$$\frac{A_1}{A_0} = 1 - \varepsilon_1 \qquad \left(\frac{D_1}{D_0}\right)^2 = 1 - \varepsilon_1$$

$$\frac{D_1}{D_0} = \sqrt{1 - \varepsilon_1} \qquad \frac{D_1 - D_0}{D_1} = \frac{\sqrt{1 - \varepsilon_1} - 1}{\sqrt{1 - \varepsilon_1}}$$

$$\frac{D_1 - D_0}{D_1} = \varepsilon_{T1} \qquad \varepsilon_{T1} = \frac{\sqrt{1 - \varepsilon_1} - 1}{\sqrt{1 - \varepsilon_1}}$$

$$(1 - \varepsilon_{T1})\sqrt{1 - \varepsilon_1} = 1$$

Que é também muito elegante. Os números ε e ε_1 são independentes? Vejamos.

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \qquad \varepsilon = \frac{L_1}{L_0} - 1 \qquad 1 + \varepsilon = \frac{L_1}{L_0}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{L_1 - L_0}{L_1} \qquad \varepsilon = 1 - \frac{L_0}{L_1} \qquad 1 - \varepsilon_1 = \frac{L_0}{L_1}$$

$$(1 + \varepsilon)(1 - \varepsilon_1) = 1$$

Que é uma forma implícita muito elegante para mostrar a dependência das definições dos dois números (variáveis) adimensionais. É uma dependência não-linear. Dever-de-casa: a)derivar uma variável em relação à outra; b)resolver o problema para barras de seção transversal quadrada, retangular, trapezoidal e ‘T’. Tentou? Complicado? A madame é muito exigente?.

Você viu que a solução de um mesmo problema no reino da madame foi apresentada de duas formas diferentes, embora equivalentes. As aparências enganam. Todo cuidado é pouco para não incorrermos em julgamentos precipitados. Malhação no reino da madame é imprescindível para a formulação ou rejeição de teorias no mundo de madame Physique. O alicerce de sua academia é extremamente sólido.

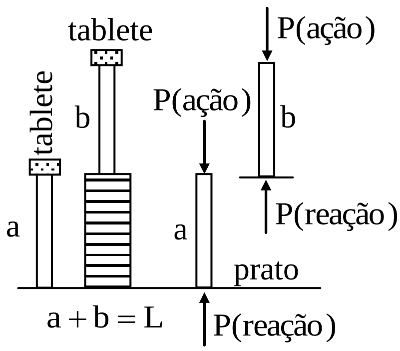
O problema das duas barras cilíndricas de mesmo volume pode ser um ponto de partida (um modelo) para teorizar sobre a barra cilíndrica elástica que emagrece ou engorda! Uma barra se contrai porque se alonga ou se alonga porque se contrai? Nenhuma delas?

4. Esforço normal solicitante

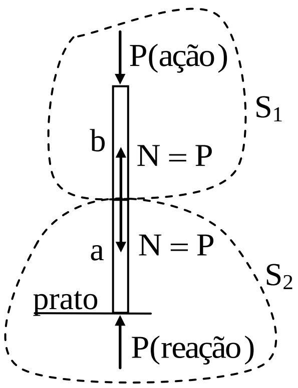
A salsiquim

Para você entender o que os engenheiros denominam de esforço normal e de diagrama de esforço normal, vamos recorrer à salsicha da madame. É uma barra cilíndrica rígida e sem peso. Essa inusitada salsicha será referenciada como salsiquim. Como não é possível cortar a salsiquim, basta imaginá-la cortada ou cortar a comestível!. Compre pelo menos duas.

Corte uma salsiquim de comprimento L em duas partes. Uma terá comprimento 'a' e o comprimento da outra será b = L - a. Com dois tabletes de queijo iguais(de mesmo peso P) faça a montagem mostrada na figura. A parte de comprimento 'b' foi assentada sobre um suporte de altura 'a'. Esse suporte pode ser uma pilha de tabletes de queijoquim. As quatro forças P são forças externas aos dois pedaços da salsiquim.



Para recompor a salsiquim, basta retirar o tablete da parte ‘a’ e assentar o pedaço de comprimento ‘b’ sobre ela. A interface de contacto das duas partes será uma seção transversal distante ‘a’ do prato. As duas forças N na interface serão forças solicitantes internas. Uma pertence ao subconjunto S_1 e a outra pertence ao subconjunto S_2. Ambas são normais (perpendiculares) à seção transversal. São denominadas de esforço normal solicitante na seção transversal.



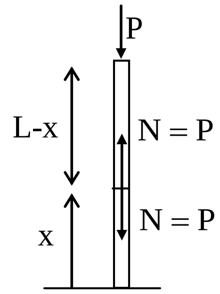
1 kN = 1000 N	1 MN = 1000 kN
1 kgf = 10 N	1 tf = 10 kN

/

Viu? Não havia necessidade de cortar a salsiquim. Essa intenção é executada por meio de subconjuntos. É assim que os engenheiros dissecam os elementos estruturais. Não só identificam como também determinam os valores dos esforços internos. Esses esforços sempre andam aos pares, como na dupla Cosme e Damião!

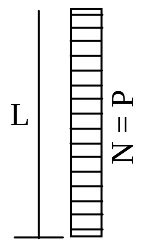
O comprimento 'a' da salsiquim é arbitrário. É evidente que ele não poderá ser maior que o comprimento L da salsiquim. Em tempo - o esforço normal N é constante de seção para seção porque a salsiquim não tem peso.

No reino da madame, o comprimento variável ‘a’ é usualmente representado pela variável real x. O comprimento ‘b’ será L –x.
Para uma seção transversal de abscissa x, a intensidade do esforço normal N será constante e igual à carga P. A madame expressa isso assim: $y = N(x) = N = P \quad 0 \le x \le L$



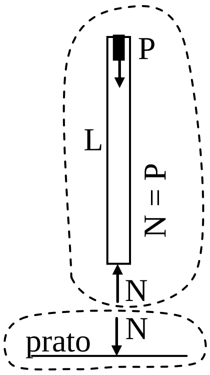
A função $y = N(x) = N = P$ é uma função constante para qualquer valor de x no intervalo especificado. Seu gráfico é uma reta paralela ao eixo x, o eixo geométrico da salsiquim.

Os engenheiros não abrem mão do gráfico dessa função. Eles denominam esse gráfico de Diagrama de Esforço Normal(DEN). Não se importam de que lado do eixo ‘x’ ele é traçado. O importante é que haja uma convenção para informar se o esforço normal é de compressão ou de tração na seção considerada. No caso da nossa salsiquim o esforço é de compressão em qualquer seção.

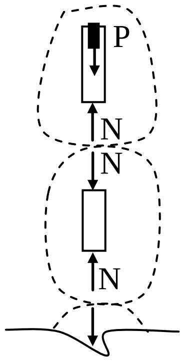


Os softwares desenham o DEN em cores. Uma cor representará esforço normal de compressão enquanto uma outra indicará esforço de tração. Alternativamente, o sinal de negativo(-) poderá representar esforço de compressão enquanto o sinal de positivo(+) indicará o de tração. É uma questão de convenção. Não se chegou a um consenso na Convenção de Genebra de 3xx ddb.

A esferográfica é constituída pela ponteira, que contém a esfera e o tubo contendo a tinta. Eles são indispensáveis para a finalidade da caneta: escrever, desenhar e rabiscar. Esse tubo é muito flexível. Ele não foi projetado para ter função estrutural. Essa função é exercida pelo tubo externo. Para não perturbar a simetria axial, a marca do fabricante e o orifício para a respiração da tinta não foram executados. Esse tubo rígido e sem peso será referenciado como tuboquim.



Retire o tubo flexível e a tampinha do tuboquim e assente a esferográfica no prato com a esfera para cima. Suponha que o peso do conjunto ponteira-esfera seja igual a P. Essa carga atuará no topo do tuboquim. A ponteira-esfera agirá sobre o prato por intermédio do tuboquim com a força solicitante N = P e este reagirá sobre o tuboquim com a mesma força, mas de sentido oposto. Exatamente como na salsiquim.



/