

## **GABARITO - Sobre o Fenômeno Shakedown e o Atrito**

1. *Explique o que é shakedown. Quais fatores influenciam e como atuam no acontecimento deste fenômeno? (2,0)*

Considera-se, inicialmente, uma estrutura submetida a um carregamento cíclico, que se deforma plasticamente durante a primeira aplicação de carga. Nestas condições, shakedown pode ser definido como o processo que leva esta estrutura a atingir, após uma determinada quantidade de ciclos, um estado estacionário em que a resposta do material é perfeitamente elástica.

Muitos contatos demonstram evidências de deformação plástica sob a ação de cargas repetitivas e podem sofrer o processo de shakedown. O comportamento real desses contatos é complexo. A primeira passagem de um carregamento que exceda o limite elástico do material, de um ou de ambos os corpos em contato, dá origem a três efeitos separados, cada um dos quais tende a inibir a deformação plástica em ciclos de carregamento subsequentes e contribuem para o acontecimento do shakedown:

- (i) Tensões residuais são introduzidas, influenciando no campo de tensões atuando em cada ciclo de carregamento;
- (ii) O material pode encruar. O escoamento plástico nos primeiros ciclos de carregamento aumenta a tensão de escoamento efetiva nas aplicações subsequentes de carga, contribuindo dessa forma para que shakedown seja estabelecido;
- (iii) A deformação plástica inicial pode induzir, também, uma mudança na geometria de contato, podendo, dessa forma, resultar na redução da pressão de contato contribuindo, assim, para a ocorrência do shakedown.

Outro parâmetro que influencia no fenômeno shakedown é o atrito. De maneira geral, um tribossistema que possui um maior coeficiente de atrito tende a apresentar um menor limite shakedown.

Existe um carregamento máximo acima da qual o fenômeno shakedown não é mais possível, conhecido como "limite shakedown". A aplicação repetitiva de um carregamento, que exceda esse limite, causará repetida deformação plástica no estado estacionário.

2. *Disserte sobre os teoremas shakedown: o estático de Melan e o cinemático Koiter. (2,0)*

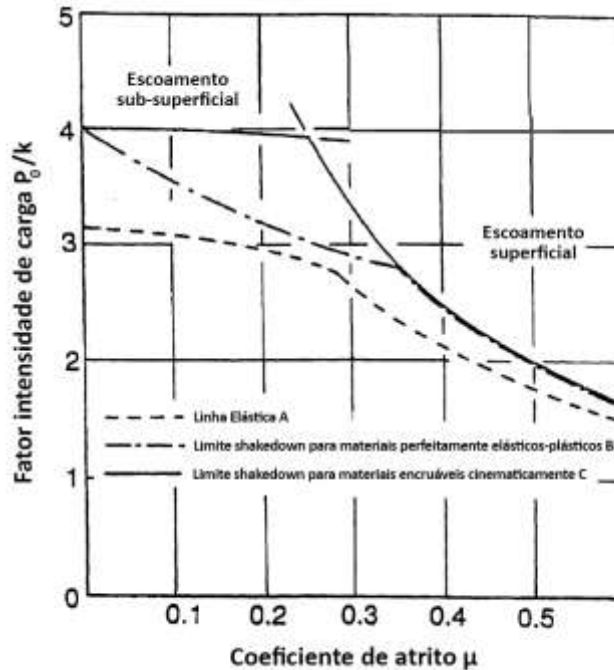
Uma das abordagens que pode ser utilizada para obter o limite shakedown é analítica e faz uso dos teoremas shakedown estático e cinemático postulados, respectivamente, por Melan e Koiter para obter fronteiras superior e inferior do limite shakedown:

(i) O teorema estático, devido à Melan afirma que: se qualquer campo de tensões residuais no regime estacionário, que satisfaça as condições de equilíbrio, possa ser encontrado de forma que em nenhum momento o limite de escoamento é ultrapassado, então shakedown ocorrerá. Este teorema fornece uma fronteira inferior do limite shakedown (WILLIAMS, 2005);

(ii) O teorema cinemático, devido à Koiter afirma que: shakedown não ocorrerá caso, no regime estacionário, exista um ciclo cinematicamente admissível de deformação plástica em que o trabalho realizado pelas cargas externas exceda o trabalho de dissipação plástica interna. Este teorema proporciona, assim, uma fronteira superior do limite shakedown (WILLIAMS, 2005);

A aplicação desses teoremas fornece fronteiras para o limite shakedown. Em alguns casos, é feito um refino nos resultados para que as duas fronteiras tendam ao encontro e, assim, o limite exato é estabelecido.

3. Desenhe um diagrama shakedown. Disserte sobre as diferentes regiões do diagrama. (1,5)



O diagrama shakedown correlaciona fator intensidade de carga e atrito. Nele é possível prever o comportamento do material sob efeito de carregamento cíclico para um dado coeficiente de atrito:

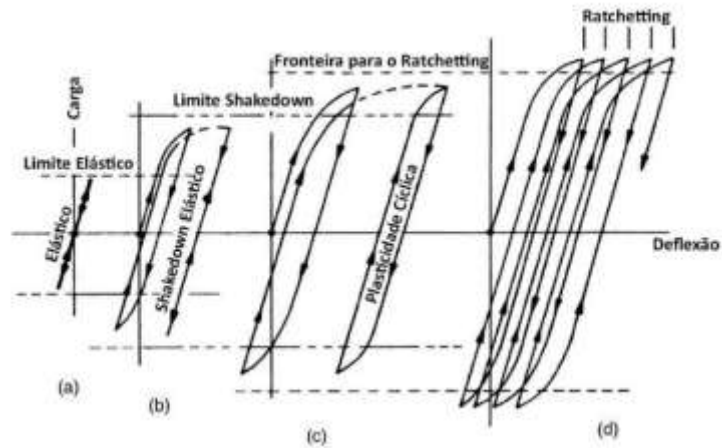
Se o ponto de operação fica abaixo da curva A (limite elástico), nenhum elemento do material atinge o escoamento, e o material responderia elasticamente;

Entre as curvas A e B, um material perfeitamente elasto-plástico escoará inicialmente, mas atingirá o shakedown em regime permanente. A elevação da curva B em relação a A indica a contribuição das tensões residuais para o shakedown;

Condições entre B e C somente resultam em shakedown se o material for capaz de encruar. A elevação da curva C em relação a B indica a contribuição do encruamento ao fenômeno shakedown.

Acima da curva C, o carregamento se encontra acima do limite shakedown e, dessa forma, ocorre deformação plástica a cada ciclo de carregamento. Caso o coeficiente de atrito seja baixo o suficiente para que esse escoamento seja sub-superficial, o material é submetido a plasticidade cíclica. Caso o coeficiente de atrito seja alto o suficiente para que a máxima tensão de cisalhamento ocorra na superfície, o escoamento é superficial e o material é submetido a plasticidade incremental (ratchetting).

4. Quais os possíveis comportamentos de um material quando submetido a um carregamento cíclico? Explique como o material sofre cada um desses comportamentos. (2,5)



As diferentes respostas que um material sob efeito de carregamento cíclico pode apresentar são ilustradas na Figura acima. Se a carga é suficientemente pequena para que nenhum elemento do material atinja o escoamento, então a resposta do material será completamente elástica ao longo de todo conjunto de ciclos de carregamento, Figura a.

Acima do limite elástico, deformação plástica ocorrerá no material solicitado ao menos na primeira aplicação de carga. Contudo, por causa do desenvolvimento de tensões residuais, encruamento e uma possível mudança na geometria de contato, o material pode alcançar, no regime estacionário, uma resposta completamente elástica, denominada shakedown, Figura b.

Acima do limite shakedown, o material pode apresentar dois comportamentos: plasticidade cíclica e incremental (ratchetting). Na plasticidade cíclica, o material fica submetido a um ciclo fechado de deformação plástica no regime estacionário, não havendo incremento líquido de deformação plástica entre os ciclos de carregamento, Figura c. Esse ciclo ocorre quando a região de escoamento está confinada abaixo da superfície e envolve material que ainda não atingiu seu limite elástico. Esse “recobrimento” de material elástico atua impedindo o crescimento líquido de deformação plástica entre os ciclos de carregamento e a região mais solicitada acaba submetida a um ciclo fechado de deformação plástica. Materiais submetidos à plasticidade cíclica, em geral, falham por fadiga de baixo ciclo.

Na plasticidade incremental, também conhecida como ratchetting, o escoamento ocorre na superfície, de forma que o material estaria “livre” para acumular deformação plástica a cada ciclo de carregamento, Figura d. Quando submetidos à plasticidade incremental, o material nucleia prematuramente algum defeito ou falha por esgotamento plástico, sendo, dessa forma, uma condição mais severa do que a plasticidade cíclica.

5. *Disserte sobre os possíveis modelos de encruamento que podem ser utilizados em uma análise shakedown. Quais modelos são recomendados e por quê? (2,0)*

Existem quatro tipos modelo de encruamento principais que podem ser utilizados na análise: Isotrópico, Cinemático linear, Cinemático não-linear e Combinado.

O encruamento isotrópico corresponde a uma expansão uniforme de uma superfície de escoamento inicial. Uma lei de encruamento isotrópica geralmente não é útil em situações onde o material é sujeito a carregamento cíclico. Ela não leva em consideração o efeito Bauschinger e, assim, o modelo prediz que após poucos ciclos de carregamento o material simplesmente encruará até que responda elasticamente. Este modelo rejeita a possibilidade de ambas plasticidades, cíclica e incremental.

Uma representação útil de um encruamento anisotrópico é a de um encruamento cinemático linear, onde a superfície de escoamento inicial mantém um tamanho constante, mas pode transladar no campo de tensões. Apesar do encruamento cinemático linear representar uma aproximação inicial para considerar o efeito Bauschinger, e ser utilizado para modelar carregamentos cíclicos, ele também rejeita a possibilidade de ambas plasticidades cíclica e incremental.

No encruamento cinemático não-linear, módulo de encruamento não é constante (como no cinemático linear) e decresce com o aumento progressivo da deformação plástica. Apesar de não ser capaz de prever a plasticidade cíclica, o modelo de encruamento cinemático não-linear é, sim, capaz de prever a plasticidade incremental, sendo dessa forma, indicado para análises shakedown.

Um modelo de encruamento combinado seria constituído da sobreposição de encruamentos isotrópico e cinemático não-linear. Um modelo combinado desta forma seria, dentre os modelos apresentados, a melhor representação de um encruamento real e o mais indicado para uma análise shakedown. Nele, a superfície inicial de escoamento estaria livre para expandir em tamanho e transladar no campo de tensões. A utilização de um modelo combinado prevê a possibilidade de plasticidade cíclica e apresenta uma melhor correlação com a plasticidade incremental observada experimentalmente.