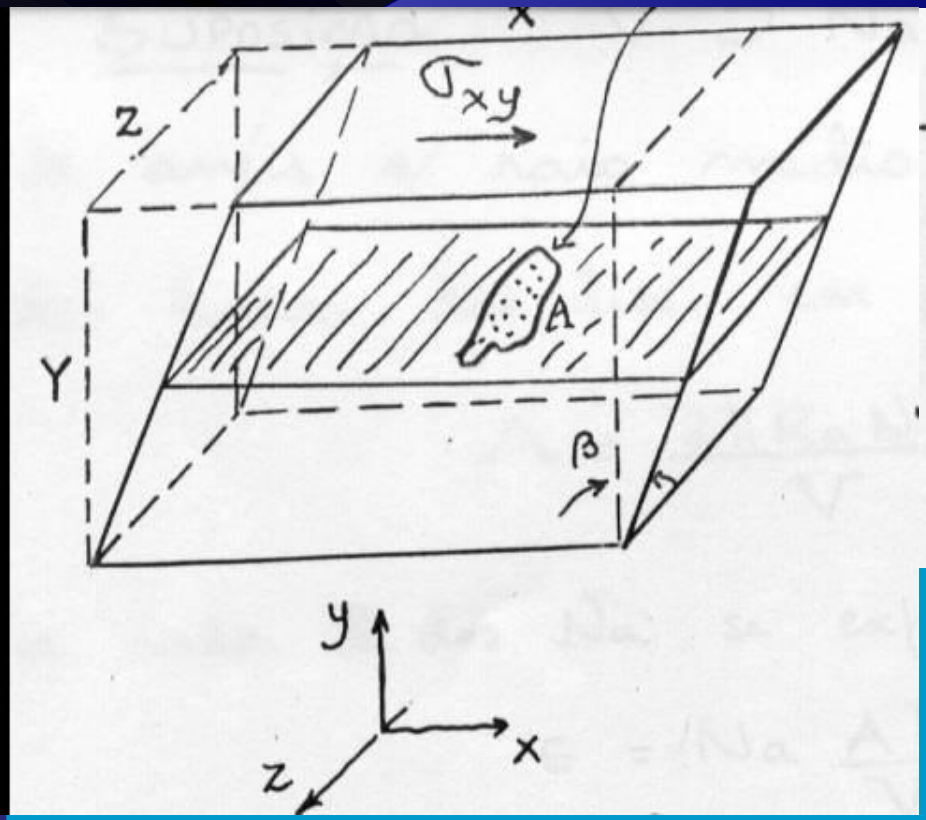
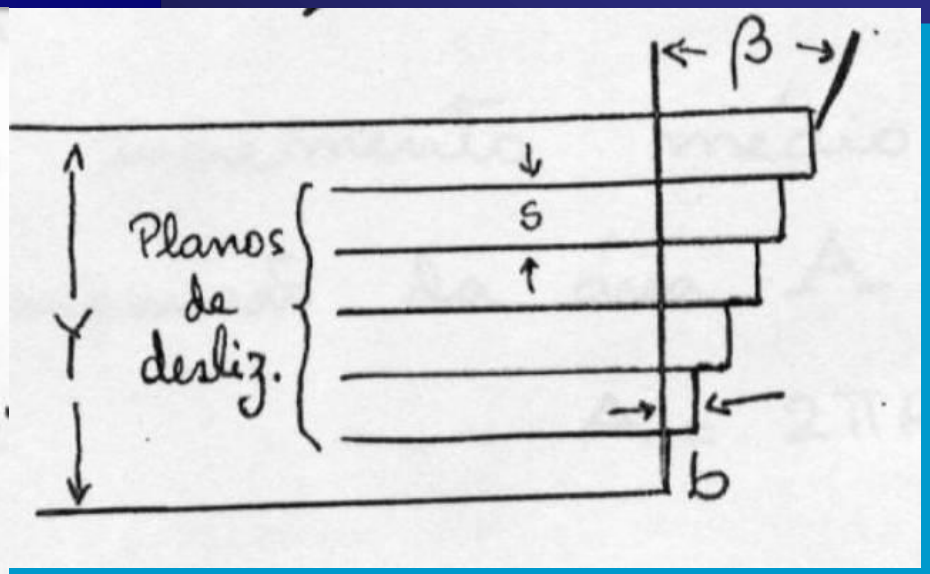
CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO DE CISALHAMENTO

A $\sigma_{cisalhamento}$ devida ao movimento mostrado na Fig. 44, pode ser determinada com ajuda da Fig. 45, que mostra um sólido em forma de paralelepípedo submetido a uma deformação lenta pela aplicação $\sigma_{cisalhamento}$. Após algum tempo, o bloco se apresentará deformado, indo da configuração inicial Fig. 45(a) [linhas tracejadas] até à configuração final [linhas cheias].

(a) **Plano de Deslizamento** (b)





A Deformação de Cisalhamento do paralelepípedo da Fig. 45(a) sujeito a σ_{xy} é dada por

$$\in = \frac{\partial u}{\partial y} = tg\beta$$

Fig. 45 – Diagrama para calcular a Deformação de Cisalhamento produzida por eventos de Deslizamento de Discordâncias que varrem uma área A.

No deslocamento da parte superior do sólido em relação à parte inferior

cada discordância varre Área A

XZ/A eventos ← Para deslocar o Plano Inteiro XZ

após este nº de eventos → distância escorregamento b.

Para produzir Deformação Macroscópica

caracterizada por β ou $\in = b/s$

são necessários $\frac{Y}{S}$ planos deslocados

Como, para produzir $\in$ são necessários XZ/A eventos, que deslocam (b x Y/S) planos deslizados ou,

$$\frac{\in}{evento} = \frac{\in}{\frac{XZ}{A}\frac{Y}{S}} = \frac{\in Ab}{XYZ\frac{b}{s}} = \frac{Ab}{V} \qquad (17)$$

Suposição – V contém Na discordâncias móveis na forma de anéis com raio médio Ra. O comprimento total das Linhas das Discordâncias em V é **2πRaNa** e a densidade

$$\Lambda = \frac{2\pi RaNa}{V} \qquad \textbf{(18)}$$

Se cada uma das Na se expandir por uma área A

$$\in = Na\frac{Ab}{V} = \frac{Ab\Lambda}{2\pi Ra}$$

O incremento médio no raio do anel, ΔRa, devido à expansão da área A é

$$A = 2\pi . Ra . \Delta Ra \Rightarrow \Delta Ra = \frac{A}{2\pi Ra}$$

$$\therefore \in = \Delta Ra . b . \Lambda \qquad (19)$$

Muitos eventos por unidade de tempo → define-se

$$v_d = \frac{\Delta Ra}{\Delta t}$$

(velocidade de deslizamento uniforme da linha da discordância)

Velocidade de deformação de cisalhamento

$$\dot{\epsilon} = \Lambda . b . v_d \quad \textbf{(20)}$$

A velocidade das discordâncias móveis é controlada pelas Forças de Atrito, devidas aos obstáculos que são encontrados ao longo do Plano de Deslizamento, durante o Deslizamento.

FORÇAS DE INTERAÇÃO ENTRE DISCORDÂNCIAS EM CUNHA VIZINHAS

Movimento em Planos de Deslizamento paralelos.

Discordâncias em cunha sobrepujam obstáculos no Plano de Deslizamento por Escalada.

Freqüentemente o obstáculo é outra discordância em cunha.

Queremos calcular a Força de Interação entre duas discordâncias em cunha.

1) Força por unidade de comprimento numa discordância em cunha devido a σ_{xy} e σ_{xx} é dada pela equação 15

$$\vec{F} = \pm[-\sigma_{xy} b\vec{i} + \sigma_{xx} b\vec{j}] \qquad (15)$$

2) A força vista por uma das discordâncias em cunha é devida, em parte, ao campo de Tensões da outra e, vice-versa. Este campo é dado pelas equações 7 e 8 que, convertidas para Coordenadas Cartesianas,

fornecem

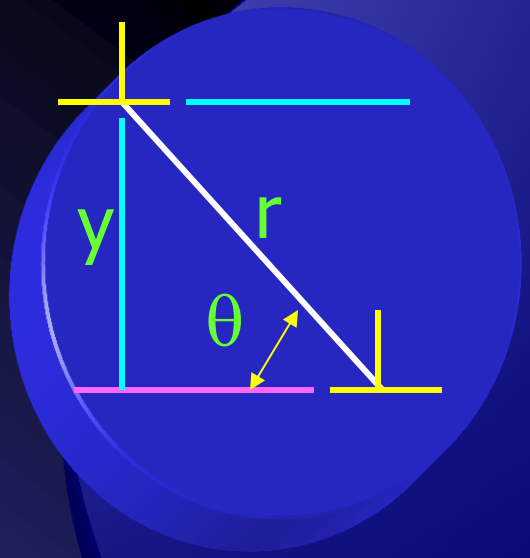
$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma_{rr} - 2\,\mathrm{sen}\,\theta\cos\theta.\sigma_{r\theta} & (21) \\ \sigma_{xy} = (\cos^2\theta - \mathrm{sen}^2\theta).\sigma_{r\theta} & (22) \end{cases}$$

Inserindo σ_{rr} e $\sigma_{r\theta}$ das equações 7 e 8 nas equações 21 e 22 e, substituindo as expressões obtidas para σ_{xx} e σ_{xy}, na equação 15 obtemos o vetor da força de interação por unidade de comprimento entre as duas discordâncias em cunha pararelas:

$$\vec{F}_i = \pm \frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)r}\left[\cos\theta\left(\cos^2\theta - \operatorname{sen}^2\theta\right)\vec{i} + \operatorname{sen}\theta\left(1+2\cos^2\theta\right)\vec{j}\right] \quad \textbf{(23)}$$

± depende dos sinais das duas discordâncias em cunha.

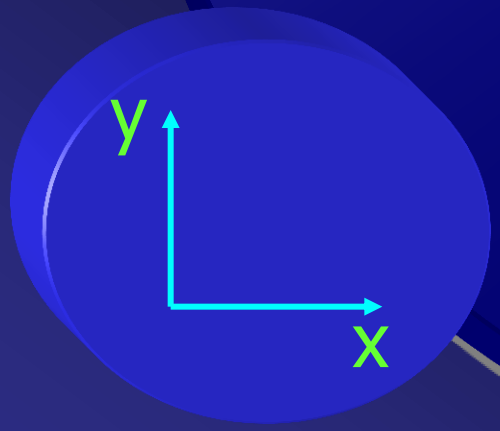
COMPONENTES DA FORÇA



$$y = r \operatorname{sen} \theta$$

$$F_{ix} = \pm K \frac{f_x(\theta)}{y} \quad \textbf{(24)}$$

$$F_{iy} = \pm K \frac{f_y(\theta)}{y} \quad \textbf{(25)}$$



onde $K = \dfrac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)}$

Gráficos $f_x(\theta)$ e $f_y(\theta)$ versus θ

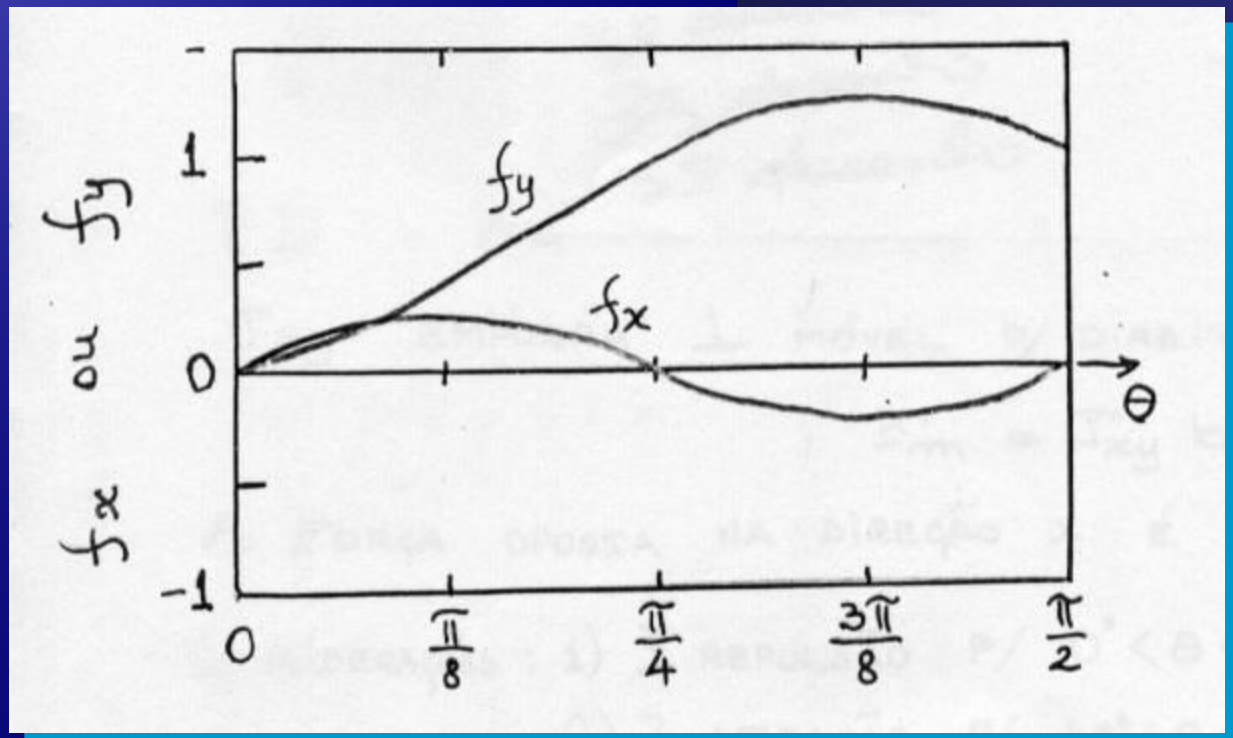


Fig. 17 – Funções que descrevem os componentes x e y da força de interação entre duas discordâncias em cunha.

Considerações

1) O componente da força na direção y tem **sempre o mesmo** sinal para todos os ângulos entre as duas discordâncias.
2) O componente da força na direção x muda de sinal quando θ **= 45º**.

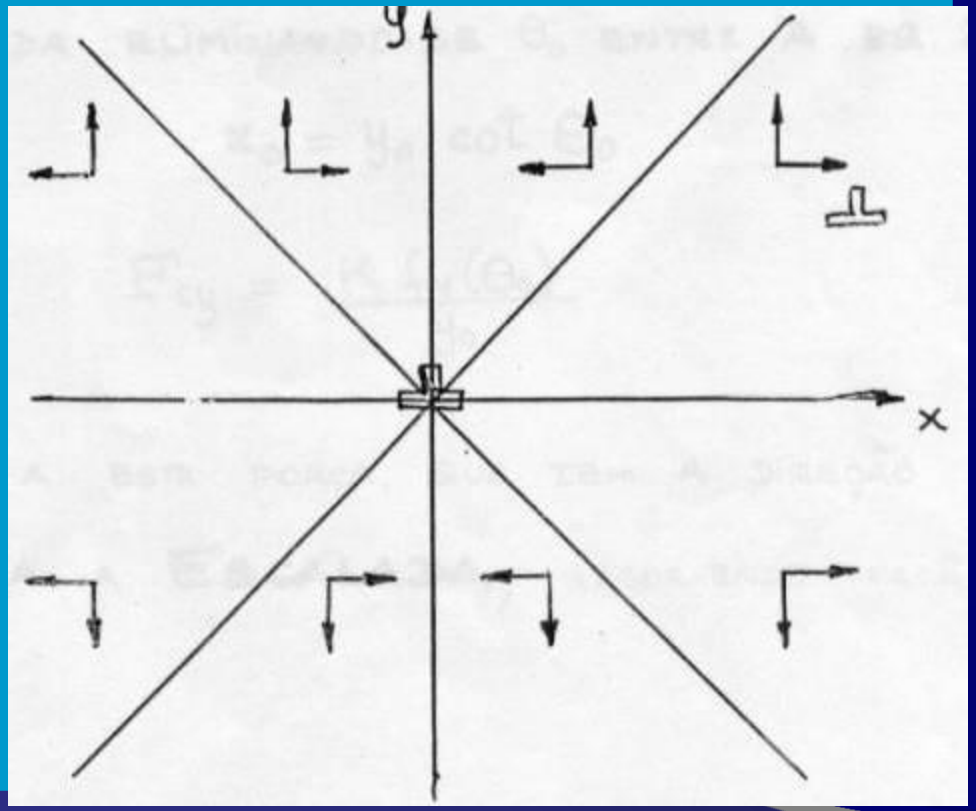


Fig. 18 – Forças entre duas discordâncias em cunha de mesmo sinal, em planos de deslizamento paralelos.

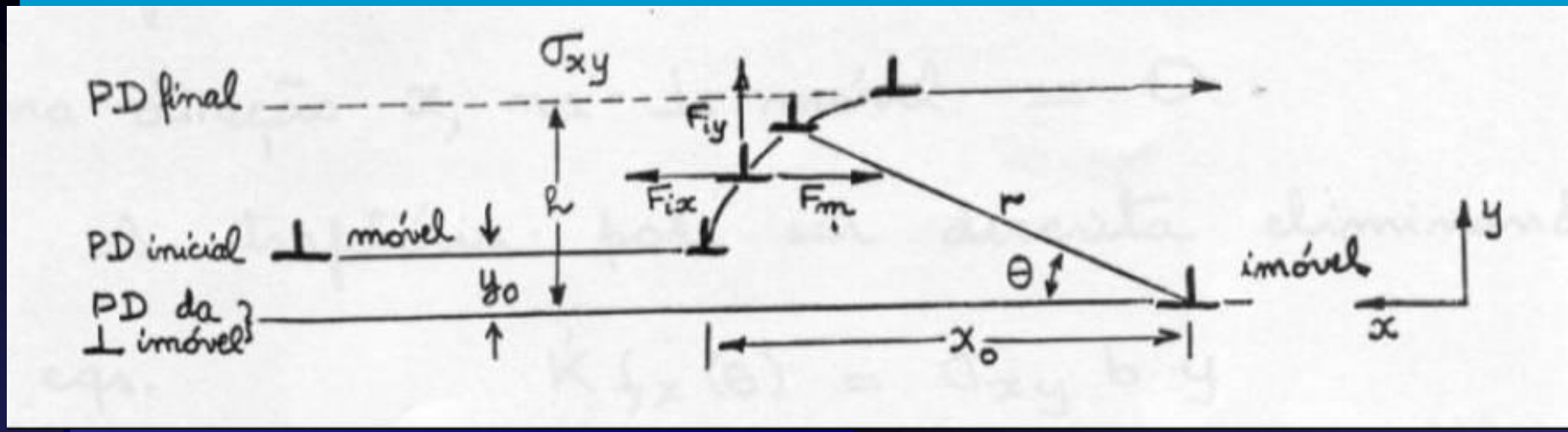


Fig. 19 – Trajetória de uma discordância em cunha móvel que se aproxima de uma outra discordância, imóvel, ambas de mesmo sinal.

Planos de Deslizamento – paralelos e inicialmente separados por uma distância y_0

σ_{xy} empurra **a discordância em cunha** móvel, para a direita, com uma força por unidade de comprimento

$$F_m = \sigma_{xy} b \qquad (28)$$

A força oposta na direção x é $F_{ix} = +\dfrac{Kf_x(\theta)}{y}$, pois ambas têm o mesmo sinal.

Considerações:

1) Existe repulsão para $0^o < \theta < 45^o$

2) Existe atração para $45^o < \theta < 90^o$

$F_{máx} = F\ (22{,}5^o)$
vide Fig. 17

Seqüência:

1) A discordância em cunha móvel → rapidamente → discordância em cunha imóvel, em seu plano de deslizamento, até que $F_{i\ repulsiva} = F_{motriz}$ devida a σ_{ext}, que ocorre para θ_o entre 0º e 22,5º.

A discordância em cunha móvel pára quando $F_m = F_{ix}$ ou

$$Kf_x(\theta_o) = \sigma_{xy} b y_o \qquad (29)$$

A distância x na qual a barreira é sentida pela 1ª vez é obtida eliminando-se θ_o da equação 29 e da relação

$$x_o = y_o \cot \theta_o \qquad \textbf{(30)}$$

Neste ponto, $$F_{iy} = \frac{K f_y(\theta_o)}{y_o}$$

Devido a esta força, que tem a direção y, a discordância móvel começa a **Escalada**, absorvendo vacâncias.

2) Com a Escalada, a posição da discordância ao longo do eixo x, se ajusta para manter a resultante das forças na direção x, na discordância em cunha móvel = 0.

A trajetória pode ser descrita eliminando-se θ das equações

$$Kf_x(\theta) = \sigma_{xy} by \quad (32)$$

$$x = y \cot g\theta \quad (33)$$

Quando θ = 22,5°, $f_{x máx} = \frac{1}{4}$ e a distância escalada

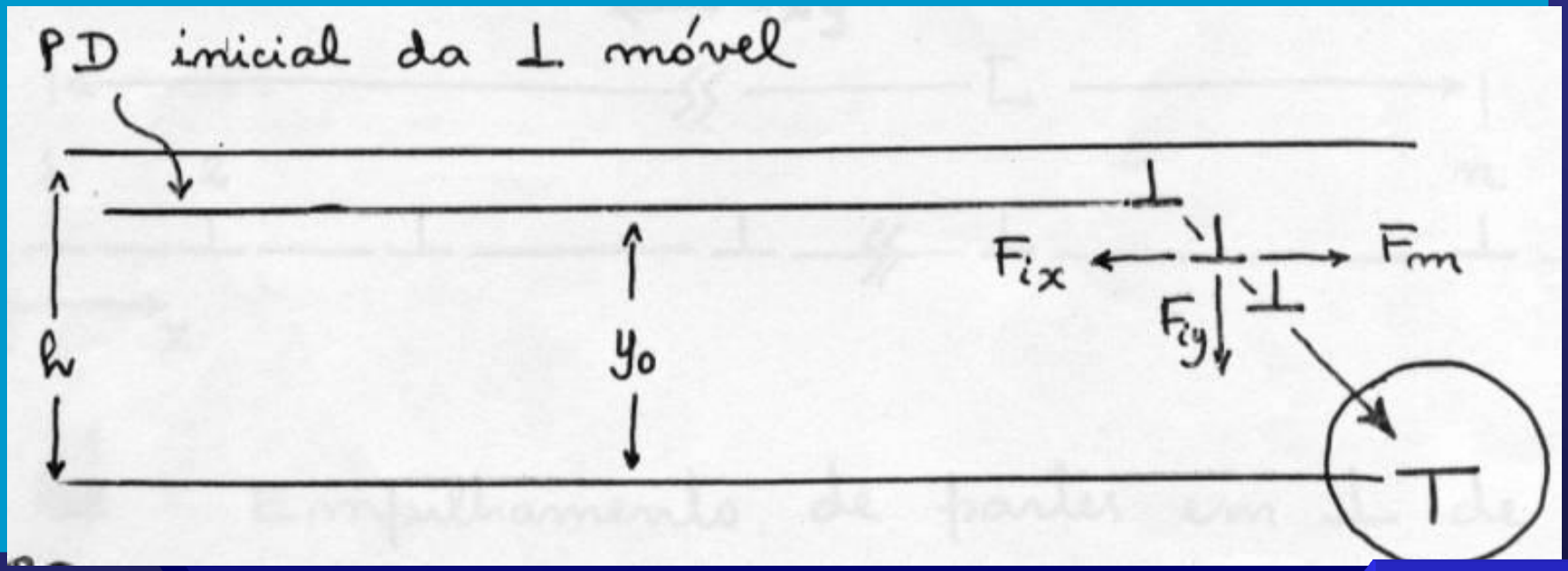
$$h \overset{(32)}{=} \frac{K}{4\sigma_{xy} b} = \frac{Gb}{8\pi(1-\nu)\sigma_{xy}} \qquad \textbf{(34)}$$

Esta distância representa a altura da barreira para uma discordância em cunha móvel.

3) Assim quando a discordância alcançou h, o deslizamento fácil pode ser retomado ao longo do novo plano de deslizamento.

Se $y_o > h$, a discordância em cunha imóvel não impede o deslizamento da discordância em cunha móvel.

DISCORDÂNCIAS de SINAIS OPOSTOS



Disc. Imóvel

Fig. 20 – Trajetória de uma discordância em cunha que se aproxima de uma outra discordância em cunha imóvel, de sinal oposto.

DISCORDÂNCIA de SINAIS OPOSTOS

1) $y_o > h$, a discordância móvel não é parada pela imóvel

2) $y_o < h$, a discordância em cunha móvel faz escalada/escorregamento em direção à discordância imóvel, e acontece a aniquilação de ambas → Cristal Perfeito

EMPILHAMENTO DE DISCORDÂNCIAS

Fonte FR → cria continuamente anéis discordâncias

.

deformação ← provocando emergem do cristal

opera indefinidamente, com $\sigma_{cis.}$ para gerar discordâncias e impulsionar anéis.

A existência de obstáculos, no plano de deslizamento → breca a 1ª discordância e, as produzidas subseqüentemente, se empilham na líder parada.

Então, cessa a operação da FFR, e a configuração permanece constante, a menos que a líder possa escapar por escalada sobre o obstáculo.

Que obstáculos podem ser esses?

1) Contornos de grão

2) Uma discordância imóvel

3) A discordância líder de outra FFR em plano paralelo a uma distância <h (equação 34)

À medida que a Líder supera obstáculos, a Fonte cria outra discordância para recompletar o empilhamento (figura 21). Quando a 1ª discordância sai, a 2ª irá substituí-la.

EMPILHAMENTO DE DISCORDÂNCIAS

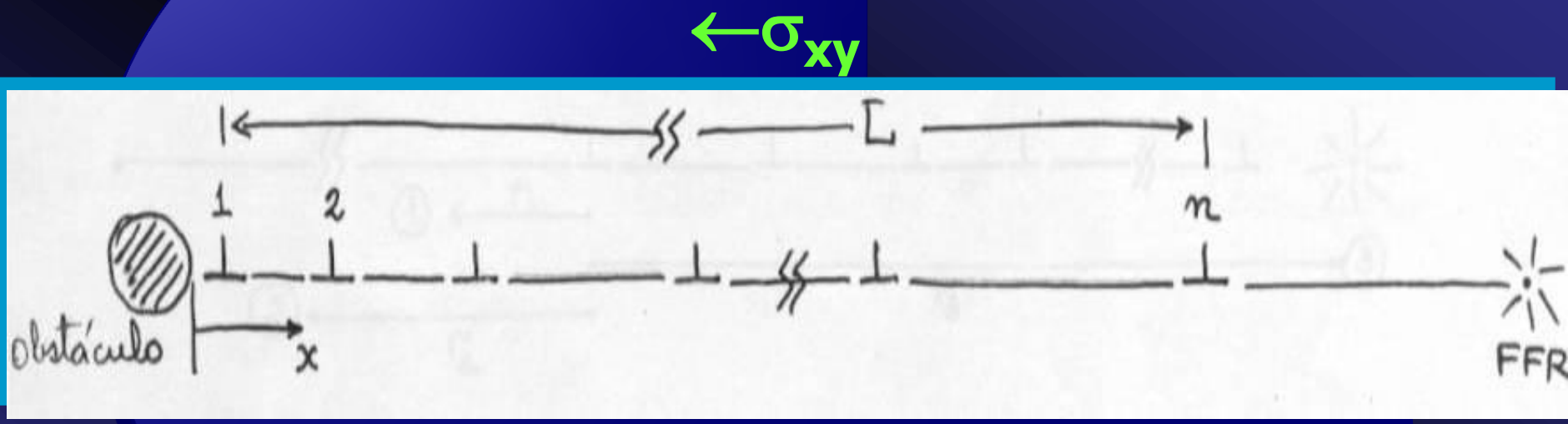


Fig. 21 – Empilhamento de partes em cunha de anéis de discordâncias gerados por uma fonte de Frank e Read, devido a um obstáculo no plano de deslizamento.

O espaçamento entre as discordâncias e o seu número, entre a fonte e o obstáculo, podem ser determinados a partir da condição: a resultante das forças em cada discordância na direção x = 0.

Com n discordâncias no empilhamento, a condição de equilíbrio mecânico no i-ésimo membro é dada por

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} F_{xi,j} = F_m \qquad (35)$$

onde $F_m = \sigma_{xy} b$ (aplicada)

e $F_{xi,j}$ (i-ésima discordância interagindo com a j-ésima)

equação 23 $r \rightarrow x_i - x_j$

EMPILHAMENTO DE DISCORDÂNCIAS

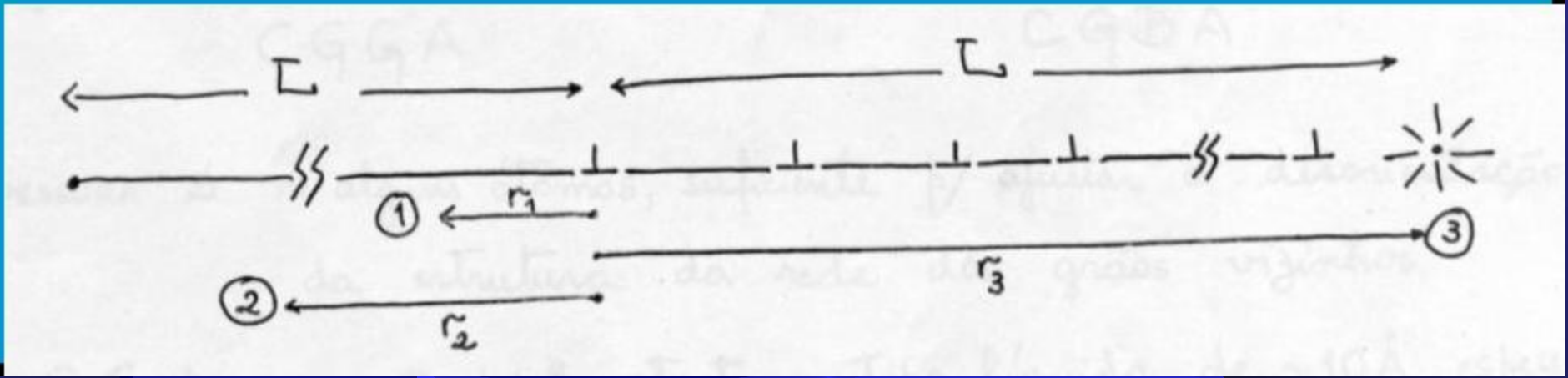
$$\frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\frac{1}{x_i - x_j} = \sigma_{xy} b \qquad (36)$$

que representa n-1 equações não lineares nas distâncias x_i (equação 36 não se aplica à discordância líder).

Solução do Conjunto fornece número de discordâncias no empilhamento com L igual à distância entre a 1ª e a última.

$$n = \frac{\pi(1-\nu)L\sigma_{xy}}{Gb} \qquad (37)$$

CARACTERÍSTICA MAIS IMPORTANTE DO EMPILHAMENTO



Posição 1

$$\sigma(r_1) = n\sigma_{xy} = \frac{\pi(1-\nu)L\sigma_{xy}^2}{Gb} \qquad (38)$$

Posição 2

$$\sigma(r_2) = \left(\frac{L}{r_2}\right)^{1/2} \sigma_{xy} \qquad r_1 < r_2 < L \qquad (39)$$

Posição 3

$$r_3 \geq \pm L \qquad \sigma = \frac{nGb}{2\pi(1-\nu)r_3} = \left(\frac{L}{2r_3}\right)\sigma_{xy} \qquad (40)$$

r_3=-L, na equação 40 → σ exercida pelos anéis do empilhamento na FFR, que foi responsável por sua geração. É responsável pela parada de operação da FFR.

CONTORNOS DE GRÃO E GRÃOS

Sólidos solidificados a partir da Fusão $\supset$ um grande número de pequenos cristalitos ou grãos.

Um monocristal grande exige precauções especiais.

Grão $\equiv$ Monocristal ($\phi \cong$ ordem μms)

Monocristal ⊃ DP e Discordâncias

Superfície que separa diferentes grãos é um Contorno de Grão (CG) (Grain Boundary)

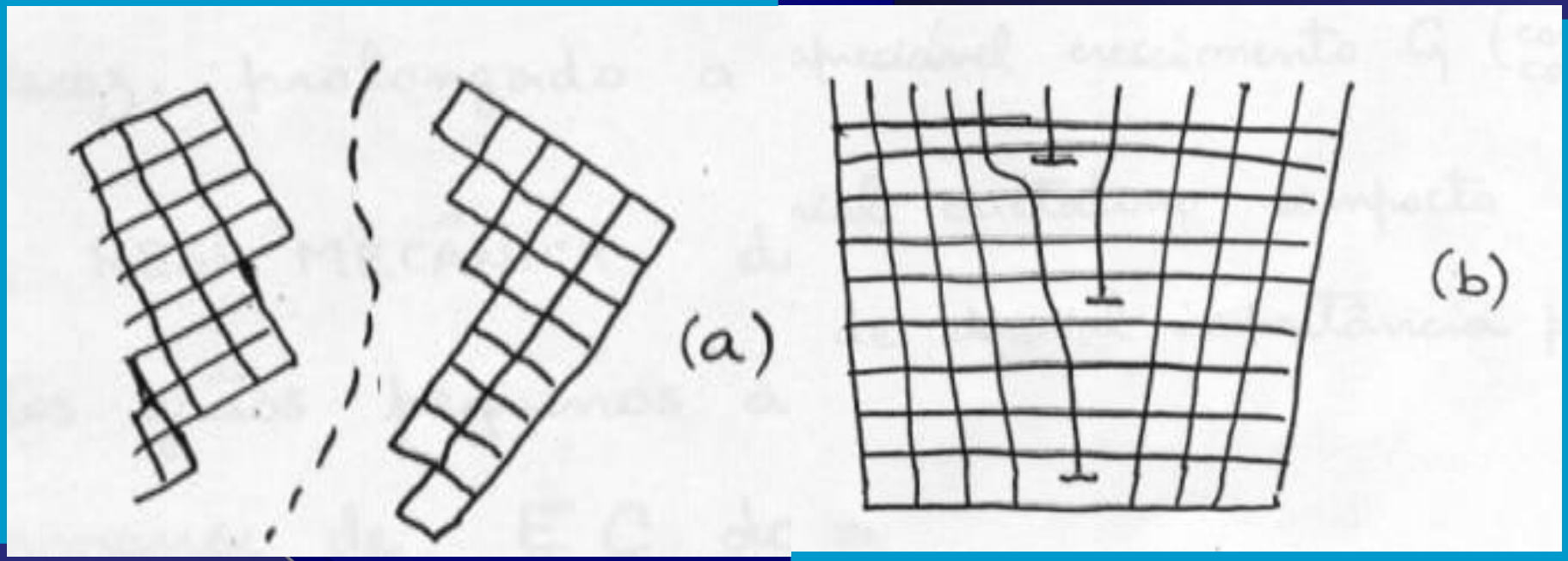


Fig. 22 – (a) CG de alto ângulo (CGAA) e (b) CG de baixo ângulo (CGBA)

Espessura da Superfície ~ alguns átomos, suficiente para ajustar a desorientação da estrutura da rede dos grãos vizinhos.

CGAA – caracterizado por uma estrutura do tipo líquido de ~ 10Ǎ espessura

CGBA – entre grãos cuja desorientação é de ~ alguns graus.

Composição – Discordâncias em cunha de mesmo sinal empilhadas de maneira aproximadamente paralela.

Deteção

CGBA – Necessidade técnicas especiais para torná-los visíveis.

Ataque Químico – Chemical Etching).

Permite observar a discordância que compõe o contorno, individualmente.

CGAA – Amostra polida, por Microscopia Óptica.

Poligonização – É o processo que ocorre a temperaturas suficientemente altas, e pelo qual algumas discordâncias se ordenam em formas geométricas regulares, consistindo de contornos de sub-grão, dentro dos grãos maiores, formados pelo CGAA.

Tensão superficial ou Energia por unidade de área

Discordância → Tensão de linha

Superfícies livres ou externas → Tensão de superfície

$\nexists$ Equilíbrio Térmico ← E elevada. CG persistem a T elevadas.

Crescimento de Grão

Recozimento prolongado a **Altas Temperaturas** → provoca → apreciável crescimento de grão

A Resposta Mecânica de um material cristalino composto de muitos grãos pequenos, a σ_{apl},é de especial importância para a performance de elemento combustível do reator.

A Temperaturas Baixas

($< T_{F/3}$ a $T_{F/2}$)

Sólidos ionicos (UO_2) $\rightarrow$ deformam-se elasticamente para σ baixas e fraturam-se a σ suficientemente elevadas.

o UO_2 não se deforma plasticamente $\equiv$ Frágil

Sólidos policristalinos necessitam + Planos de Deslizamento Ativos e Direções de Deslizamento do que sólidos monocristalinos antes que a Deformação Plástica seja possível.

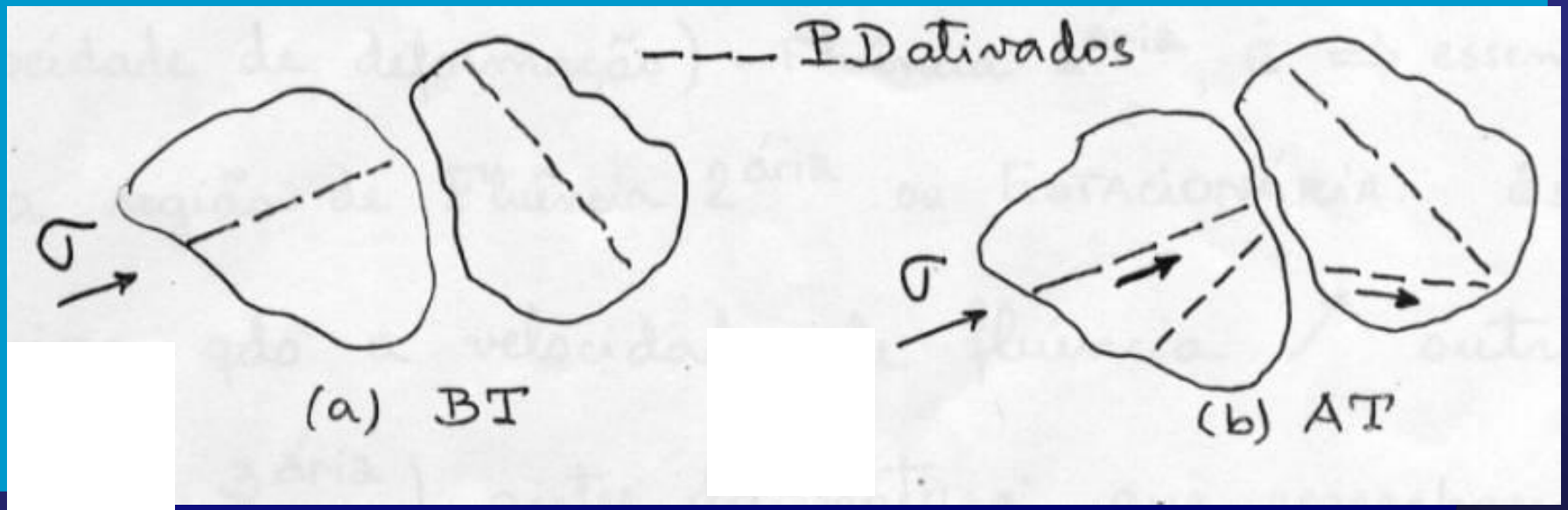


Fig. 23 – Efeito da temperatura no escorregamento, em materiais policristalinos.

(a) não acontece, σ_{apl} insuficiente para deformar o grão superior

(b) PD adicional se tornou ativo, σ_{apl} provoca escorregamento nos dois grãos → o material se deforma plasticamente.

Condição para Deformação Sólido Policristalino, como um todo:

seja ativado um número suficiente de Planos de Deslizamento, de tal forma que, o componente da σ_{cis} num Plano de Deslizamento ativo, $> \sigma_c$ para todas as orientações relativas à direção da σ_{apl}.

FLUÊNCIA (FLUAGE,CREEP)

É um tipo de deformação permanente que ocorre durante longos períodos a σ=cte.

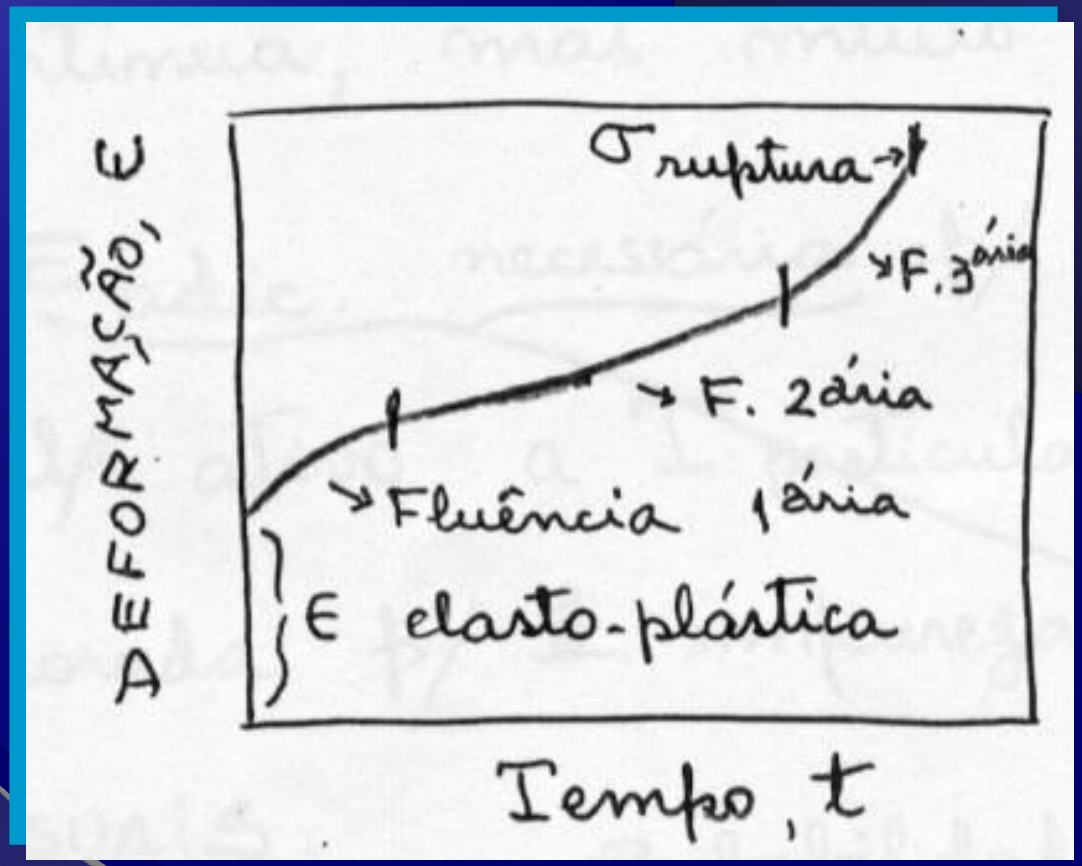


Fig. 24 – Curva típica de fluência - Mostra as deformações associadas ao fenômeno de fluência.

1. A deformação elástica e plástica ocorre essencialmente ao mesmo tempo, quando a σ é aplicada. Se a amostra for mantida sob tensão e, se a $T \sim T_F/3$ a $T_F/2$, a deformação irreversível continuará durante longos períodos (dias ou meses) até à ruptura.

2. Em seguida a um período de diminuição da $\dot{\in}$ (Velocidade de Deformação) – Fluência 1ária, $\in \rightarrow$ essencialmente cte. É a região de Fluência 2ária ou Estacionária. Este regime termina quando a Velocidade de Fluência $\nearrow$ outra vez (Fluência 3ária), antes da fratura, que corresponde à Tensão de Ruptura.

Em qualquer material, especialmente nos policristalinos, $\exists$ uma distribuição contínua de modos de deslizamento, que se torna operável à medida que $\sigma\nearrow$.

Aproximadamente, todos os mecanismos de deslizamento associados a um nível particular de σ_{apl} são esgotados durante a Deformação Plástica Instantânea. Se σ for mantida c^{te}, vários mecanismos estarão disponíveis, para permitir Deformação Contínua, mas muito lenta.

E adicional necessária para mover uma discordância em seu Plano de Deslizamento, não normalmente ativo às T e σ_{apl} particulares ou uma discordância que está ancorada por uma impureza, por flutuações térmicas casuais.

Probabilidade por unidade de tempo de fornecer E $\propto e^{-E/kT}$

e é por isso que $\dot{\in}$ exibe Dependência Acentuada $\{$ T

A Altas Temperaturas mobilidade DP aumenta → Discordâncias arrastam-nos {Microfluência}

vacâncias e intersticiais } permitem escalada

Todos estes mecanismos } Regime Fluência 2ária

$$\dot{\in}(\sigma,T) = const \;\; X \;\; \sigma^{m} e^{-E/kT}$$

σ é a σ_{apl}, T a temperatura absoluta, E energia de ativação para a fluência.

m é ~4 para velocidades de fluência governadas por escalada de discordâncias.

Fluência pode também ocorrer por deslizamento de Cristalitos Adjacentes, ao longo dos CG ou por Difusão de Vacâncias de um lado para outro do Grão. (Fluência de Nabarro-Hering)

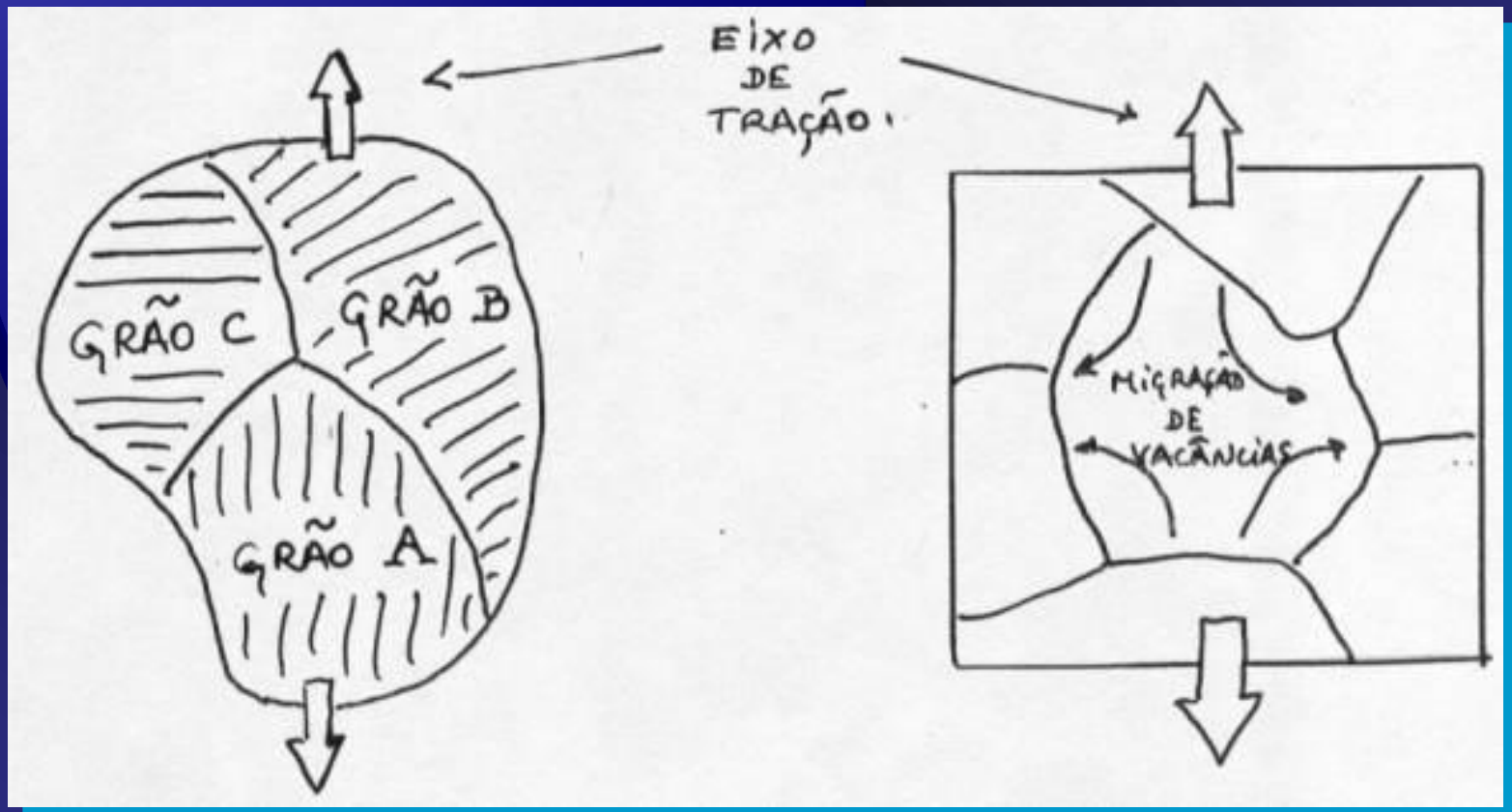
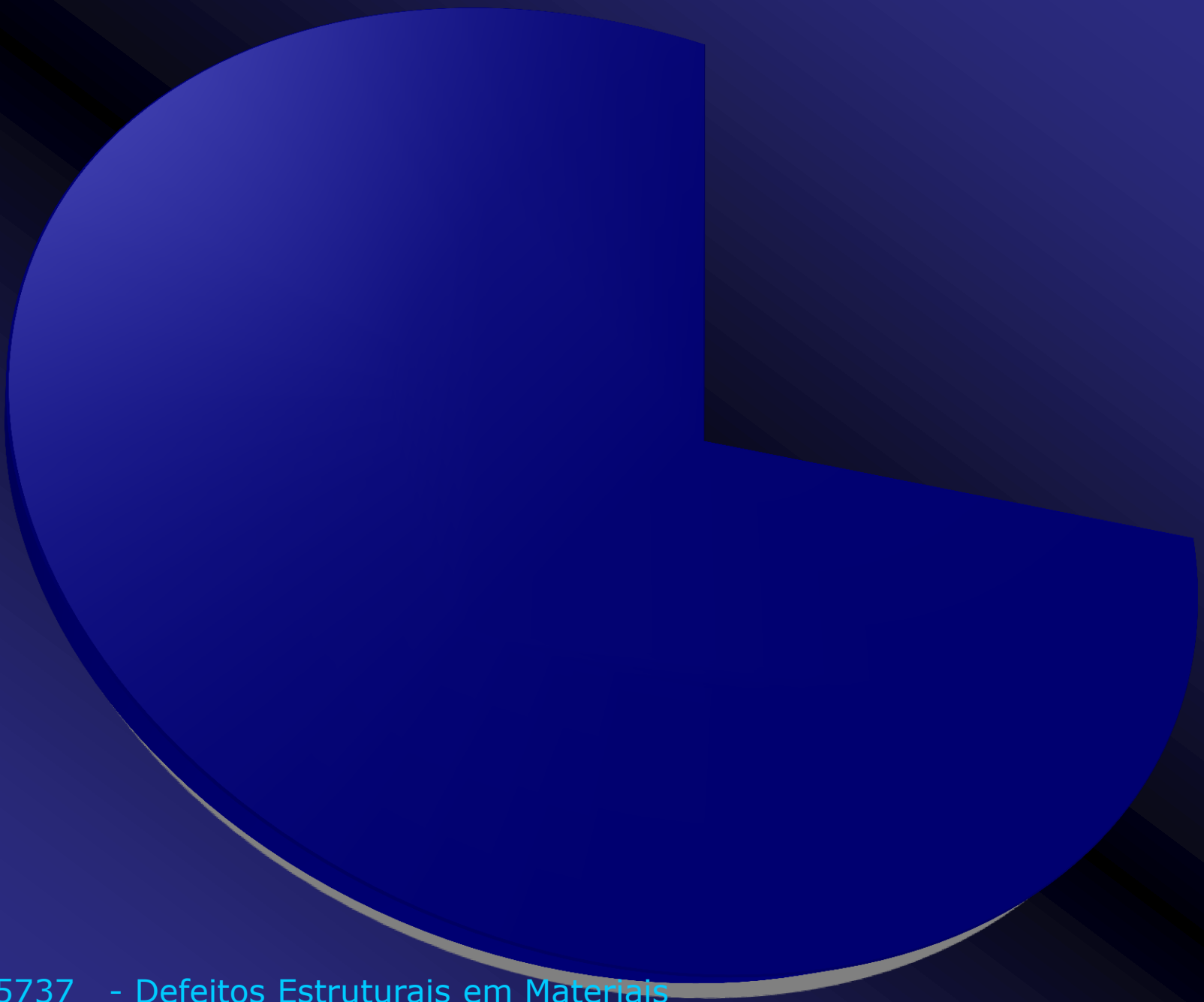


Fig. 25 Fig. 26

Fig. 25 – Deformação não homogênea resultante do escorregamento de CG.

Fig. 26 – Migração de vacâncias para CG //s a uma Tensão de Tração Aplicada, gera um componente dependente do tempo para a deformação a σ constante.

É importante notar que a Fluência Difusional é distinguível da Deformação por Escorregamento, pelo fato de que

$$\dot{\in} \sim \sigma_{apl}$$