

# *Resistência da Litosfera*

Anderson Moraes

A resistência da litosfera é estabelecida pelo limite das tensões que a litosfera pode suportar, sendo determinada ao se considerar os experimentos em laboratório conduzidos para investigar os comportamentos rúptil, de transição rúptil-dúctil e dúctil. Esses experimentos evidenciam que as tensões suportadas pela litosfera dependem de sua composição e de sua estrutura termomecânica, com as taxas de deformação envolvidas encerrando uma importância seminal. O conceito de *yield strength envelope*, ou simplesmente YSE, é a envoltória que limita a tensão diferencial  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$  suportada pela litosfera. Considerando-se o comportamento rúptil para a litosfera como um comportamento elastoplástico friccional, portanto independente do tempo, o limite para a tensão diferencial suportada pela litosfera pode ser satisfatoriamente dado pelos critérios de Byerlee e de Mohr-Coulomb. Dessa forma, tomando-se o critério de Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1^e = \frac{2\sigma_0 \cos \phi + \sigma_3^e(1 + \sin \phi)}{1 - \sin \phi} \quad (1)$$

onde  $\sigma_0$  é a coesão e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno, e com uma pequena manipulação, tem-se a tensão diferencial em regime rúptil dada por:

$$\sigma_d = \frac{2(\sigma_0 \cos \phi + \sigma_3^e \sin \phi)}{1 - \sin \phi} \quad (2)$$

O comportamento dúctil para a litosfera é representado por um comportamento viscoso, portanto dependente do tempo. Assim, o limite para a tensão diferencial que a litosfera pode suportar advém, de uma forma genérica, da expressão:

$$\dot{\epsilon} = Ad^{-m}\sigma_d^n e^{\left(-\frac{E_a+pV_a}{RT}\right)} \quad (3)$$

onde  $\dot{\epsilon}$  é a taxa de deformação,  $A$  é um parâmetro específico da rocha, chamado comumente de fator pré-exponencial,  $d$  é o tamanho dos grãos minerais,  $m$  é o expoente do tamanho dos grãos minerais,  $\sigma_d$  é a tensão diferencial ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ),  $n$  é o expoente da tensão,  $E_a$  é a energia de ativação,  $p$  é a pressão,  $V_a$  é o volume de ativação,  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  é a temperatura, que rearranjada fornece:

$$\sigma_d = \sqrt[n]{\frac{\dot{\epsilon} d^m e^{\left(\frac{E_a + pV_a}{RT}\right)}}{A}} \quad (4)$$

Em decorrência, através das equações 2 e 4 pode-se construir o YSE em função da profundidade para a litosfera. Na construção do YSE deve-se tomar o menor valor para as tensões diferenciais calculadas, com a transição rúptil-dúctil se dando teoricamente nas proximidades da intersecção das curvas. Grosso modo, as porções rúptil e dúctil da litosfera, batizadas respectivamente de esquizosfera e plastosfera, delimitariam as porções onde ocorrem os terremotos na parte superior da litosfera. A Figura 1 mostra esquematicamente o YSE para os campos tracional e compressional e para os regimes de falha normal, transcorrente e reversa para uma litosfera composta de quatro porções termomecânicas distintas. O perfil apresentado é típico para a litosfera continental. A unidade superior, por exemplo a crosta, representada pelo comportamento mecânico do quartzo, está dividida em crosta superior com comportamento rúptil e crosta inferior com comportamento dúctil. A unidade inferior, por exemplo o manto litosférico, representado pelo comportamento mecânico da olivina, está dividido em uma porção superior com comportamento rúptil e uma porção inferior com comportamento dúctil. O perfil típico para a litosfera oceânica é baseado em experimentos relativos ao comportamento mecânico da olivina, com uma porção superior controlada pelo comportamento rúptil e uma porção inferior controlada pelo comportamento dúctil. Note que, considerando-se em especial o comportamento rúptil para a litosfera, em acordo com 2, a depender de se ter a tensão principal mínima tracional ( $\sigma_3 < 0$ ) ou compressional ( $\sigma_3 > 0$ ), as tensões diferenciais em profundidade serão menores ou maiores, respectivamente. Ainda, a depender do regime tectônico ser de falha normal ( $\sigma_h = \sigma_3$ ) ou de falha reversa ( $\sigma_V = \sigma_3$ ), as tensões diferenciais em profundidade serão menores ou maiores, na ordem, com o regime de falha transcorrente determinando tensões diferenciais intermediárias em relação aos demais regimes. Como o YSE limita as tensões diferenciais passíveis de serem sustentadas pela litosfera ao longo de sua estrutura em profundidade, pode-se tomar o padrão geral de sua distribuição em profundidade como uma indicação da resistência da litosfera como um todo. Dessa forma, define-se a resistência da litosfera  $R_l$  ao longo da profundidade  $z$  como:

$$R_l = \int_0^L \sigma_d dz \quad (5)$$

onde  $L$  é a espessura da litosfera e sendo  $R_l$  dada em unidade de tensão vezes unidade de comprimento ou unidade de força por unidade de compri-

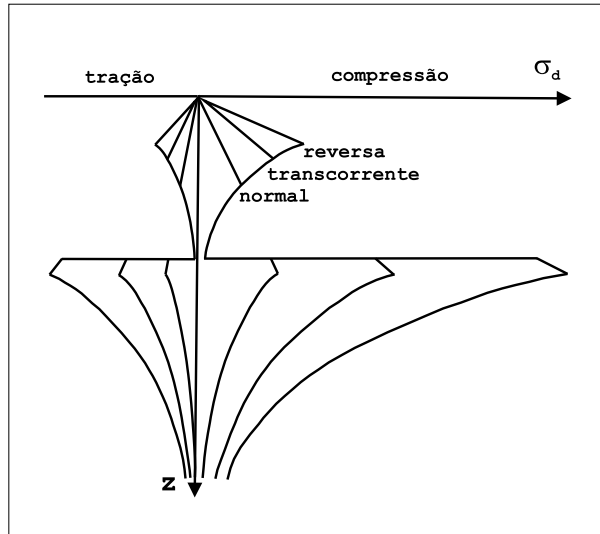


Figura 1: YSE para para uma litosfera composta de quatro porções termomecânicas distintas.

mento. Rigorosamente, pode-se entender a resistência da litosfera como aqui definida como sendo a força por unidade de largura da litosfera requerida para a deformar inelasticamente ao se considerar determinada taxa de deformação. Em outras palavras, a área sob a curva delimitada pelo YSE indica a resistência da litosfera considerando-a como uma entidade termomecânica única. Considerando-se taxas de deformação geologicamente compatíveis, os valores da resistência da litosfera variam de  $10^{12}$  a  $10^{14}$   $\text{Nm}^{-1}$ , valores evidentemente compatíveis com as forças tectônicas. Deve-se se ter em mente que os modelos para o comportamento mecânico da litosfera são extremamente simplificados, principalmente com relação ao comportamento dúctil, quando geralmente se valem de experimentos laboratoriais que devem ser extrapolados para o tempo geológico e que são conduzidos na maioria das vezes com amostras monominerálicas. A literatura debate sobre o zoneamento mais adequado para o YSE para a litosfera continental ao longo do tempo geológico, se composto por uma unidade rígida, somente crustal, ou por duas unidades rígidas, uma crustal e outra mantélica, os alegoricamente denominados modelo “crème brûlée” e modelo “jelly-sandwich”, respectivamente, em analogia à estrutura de consistência dessas duas guloseimas. A Figura 2 esquematiza a sensibilidade do YSE e, por conseguinte, da resistência da litosfera a diversos fatores. Nota-se que (i) para modelos de uma litosfera continental composta com quartzo e olivina e de uma litosfera oceânica composta de olivina, a última é mais resistente, (ii) litosferas continentais com crostas mais espessas encerram menor resistência, (iii) o aumento da temperatura leva a

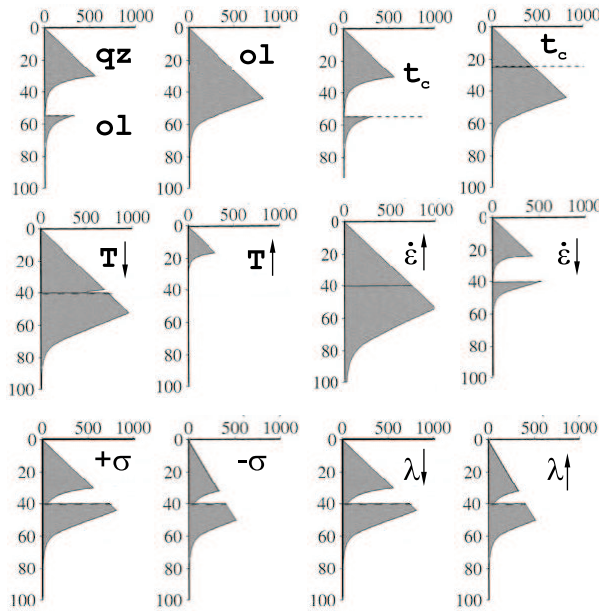


Figura 2: Sensibilidade do YSE a diversos fatores.

uma resistência menor, (iv) taxas de deformação altas enrigessem a litosfera, (v) tensões tectônicas de compressão e de tração, na ordem, deixam a litosfera mais e menos resistente e, finalmente, (vi) pressão de fluidos mais altas tornam a litosfera menos rígida. A Figura 3 encerra o efeito de, além de se considerar os comportamentos rúptil e dúctil, também se levar em conta o efeito elástico quando a litosfera com uma espessura  $H$ , tomada como inteiramente elástica, é dobrada flexuralmente na forma de um sinfornal. Nesse caso, tem-se tensões compressivas na porção superior e tensões tracionais na porção inferior, separadas pela superfície neutra. Quando tal quadro é contraposto ao YSE, nas regiões onde as tensões diferenciais devido ao dobramento por flexão são maiores que o YSE a litosfera perde resistência, levando mesmo a um desacoplamento mecânico da litosfera, representado pelas novas espessuras elásticas  $h_1$  e  $h_2$  que de fato suportariam o carregamento. Perfis do YSE menos ou mais elaborados para a litosfera podem ser idealizados a depender da concatenação de diversos fatores e paradigmas tectônicos. De fato, há ainda muito debate sobre a estrutura e o significado do YSE face a fenômenos geológicos relacionados a tempos geológicos mais significativos, como a formação de bacias sedimentares e a orogênese, e a tempos geológicos efêmeros, como a ocorrência e a distribuição da sismicidade.

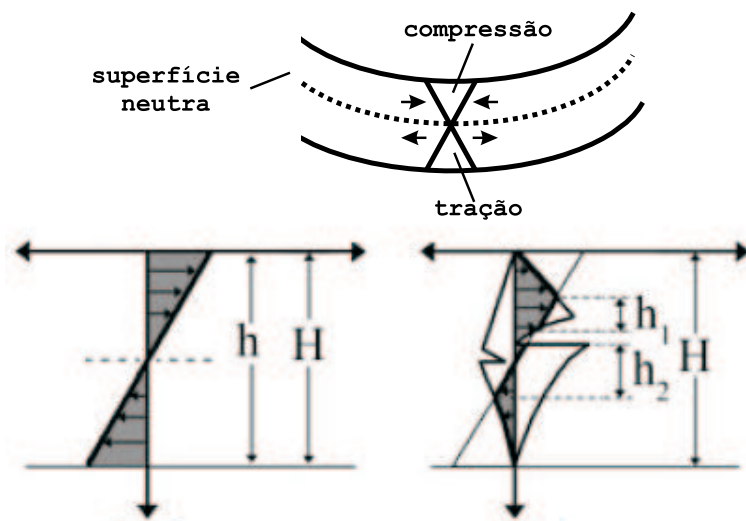


Figura 3: Efeito do dobramento por flexão na resistência da litosfera.