# Propriedades Térmicas de Materiais Cerâmicos
# Tensões Térmicas

Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

Departamento de Engenharia de Materiais – EESC/USP

# Tensões térmicas

- Cerâmicas têm pouca resistência a **tensões térmicas**:
  - Podem fraturar quando submetidas a um “grande” gradiente térmico, como consequência da
    - fragilidade (baixa tenacidade)
    - baixa condutividade térmica
  - Incompatibilidade de contração (ou expansão) térmica das fases em cerâmicas multifásicas
  - Anisotropia de contração (ou expansão térmica) em cerâmicas monofásicas (com estruturas atômicas não cúbicas)
  - Transformações de fase durante o processamento ou uso

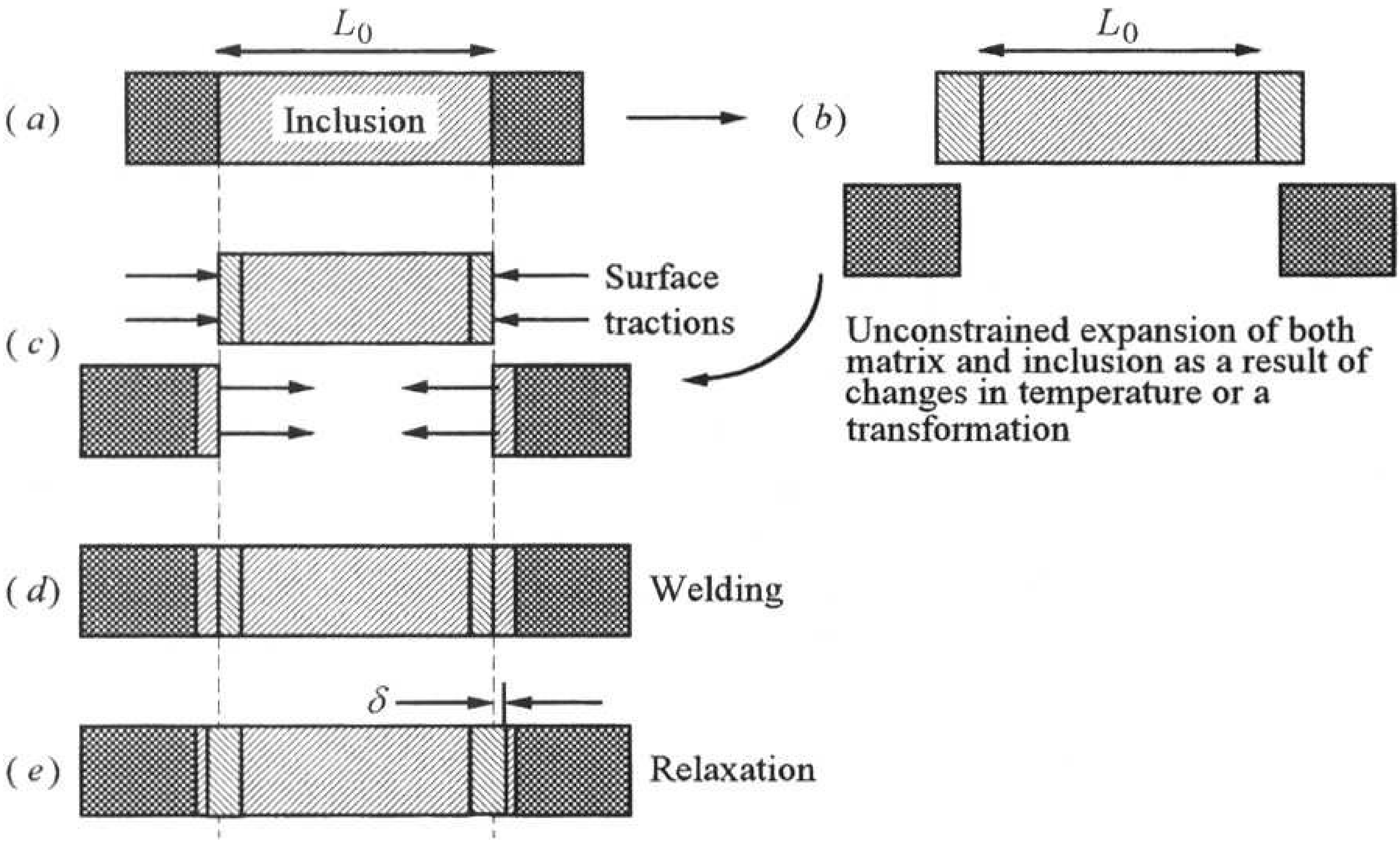
# Tensões térmicas

- Podem fraturar o material de forma irremediável.
- Podem formar microtrincas abaixo do tamanho crítico, afetando a resistência e a tenacidade.
- Usadas de forma controlada, podem aumentar a resistência, por exemplo, em vidros temperados.

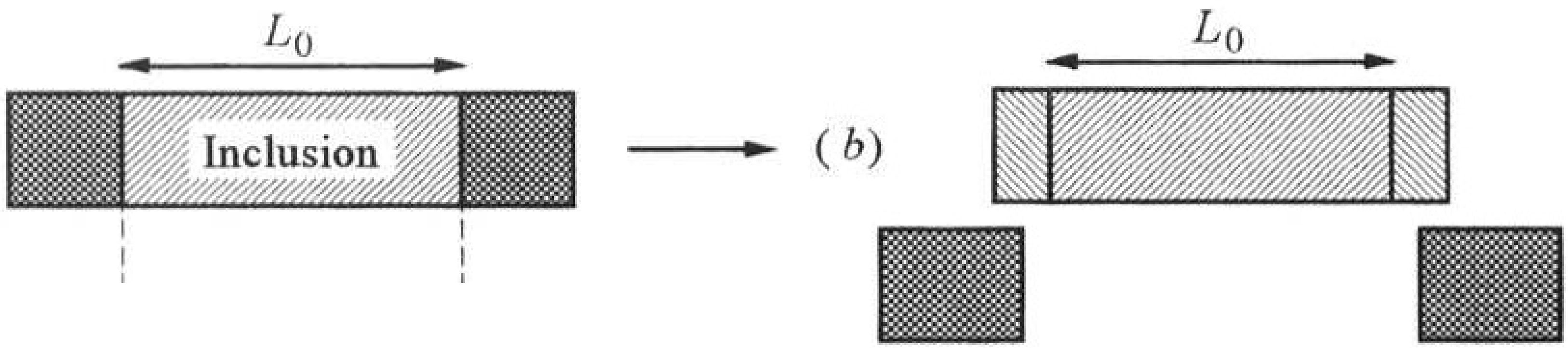
# Tensões térmicas

- É importante entender qualitativamente o que acontece com um sistema sujeito a tensões com a variação da temperatura.
- A resposta vai depender
  - dos valores relativos de coeficiente de expansão térmica (por exemplo, de uma inclusão e da matriz), e
  - se o sistema está aquecendo ou resfriando.

# Tensões térmicas – Método de Eshelby inclusão cilíndrica em uma matriz anelas



1. Cortar a inclusão e separá-la da matriz
2. Permitir que ambas (inclusão e matriz) expandam ou contraiam livremente como resultado de aquecimento ou resfriamento

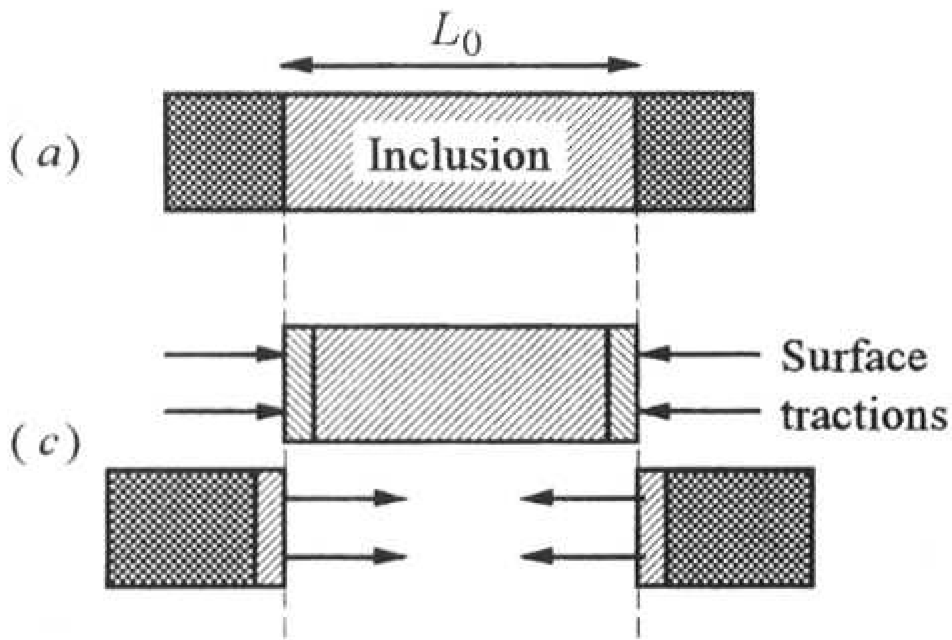



$$\frac{\Delta L}{L_0} = \varepsilon_i = \alpha_i \Delta T = \alpha_i (T_{\text{final}} - T_{\text{init}})$$

$$\boxed{\varepsilon_i = \alpha_i (T_{\text{final}} - T_{\text{init}})} \qquad (13.1)$$

$$\varepsilon_m = \alpha_m \Delta T \qquad (13.2)$$

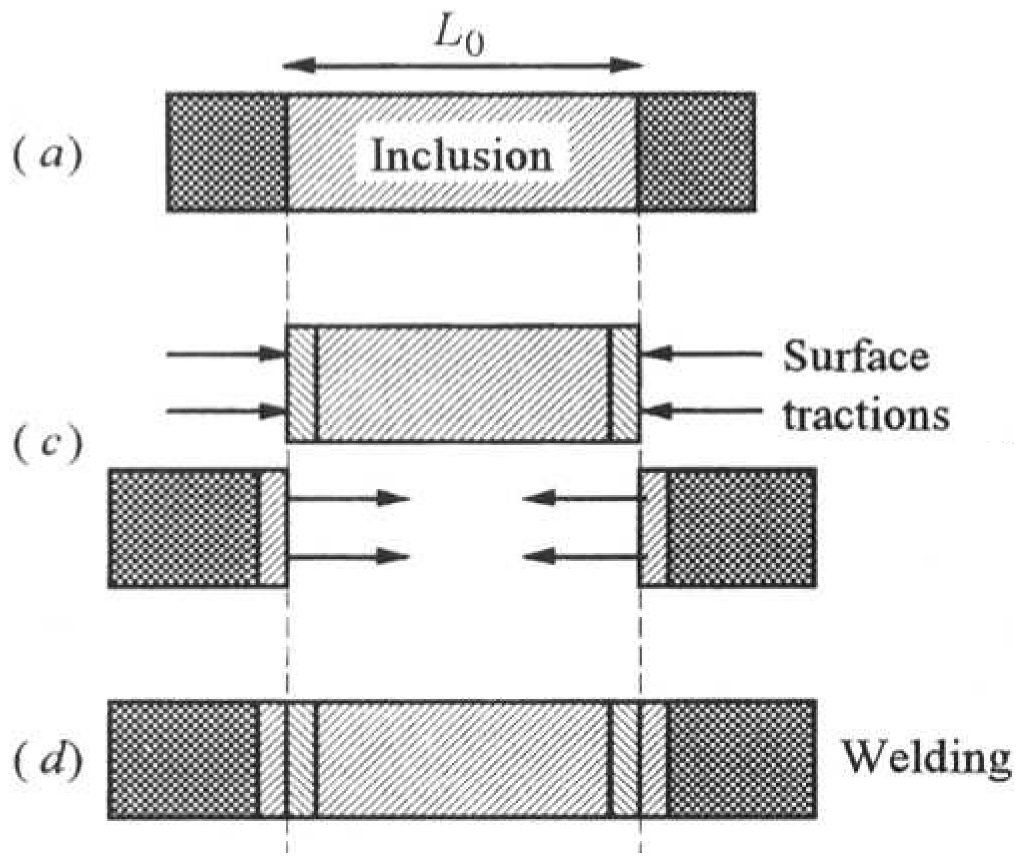
3. Aplicar tensões nas superfícies para que os elementos voltem ao seu formato original

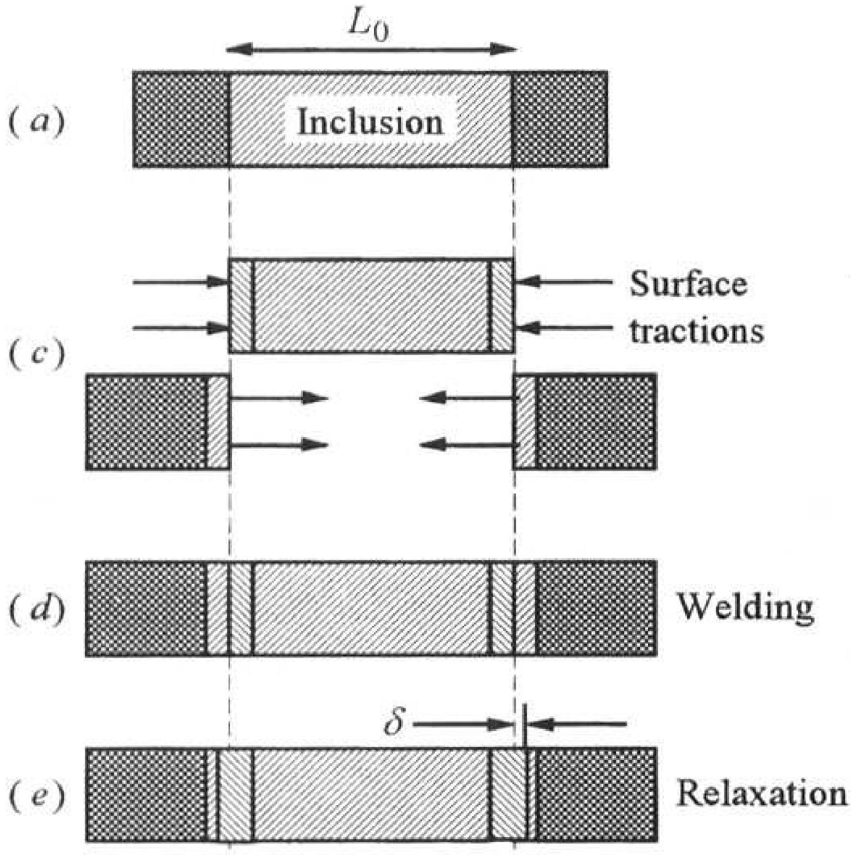



$$\sigma_i = -Y_i\varepsilon_i = -Y_i\alpha_i\Delta T \tag{13.3}$$

$$\sigma_m = Y_m\varepsilon_m = Y_m\alpha_m\Delta T \tag{13.4}$$

# 4. Solde (ligue) as peças novamente






5. Deixe o sistema relaxar até alcançar o equilíbrio

$$\sigma_{i,\mathrm{eq}} = Y_i[\varepsilon_i + \delta] = \sigma_{m,\mathrm{eq}} = Y_m[\varepsilon_m - \delta] \qquad (13.5)$$

$$\sigma_{i,\mathrm{eq}} = \sigma_{m,\mathrm{eq}} = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{1/Y_i + 1/Y_m} = \frac{(\alpha_m - \alpha_i)\Delta T}{1/Y_i + 1/Y_m} \qquad (13.6)$$

# Tensões térmicas – inclusão disco em uma matriz

$$\sigma_{i,\mathrm{eq}} = \sigma_{m,\mathrm{eq}} = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{1/Y_i + 1/Y_m} = \frac{(\alpha_m - \alpha_i)\Delta T}{1/Y_i + 1/Y_m} \qquad (13.6)$$

- Se $\Delta\alpha$=0, nenhuma tensão térmica ocorre
- Para $\alpha$i>$\alpha$m, no aquecimento ($\Delta$T>0), as tensões radiais são compressivas tanto na inclusão como na matriz
- Se a inclusão é totalmente impedida de expandir ($\alpha$m = 0 e Em = $\infty$), no aquecimento a tensão gerada será compressiva e no resfriamento será de tração:

$$\sigma_{i,\mathrm{eq}} = -Y_i\alpha_i\,\Delta T \qquad (13.7)$$

# Tensões térmicas inclusão fibra em uma matriz

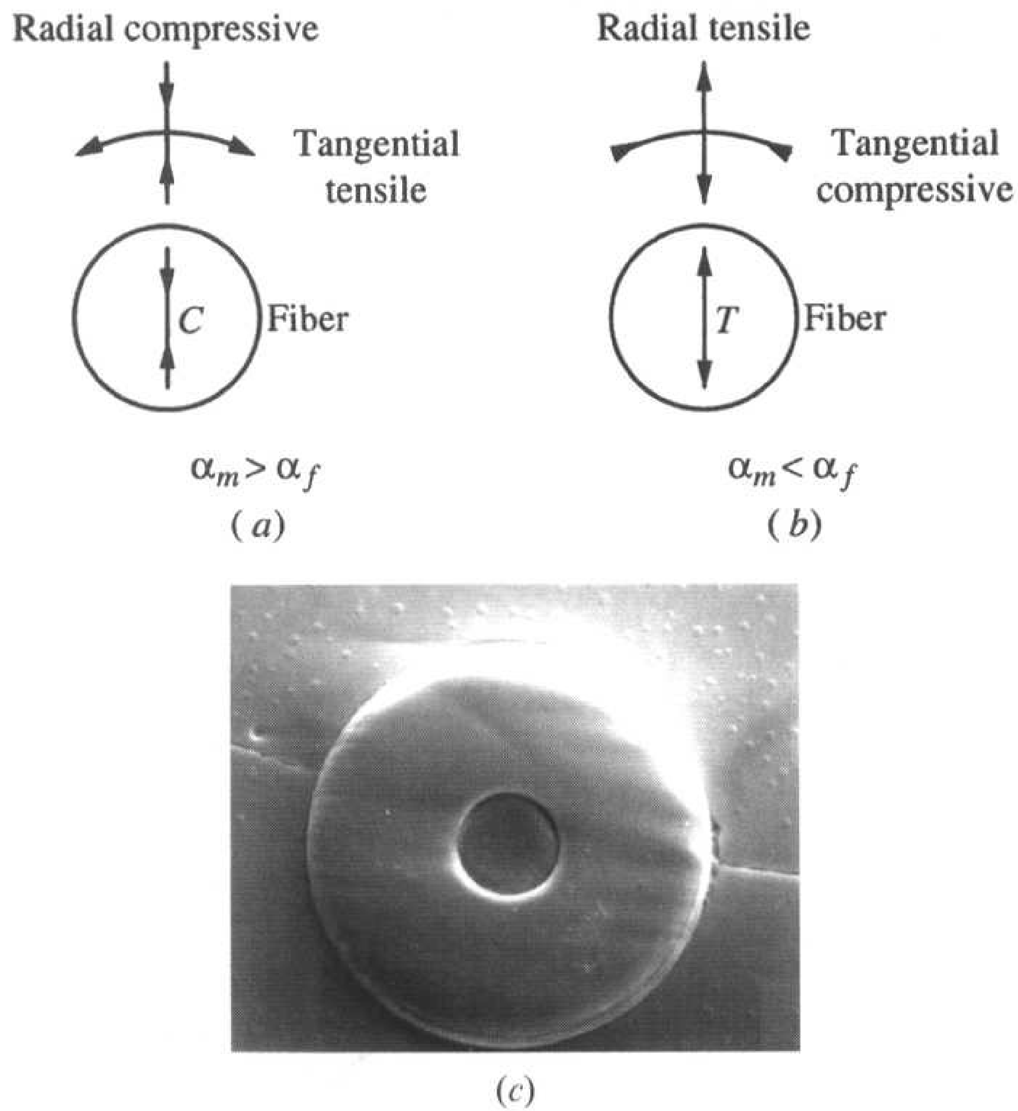



**Figure 13.2** Radial and tangential stresses developed upon cooling of a fiber embedded in a matrix for (*a*) $\alpha_m < \alpha_f$ and (*b*) $\alpha_m > \alpha_f$. (*c*) Micrograph of radial cracks generated around a fiber upon cooling when $\alpha_m > \alpha_f$.

# Tensões térmicas – inclusão esférica em uma matriz

$$\sigma_{\text{rad}} = -2\sigma_{\tan} = \frac{(\alpha_m - \alpha_i)\Delta T}{[(1-2\nu_i)/Y_i + (1+\nu_m)/2Y_m]}\left(\frac{R}{r+R}\right)^3 \qquad (11.17)$$

- Se $\Delta\alpha$=0, nenhuma tensão térmica ocorre
- Para $\alpha$i>$\alpha$m, no aquecimento ($\Delta T = T_{inicial} - T_{final} < 0$), as tensões radiais são compressivas tanto na inclusão como na matriz... (checar)