
INTRODUÇÃO E SIMBOLOGIA

1. INTRODUÇÃO

Na nomenclatura da Engenharia de Estruturas usualmente aceita no Brasil, peças estruturais com uma dimensão, a espessura e , muito menor que as outras duas, são classificadas em conjunto como folhas. Se dividem em folhas planas e não planas. No primeiro grupo tem-se as chapas, quando os carregamentos estão contidos no plano da folha, gerando apenas esforços de tração, compressão ou tangenciais (cisalhamento), e as placas quando o carregamento é perpendicular ao plano da folha, gerando esforços de flexão, além dos tangenciais (cisalhamento). As peças não planas e as carregadas de outra forma, são em geral classificadas como cascas.

É óbvio que em qualquer caso se trata de peças tridimensionais. Mas o fato de terem pequena espessura relativa permite adoção de teorias estruturais simplificadas ad hoc, as teorias de chapas, placas e cascas, que serão abordadas neste livro.

As aplicações na prática da Engenharia são inúmeras. Seguem-se alguns exemplos nas várias especialidades.

Na Engenharia Civil, tem-se as chapas de união das peças em estruturas metálicas, as lajes de concreto armado e protendido, que são placas, as assim chamadas estruturas espaciais, como as cúpulas de templos religiosos construídos desde os romanos, com seu Panteão, até os dias de hoje, passando pelas grandes estruturas medievais e do Renascimento, como as do Vaticano, em Roma e da Hagia Sofia, em Istambul.

Na Engenharia Mecânica e Naval, tem-se os vasos de pressão, os reservatórios de fluidos, as estruturas autoportantes de veículos terrestres e navais, todos exemplos de cascas.

Neste livro, uma ênfase maior será dada às Estruturas Aeroespaciais, nas quais o autor, Engenheiro Civil de formação, hoje atua. Essa especialidade é um subconjunto da Engenharia Mecânica que trata das aeronaves e veículos espaciais e seus equipamentos. Esses objetos têm que necessariamente ser muito leves, por várias razões óbvias que aqui não se repetem. Mas tem que manter formas que permitam espaço interno para uso de suas cargas úteis e, no caso das aeronaves, provenham as formas aerodinâmicas necessárias à sua sustentação e controle.

Inspira-se, aqui, na natureza, que em muitos casos se vale dos exoesqueletos, como nos crustáceos e insetos. *Aí* a estrutura é a própria periferia externa do ser vivo. A mesma solução é adotada na Engenharia Aeroespacial, em que as superfícies externas dos veículos são parte de suas estruturas, em geral de muito pequena espessura. Como exemplo, apresentam-se as fotos das Figuras 1 a 5, obtidas em site gratuito da Internet, o <https://picryl.com/>, isentas de direitos autorais.



Figura 1: partes de espaçonaves da NASA



Figura 2: casca externa de foguete em montagem



Figura 3: espaçonave em manutenção em órbita



Figura 4: montagem de fuselagem de aeronave



Figura 5: montagem de superfície de controle de aeronave

2. SIMBOLOGIA DA TEORIA DA ELASTICIDADE

Neste trabalho, adota-se a simbologia introduzida por Timoshenko para a Teoria da Elasticidade Linear, um subconjunto da Mecânica dos Contínuos.

Considera-se um sólido referenciado a um sistema cartesiano de coordenadas ortogonais levogiro xyz .

O corpo em questão está solicitado por ações (carregamentos) aplicadas à sua superfície externa $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \left(\frac{N}{m^2}\right)$ e ações à distância aplicadas sobre sua massa (tal como a gravidade) $x, y, z, \left(\frac{N}{m^3}\right)$.

2.1 Tensões

Devido às ações externas aplicadas sobre o corpo em questão, um elemento extraído de seu interior terá suas faces sob efeito de uma intensidade de força por unidade de área denominada tensão ($Pa = \frac{N}{m^2}$), um vetor com intensidade, direção e sentido.

Considerando-se esse elemento um cubo de faces normais aos eixos coordenados, o vetor tensão em uma delas pode ser decomposto nas 3 direções do espaço.

Pode-se ter, assim, componentes normais às faces, designadas como tensões normais, simbolizadas pela letra grega minúscula σ (sigma), com um subscrito indicando a direção do respectivo eixo, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$. Essas componentes serão positivas se seus sentidos concordarem com o sentido dos eixos coordenados em uma face de normal positiva. Caso contrário serão negativas. Obviamente, serão também positivas se seus sentidos discordarem do sentido dos eixos coordenados em uma face de normal negativa e negativas caso contrário. Nessa convenção de sinais, tensões de tração resultam positivas e de compressão negativas.

Também se pode ter componentes tangenciais às faces, designadas por tensões tangenciais, ou de cisalhamento, simbolizadas pela letra grega minúscula τ (tau), com dois subscritos, o primeiro indicando o eixo normal àquela superfície e o segundo a direção do eixo a que é paralela, $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$. Novamente, essas componentes de tensão serão positivas se seus sentidos concordarem com o dos eixos coordenados em uma face de normal positiva. Caso contrário serão negativas. Obviamente, serão também positivas se seus sentidos discordarem do sentido dos eixos coordenados em uma face de normal negativa e negativas caso contrário. Nessa convenção, o vetor momento das forças devidas a tensões tangenciais positivas (multiplicadas pela área a que estão aplicadas) com relação aos eixos coordenados tem sentido positivo.

É importante ter consciência de que essas tensões são funções das coordenadas x, y e z e do tempo t , ou seja, seu valor, no caso geral, varia ponto a ponto e instante a instante.

2.2 Deslocamentos e deformações

Devido às ações atuantes sobre o corpo, um ponto genérico em seu interior, designado por P , pode se deslocar nas três direções do espaço. As funções que fornecem esses deslocamentos são, respectivamente, $u(x,y,z,t)$, $v(x,y,z,t)$ e $w(x,y,z,t)$.

Entretanto, o interesse na Engenharia é nas mudanças de dimensões e de formas que o corpo sofre, denominadas deformações, e não nos deslocamentos em si. Para se medir essas deformações, é necessário determinar as variações dos deslocamentos de pontos infinitesimalmente próximos.

A razão entre uma distância infinitesimal na direção de um dos eixos coordenados mudou e seu comprimento original é designado pela letra grega minúscula (*épsilon*), com um subscrito definindo sua direção, ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z . É positiva se expressar um aumento de comprimento e negativa uma diminuição.

A variação do ângulo reto originalmente existente entre duas direções paralelas aos eixos coordenados é designada pela letra grega minúscula γ (gama), com dois subscritos indicando essas duas direções, γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz} .

3.COORDENADAS POLARES E SÓLIDOS AXISSIMÉTRICOS

Em alguns modelos matemáticos de sólidos, condições de simetria geométrica e/ou de carregamentos com relação a um polo ou um eixo podem ser mais facilmente tratadas por um sistema de referência diferente das já mencionadas coordenadas cartesianas ortogonais.

No caso de alguns modelos de chapas, tais como discos, coroas e cunhas, coordenadas polares podem ser mais convenientes, ou seja, o raio r com relação a um polo e um ângulo θ . Nesses casos, as expressões para tensões, deslocamentos e deformações podem ser referenciadas a essas coordenadas e serão identificadas na seção correspondente.

No caso de alguns modelos de cascas, tais como vasos de pressão (fuselagens) e tubos, resultantes de rotação de linhas ou áreas em torno de um eixo, com carregamentos simétricos em relação a esse eixo, temos o caso de sólidos axisimétricos. Neles, um ganho considerável de simplicidade na modelagem matemática é conseguido pelo uso de coordenadas tais como o raio r com relação ao eixo de simetria, um ângulo θ , e uma coordenada z longitudinal. Nesses casos, as

expressões para tensões, deslocamentos e deformações podem ser referenciadas a essas coordenadas e serão identificadas na seção correspondente.

4. SIMBOLOGIA DE VETORES E MATRIZES

Em geral, neste texto, matrizes são representadas por letras maiúsculas entre colchetes e vetores por letras minúsculas entre chaves.

A letra T sobrescrita à direita de uma matriz indica sua transposta, isto é, permutação de linhas por colunas. Um expoente -1 à direita de uma matriz indica sua inversa.

