

# *Reologia de Materiais Geológicos*

Anderson Moraes

1. Discuta a essência do conceito de relações constitutivas no âmbito estritamente matemático.
2. Quantos parâmetros elásticos são necessários para descrever um meio contínuo elástico (i) isotrópico, (ii) com isotropia transversal e (iii) ortorrômbico?
3. Abaixo são mostrados dados obtidos em um ensaio uniaxial de laboratório de mecânica de rochas para uma amostra de rocha ainda no campo do comportamento elástico, onde  $\sigma_a$  é a tensão axial,  $\epsilon_a$  é a deformação infinitesimal axial e  $\epsilon_t$  é a deformação infinitesimal transversal. Calcule o módulo de Young e o coeficiente de Poisson para a rocha.

$$\begin{aligned}\sigma_a &= (22, 42 \ 46, 38) \text{ MPa} \\ \epsilon_a &= (0, 00151 \ 0, 00312) \\ \epsilon_t &= (0, 00056 \ 0, 00116)\end{aligned}$$

4. Discuta o significado físico do coeficiente de Poisson.
5. Prove que para um meio contínuo isotrópico com comportamento elástico o coeficiente de Poisson varia de 0 a 0,5, seus valores mínimos e máximo teóricos.
6. Baseando-se na figura abaixo, calcule o coeficiente de Poisson do patinho de banheira. Supondo que a deformação apresentada seja a máxima que um bebê consiga imprimir, estime o módulo de Young do patinho de banheira.



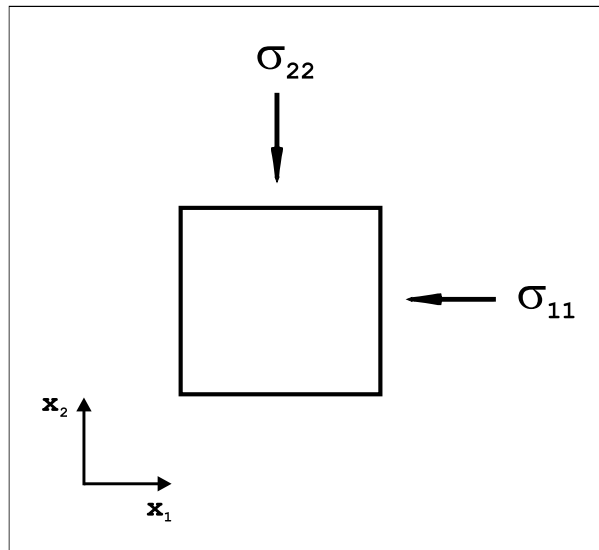
7. Determine o tensor de tensão correspondente ao tensor de deformação infinitesimal abaixo para um meio contínuo isotrópico com comportamento elástico com módulo de Young de 20 GPa e coeficiente de Poisson de 0,25.

$$\begin{pmatrix} -0,004 & 0,003 & 0 \\ 0,003 & -0,002 & 0 \\ 0 & 0 & 0,001 \end{pmatrix}$$

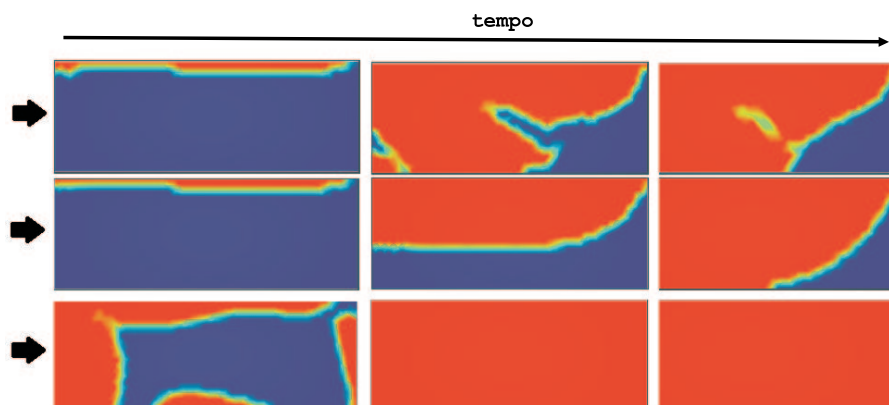
8. Considerando a crosta como um meio isotrópico e com comportamento elástico, mostre a relação entre a tensão vertical e as tensões horizontais supondo que a crosta esteja totalmente confinada lateralmente.
9. Considere um meio elástico linear isotrópico com  $E = 20$  GPa e  $\nu = 0,32$  e um meio elástico linear anisotrópico com isotropia transversal, onde o plano horizontal  $x_1x_2$  é o plano de simetria, com  $E_{11} = 100$  GPa,  $E_{33} = 20$  GPa,  $G_{13} = 10$  GPa,  $\nu_{21} = 0,32$  e  $\nu_{31} = 0,32$ . Calcule os tensores de deformação infinitesimal para cada um dos meios quando ambos são solicitados por um estado de tensão tal que  $\sigma_{11} = -66$  MPa,  $\sigma_{22} = -66$  MPa,  $\sigma_{33} = -100$  MPa,  $\sigma_{12} = -10$  MPa,  $\sigma_{13} = -50$  MPa e  $\sigma_{23} = 20$  MPa. O que se pode dizer sobre a coaxialidade entre os tensores de tensão e de deformação infinitesimal em cada caso?
10. Você modelaria o manto litosférico através do comportamento elástico? Discorra sobre esta questão.
11. Supondo comportamento elástico, estime a tensão gerada devido ao aumento de temperatura de 100 °C em um corpo de granito que está no meio da crosta superior. Você acha o valor encontrado significativo?
12. Discuta os aspectos relativos à energia mecânica no que concerne aos diversos tipos de comportamento plástico anteriormente discutidos.
13. Abaixo encontram-se os dados para a tensão axial  $\sigma_a$  e para a deformação infinitesimal axial  $\epsilon_a$  relativos a um ensaio uniaxial em laboratório de mecânica de rochas em uma amostra de rocha. Construa o gráfico  $\sigma_a \times \epsilon_a$ , comente sobre o tipo de comportamento elastoplástico que a curva de ajuste dos dados sugere, determine o *yield strength* e discuta o seu significado.

$$\begin{aligned} \sigma_a &= (0 \ 5 \ 14 \ 21 \ 32 \ 43 \ 54 \ 59 \ 60 \ 61 \ 60 \ 57 \ 54 \ 50 \ 43 \ 39) \text{ MPa} \\ \epsilon_a &= (0 \ 0,06 \ 0,15 \ 0,21 \ 0,31 \ 0,41 \ 0,53 \ 0,62 \\ &\quad 0,69 \ 0,78 \ 0,83 \ 0,92 \ 0,99 \ 1,06 \ 1,18 \ 1,32)\% \end{aligned}$$

14. A figura abaixo esquematiza as tensões prescritas em um meio contínuo em estado plano de deformação com comportamento elastoplástico associado. Inicialmente tem-se  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = -20$  MPa. Em seguida  $\sigma_{11}$  caminha para  $-5$  MPa e  $\sigma_{22}$  é mantida constante. Considere um módulo de Young  $E = 5$  GPa, um coeficiente de Poisson  $\nu = 0,32$  e um critério de fluxo  $f = 3\sigma_{11} - \sigma_{22}$ . Utilize uma função de carregamento plástico de  $d\lambda = 10^{-4}$  para incrementos de tensão  $d\sigma_{11} = 1.500$  Pa e  $d\sigma_{22} = -2.000$  Pa. Calcule a tensão  $\sigma_{11}$  quando se instaura o fluxo plástico e as deformações elásticas, plásticas e totais acumuladas nas direções  $x_1$  e  $x_2$ .

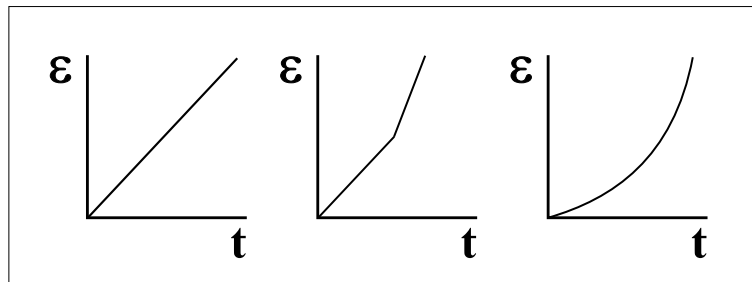


15. Determine no contexto do exercício anterior a matriz constitutiva elastoplástica.
16. Estabeleça as relações entre os *yield strenght* do critério de Tresca e do critério de von Mises para  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$ , para  $\sigma_1 \neq 0$  e  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , para  $\sigma_1 \neq \sigma_3$  e  $\sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$  e para o estado plano de tensão com  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq 0$ . O que se pode concluir das relações obtidas?
17. A figura abaixo mostra a porção plastificada (vermelho) de três modelos numéricos pelo método dos elementos finitos para a inversão compressional em uma bacia sedimentar em três estágios no tempo com deslocamentos horizontais progressivamente maiores. Qual deles é o modelo rígido-plástico, modelo elastoplástico por *hardening* e modelo elastoplástico por *softening*?



18. Um ensaio triaxial de laboratório de mecânica de rochas para uma amostra de sal resultou em uma tensão axial  $\sigma_a = 32,1$  MPa e uma tensão transversal  $\sigma_t = 22,1$  MPa quando a amostra fluía estavelmente, possibilitando extrapolar uma taxa de deformação infinitesimal axial  $\dot{\epsilon}_a = 2,21 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$  e uma taxa de deformação infinitesimal transversal  $\dot{\epsilon}_t = 1,05 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ . Supondo comportamento viscoso newtoniano, calcule a viscosidade da amostra de sal.
19. Uma camada inclinada de sal aflorante com 500 m de espessura flui com uma velocidade constante paralela à camada em seu topo de  $10^{-9} \text{ ms}^{-1}$ . Considerando-se um problema em duas dimensões em equilíbrio, o sal como um meio contínuo com comportamento viscoso newtoniano e incompressível, uma densidade de  $2.100 \text{ kgm}^{-3}$  e uma viscosidade de  $10^{17} \text{ Pas}$  para o sal e uma aceleração devido à gravidade de  $9,8 \text{ ms}^{-2}$ , disponha a equação de Navier-Stokes para o problema, apresente a solução para o perfil da velocidade paralela à camada, calcule a inclinação da camada de sal e calcule a maior tensão cisalhante devido ao fluxo viscoso da camada. Discuta as implicações geológicas dos resultados.
20. Considerando-se um comportamento viscoso e valores factíveis para os parâmetros envolvidos, encontre as taxas de deformação para a crosta e para o manto quando ambos são submetidos a um diferencial de tensão de 50 MPa a uma temperatura de 800 °C.
21. Escreva a equação experimental do fluxo viscoso para *dislocation creep* com o segundo invariante do tensor de taxas de deformações infinitesimais desviadoras em função do segundo invariante do tensor de tensões desviadoras.

22. Pesquise sobre o comportamento viscoso do sal. Compare tensões diferenciais suportadas pelo sal ao considerá-lo ora como um material com comportamento viscoso newtoniano e ora como um material com comportamento viscoso não-newtoniano. Discuta as implicações geológicas.
23. Considerando a figura abaixo, relacione-as aos comportamentos reológicos básicos para tensões continuamente progressivas ao longo do tempo.



24. Sugira os comportamentos reológicos mais adequados para se modelar a crosta continental em escala geodinâmica.
25. A coaxialidade entre a tensão e a deformação infinitesimal e, mais ainda, a coaxialidade entre a tensão e a deformação finita são geralmente exceção e não regra em ambientes geológicos. A afirmativa é correta. Por que raramente ocorre isto? Discuta as implicações em geologia estrutural.
26. Suponha que você colida com o seu veículo em um muro de concreto. Que comportamento reológico você gostaria que seu veículo possuísse? Pense em salvar você e não o seu veículo!