

***Microestruturas de Deformação em Fadiga***  
***PMT5857 – Tópicos Avançados em***  
***Fadiga dos Materiais***

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Baseado em

**KWL-I** D. Kuhlman-Wilsdorf, C. Laird, Dislocation behavior in Fatigue, *Mater. Sci. Engng.* **27** (1977) 137 – 156.

**KWL-II** D. Kuhlman-Wilsdorf, C. Laird, Dislocation behavior in Fatigue II. Friction stress and back stress as inferred from an analysis of Hysteresis loops, *Mater. Sci. Engng.* **37** (1979) 111 – 120.

**KW-III** D. Kuhlman-Wilsdorf, Dislocation behavior in Fatigue III. Properties of the loop patches – Do they participate in fatigue cycling?, *Mater. Sci. Engng.* **39** (1979) 127 – 139.

**KW-IV** D. Kuhlman-Wilsdorf, Dislocation behavior in Fatigue IV. Quantitative interpretation of friction stress and back stress derived from hysteresis loops, *Mater. Sci. Engng.* **39** (1979) 231 – 245.

**KWL-V** D. Kuhlman-Wilsdorf, C. Laird, Dislocation behavior in Fatigue V. Breakdown of loop patches and formation of persistent slip bands, *Mater. Sci. Engng.* **46** (1980) 209 – 219.

Baseado em

**Laird** C. Laird, P. Charsley, H. Mughrabi, Low energy dislocation structures produced by cyclic deformation, *Mater. Sci. Engng.* **81** (1986) 433–450.

**Huang-I** H. L. Huang, A study of dislocation evolution in poly crystalline copper during low cycle fatigue at low strain amplitudes, *Mater. Sci. Engng. A* **342** (2003) 38 – 43.

**Huang-II** H. L. Huang, N. J. Ho, The observation of dislocation reversal in front of crack tips of polycrystalline copper after reducing the maximum load, *Mater. Sci. Engng. A* **345** (2003) 215 – 222.

**Huang-III** H. L. Huang, J. L. Ho, T. L. Hu, Estimating the amplitude of plastic strain from the distribution of the dislocation morphologies in front of the crack tips *Mater. Sci. Engng. A* **386** (2004) 112 – 117.

**Huang-IV** H. L. Huang, D. L. Ho, The observation and analysis of the dislocation morphology of fatigue crack tips at steady state propagation rates subject to a single peak load *Mater. Sci. Engng. A* **298** (2001) 251 – 261.

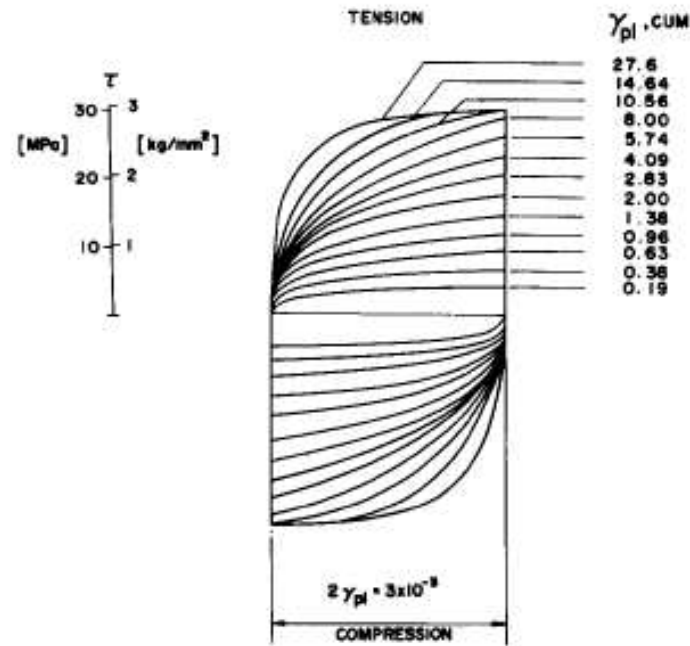
# ***Fadiga de baixo ciclo (FBC)***

---

Nome dado ao campo de pesquisa de fadiga onde as tensões máximas são comparáveis ao limite de escoamento → deformação plástica macroscópica no ciclo.

Sinônimo para fadiga em controle de deformação.

# FBC - ciclo de histerese



Material: Cu, monocristal,  $\Delta\gamma_p = 0.003$ ,  $R = -1$

H. Mughrabi, *Mater. Sci. Engng.* **33** (1978) p. 207ff.

# ***FBC - ciclo de histerese***

---

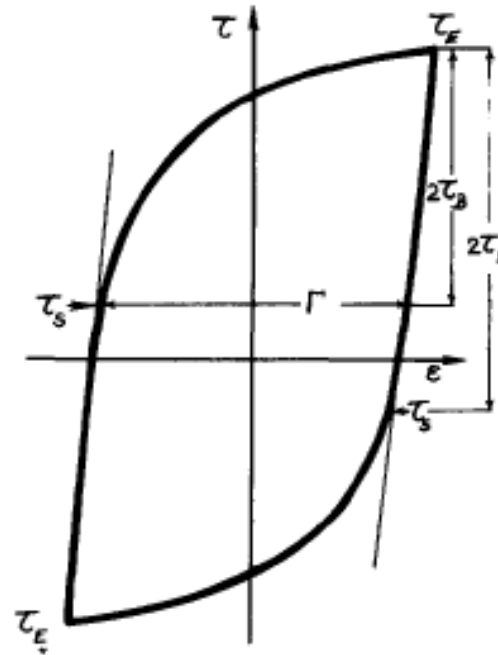
- O ciclo de histerese não é imediatamente estável → há um fenômeno transiente.
  - Endurecimento cíclico.
  - Amolecimento cíclico.
- Após o transiente atinge-se o estado estacionário, caracterizado por um ciclo-limite de histerese.

Da lei de Taylor temos:

$$\tau \propto \sqrt{\rho_d} \Rightarrow (\rho_d)_{\max} = \text{const.} \quad (1)$$

Portanto após a saturação a densidade de discordâncias se estabiliza, mesmo acomodando a deformação total do ciclo. O problema é entender como isto ocorre.

# FBC - Fenomenologia do ciclo de histerese



$\tau_S$  = limite de escoamento,  $\tau_E$  = tensão máxima,  $\tau_B$  = **contratensão (backstress)**,  
 $\tau_F$  = **tensão de fricção**,  $\Gamma = 2\Delta\gamma_p$  = amplitude de deformação plástica.



# ***FBC - Fenomenologia do ciclo de histerese***

Relações entre  $\tau_B$ ,  $\tau_F$ ,  $\tau_S$  e  $\tau_E$  (Cottrell, 1956):

$$\tau_F = \frac{(\tau_E + \tau_S)}{2} \quad (2)$$

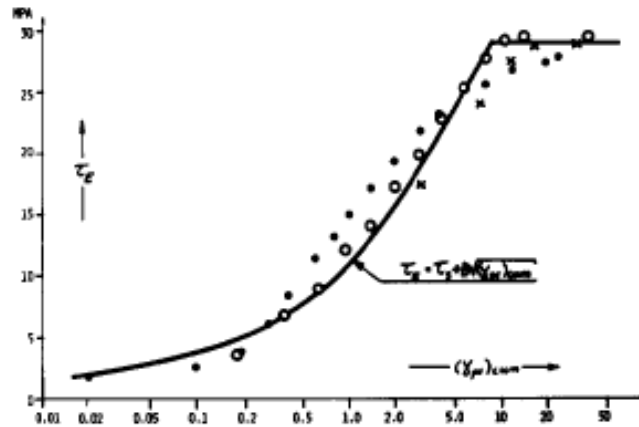
$$\tau_B = \frac{(\tau_E - \tau_S)}{2} \quad (3)$$

Válido quando o comportamento das discordâncias, as tensões e as deformações residuais são invariantes:

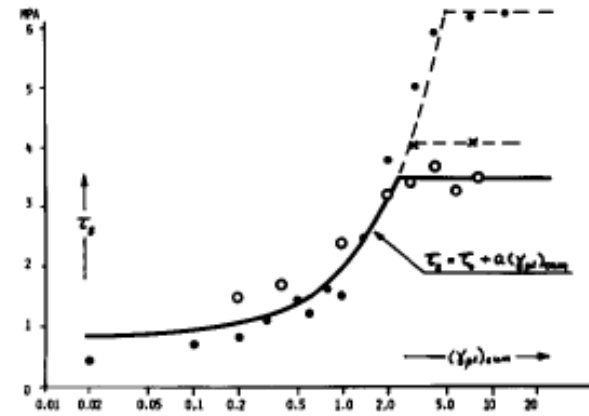
a . em ciclos subseqüentes e

b . no semi-ciclo direto e reverso (exceto pela mudança de sinal).

# FBC - Fenomenologia do ciclo de histerese



(a)



(b)

Dependência de  $\tau_E$  (a) e  $\tau_S$  (b) para monocristais de cobre em função da deformação plástica acumulada, como obtido por diversos autores para três amplitudes de deformação ( $\bullet \rightarrow \Delta\gamma_p = 0.01$ ,  $\times \rightarrow \Delta\gamma_p = 0.005$ ,  $\circ \rightarrow \Delta\gamma_p = 0.003$ )

# Conclusões de KWL-II

---

- 1 .  $\tau_B$  e  $\tau_F$  tem natureza física real
- 2 .  $\tau_F$  é composta de duas parcelas claramente distinguíveis
- 3 . a maior parcela de  $\tau_F$  é idêntica a  $\tau_B$ , porém uma parcela menor tem uma dependência completamente diferente com a deformação plástica acumulada e satura num valor muito menor que  $\tau_B \Rightarrow$  origem física distinta.

Ou seja,  $\tau_B$  e  $\tau_F$  dependem do desenvolvimento da estrutura de discordâncias.

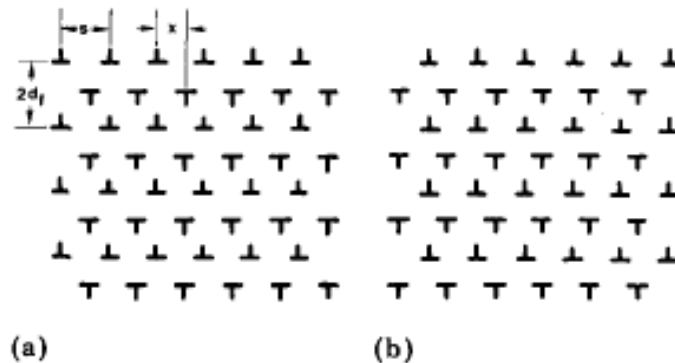
# ***Estrutura de discordâncias em FBC***

Hierarquia com o aumento da amplitude de deformação/aumento do tempo de ensaio:

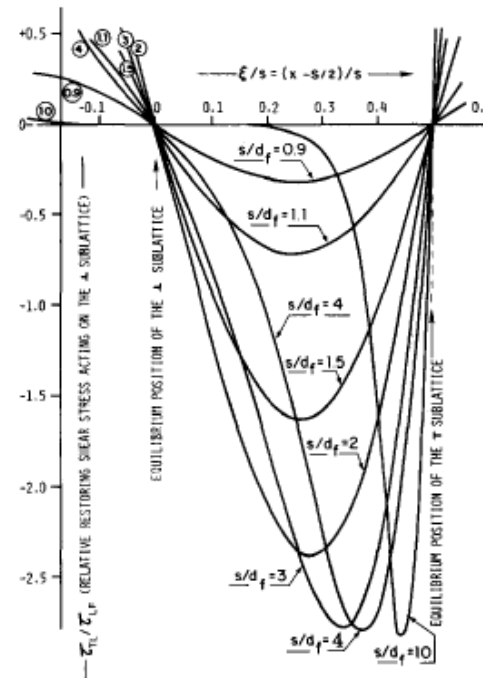
- Uma estrutura composta por resíduos da mútua, porém imperfeita, aniquilação de discordâncias de sinais opostos, composta de um grande aglomerado de aneis dipolares de discordâncias em cunha (*loop patches*)
- Veios (*veins*) alongados compostos por dipolos de discordâncias em cunha separados por canais com densidade reduzida de discordâncias.
- Bandas persistentes de deformação (PSBs).
- Células de discordâncias.

# Interpretação quantitativa de $\tau_B$ e $\tau_F$

Doris Kuhlman-Wilsdorf (em KW-III e KW-IV) desenvolve um modelo microscópico da resposta mecânica baseado na estrutura de deformação induzida no cobre monocristalino durante FBC. Neste modelo os *loop patches* apresentam baixa resistência ao escorregamento e reagem rapidamente às tensões geradas pela imposição da amplitude de deformação → Os *loop patches* formam uma estrutura similar a um reticulado de Taylor (representado abaixo nas duas polaridades, “esquerda” e “direita”).

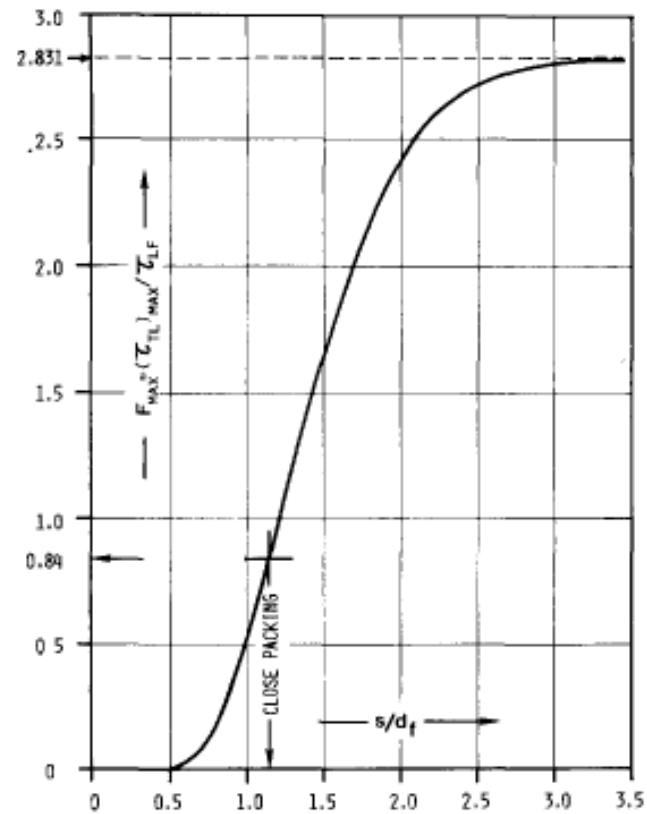


# Propriedades do reticulado de Taylor

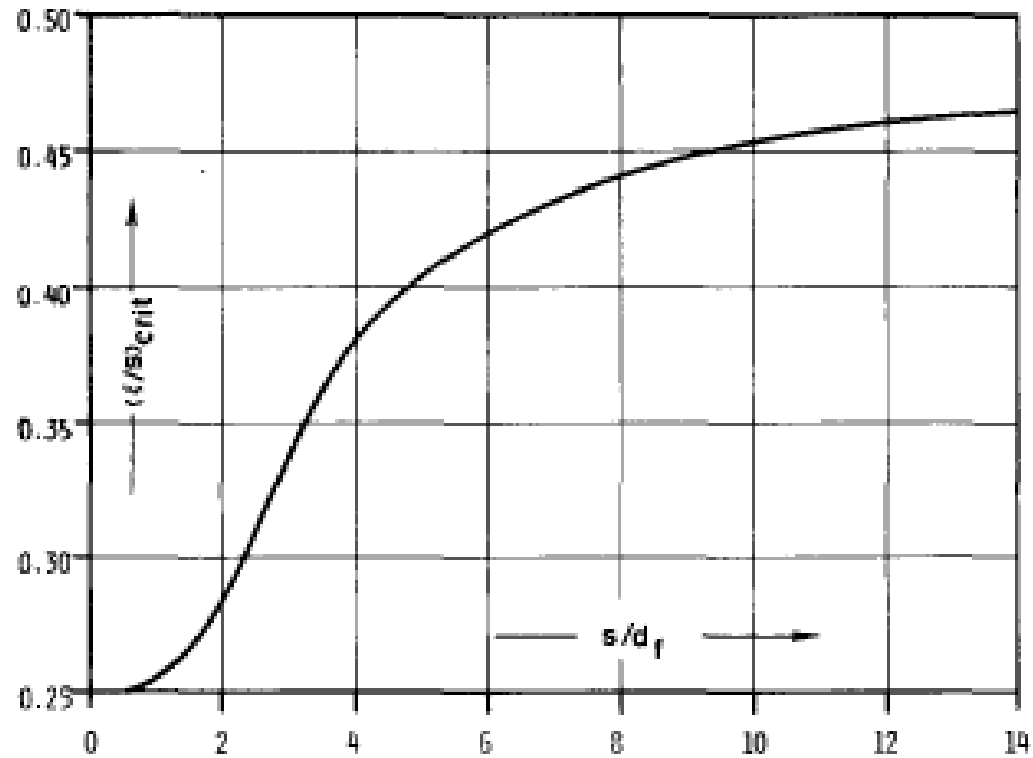


$\tau_{TL} = \tau_B$  tensão de reação do ret. de Taylor a uma tentativa de deslocamento da camada superior em relação à camada inferior,  $\tau_{LF}$  = tensão que causa a inversão da polaridade do ret. de Taylor.

# Propriedades do reticulado de Taylor

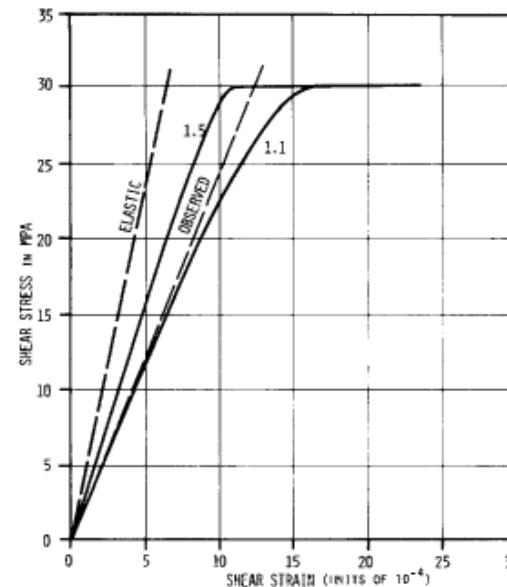


# Propriedades do reticulado de Taylor





# Conexão com os loop patches



Curva  $\tau \times \gamma$  teórica para um material contendo 50% de *loop patches* e 50% de canais isentos de discordâncias em volume. Os números representam  $\frac{s}{d_f}$ . A linha tracejada indicada como “Observed” corresponde à inclinação da curva de histerese do cobre monocristalino no momento da inversão do ciclo.

## ***Interpretação quantitativa de $\tau_B$ e $\tau_F$***

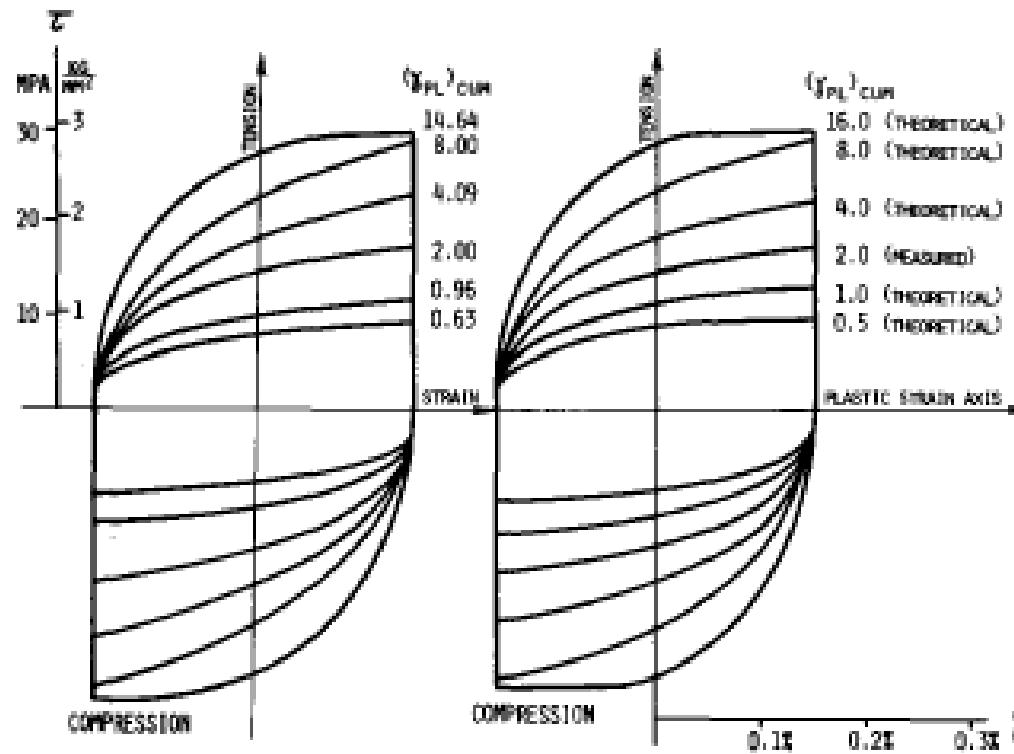
O resultado mais impressionante da análise em KW-IV é a previsão de uma regra de similaridade para as curvas de histerese correspondentes aos ciclos  $N^*$  e  $N^{**}$ :

$$\tau^{**} = \tau^* \sqrt{\frac{N^{**}}{N^*}} \quad (4)$$

para

$$\gamma^{**} = \gamma^* \sqrt{\frac{N^{**}}{N^*}} \quad (5)$$

# Interpretação quantitativa de $\tau_B$ e $\tau_F$



## ***Interpretação quantitativa de $\tau_B$ e $\tau_F$***

---

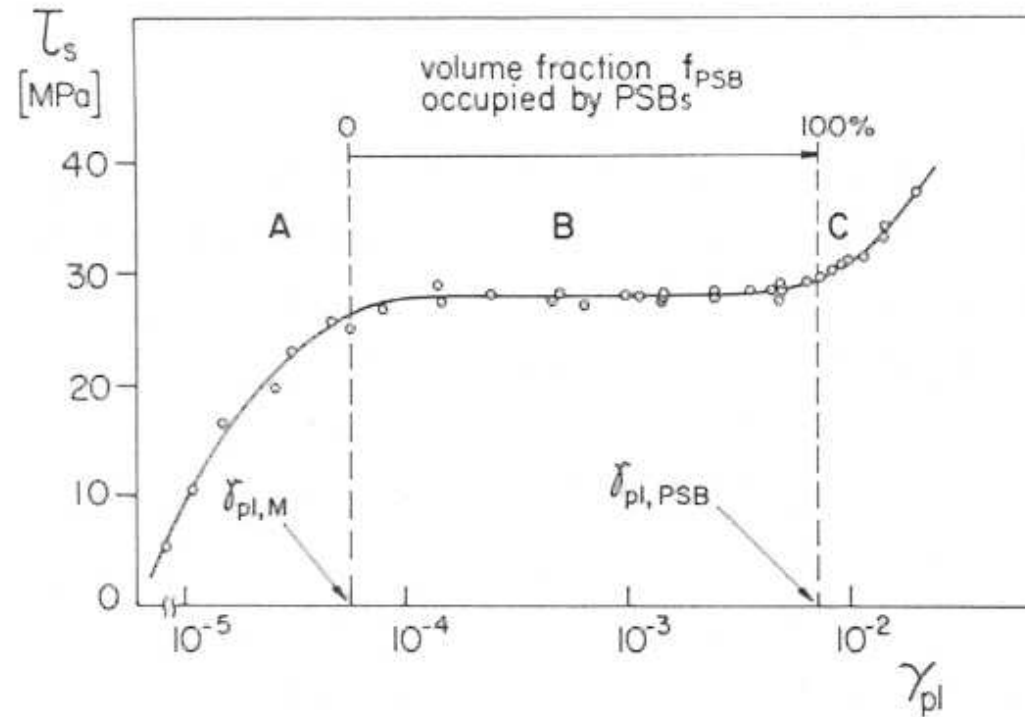
O modelo prevê, portanto, que a origem da contra-tensão é a resistência que o reticulado de Taylor exerce sobre a tentativa de inversão da deformação no início do descarregamento, e mais, prevê ainda que a tensão de fricção é composta da soma da contratensão mais uma tensão de fricção verdadeira, que provêm de fenômenos como arrastamento de *jogs* e endurecimento por defeitos puntiformes sobre a movimentação das discordâncias em hélice que deslizam nos canais.

## ***Conclusão da primeira parte***

---

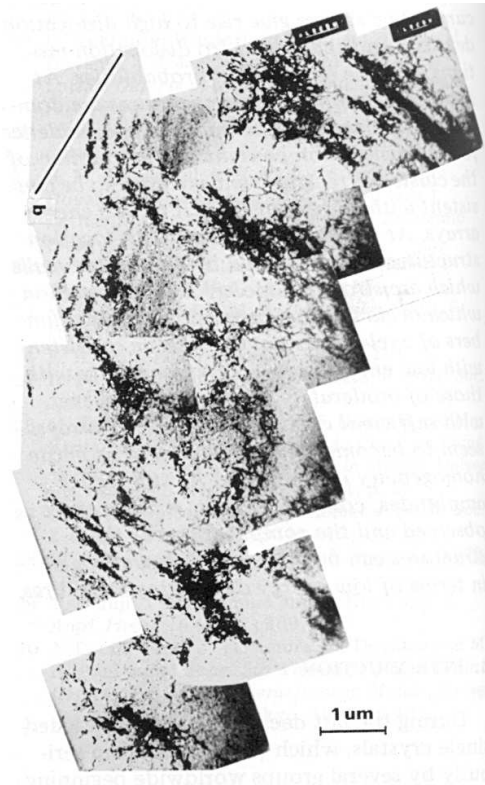
O modelo de KW, apesar de bem sucedido em descrever de forma adequada a evolução das curvas de histerese em função da estrutura de discordâncias, ainda não permite compreender um aspecto relevante da FBC: O colapso dos *loop patches* e dos veios e a formação das PSBs.

# Curva tensão-deformação cíclica do Cobre



Cobre monocristalino orientado para monodeslizamento (fonte: Laird).

# Loop patches



Estágio inicial da formação de *loop patches* (região A da curva tensão-deformação cíclica).

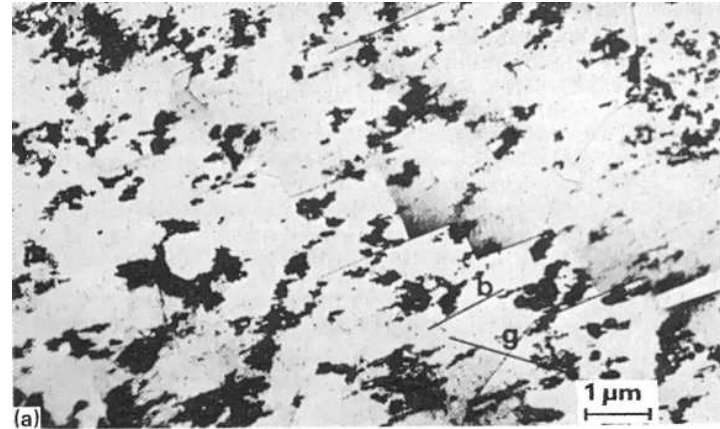
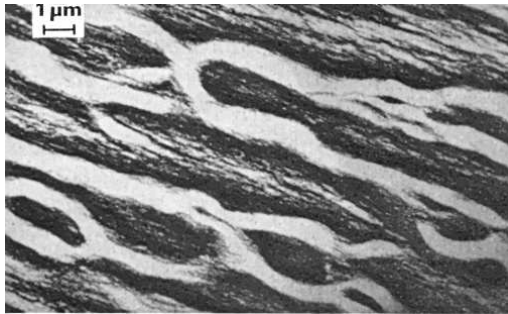
# Loop patches



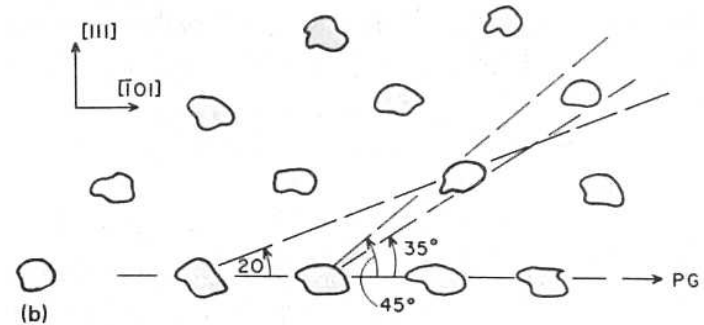
*Loop patches* desenvolvidos, aspecto tridimensional. Os canais, aparentemente isentos de discordâncias, na verdade são ocupados por uma baixa densidade de discordâncias em hélice.



# Loop patches



(a)

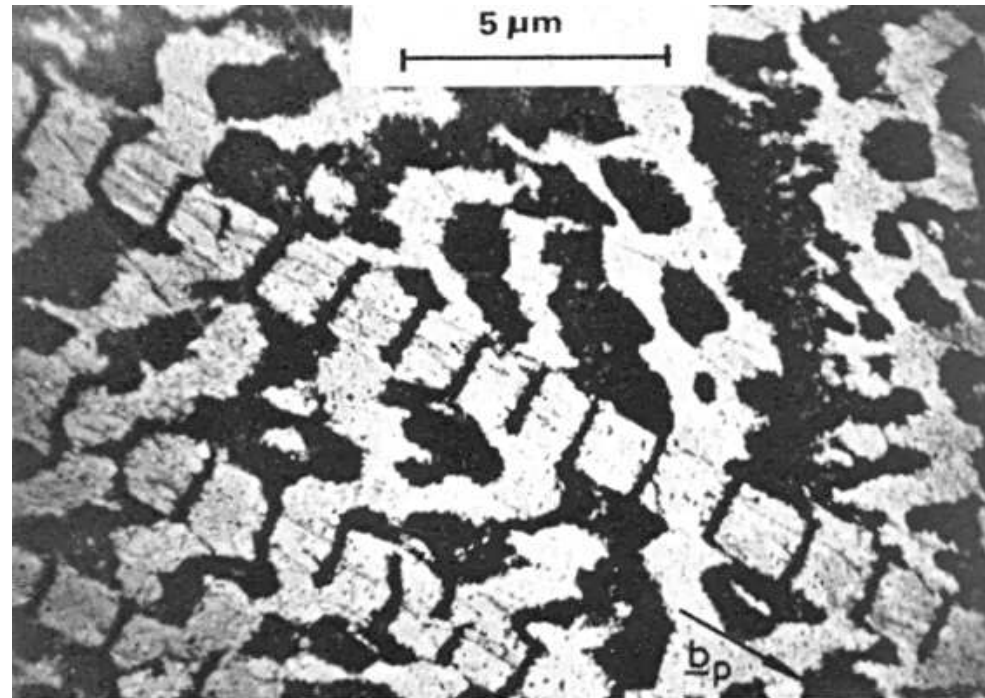


(b)

# Loop patches

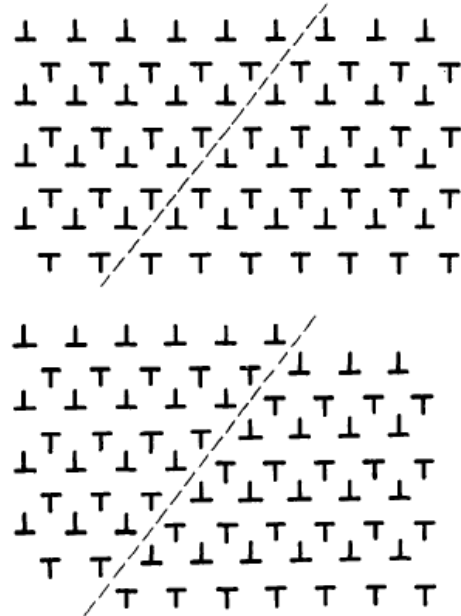
Imediatamente antes do Plateau, os LP ocupam cerca de 50% da microestrutura e os canais tornam-se mais sinuosos, permanecendo, porém, interconectados. Em (a) a amostra foi retinada de uma lâmina paralela ao plano de deslizamento (111), em (b) vista a partir da direção  $[1\bar{2}1]$ , isto é, perpendicular ao plano de escorregamento e ao vetor de Burgers primário, respectivamente (111) e  $[\bar{1}01]$ . Nota-se nesta última figura que os LP se distribuem uniformemente e que há canais livres entre eles com ângulos de cerca de  $20^\circ$  a  $35^\circ$  com respeito ao plano de escorregamento primário.

# A região do Plateau



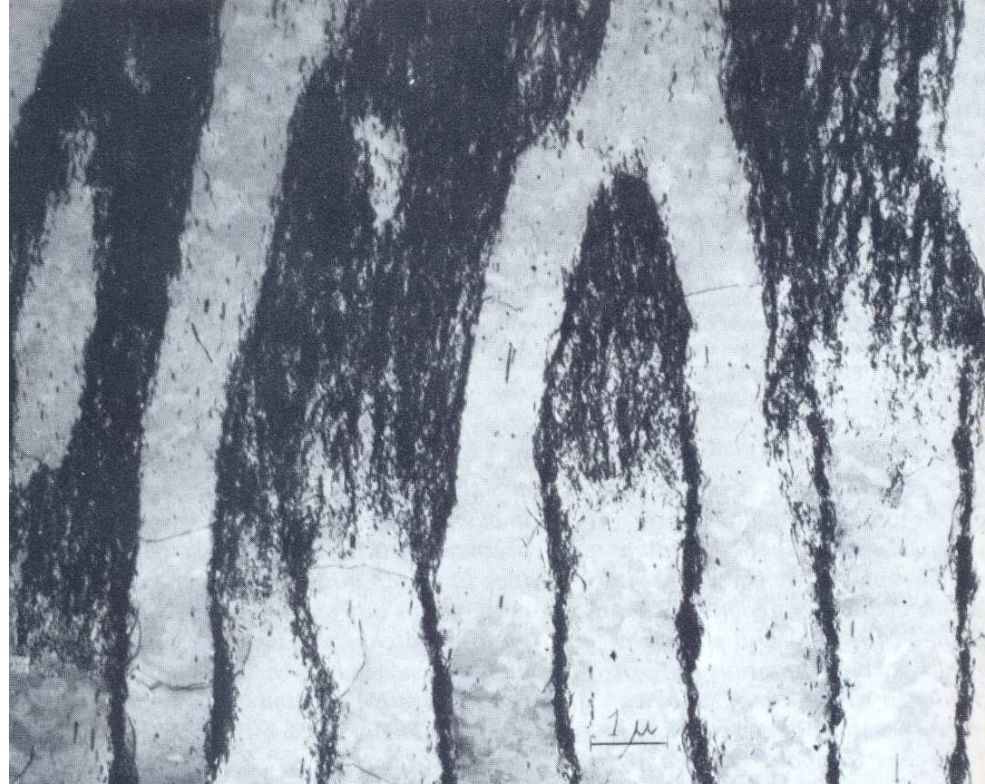
Na primeira parte do Plateau (até aproximadamente  $2 \times 10^{-3}$ ) formam-se as PSBs, com o aspecto característico de “escada” (em inglês, *ladder*). Os degraus da “escada” são compostos por paredes dipolares e os canais são percorridos por discordâncias em hélice durante o ciclo. A Fração de PSBs aumenta constantemente ao longo do plateau → modelo das duas “fases” (fase “dura” = LP, fase “mole” = PSB).

# A região do Plateau



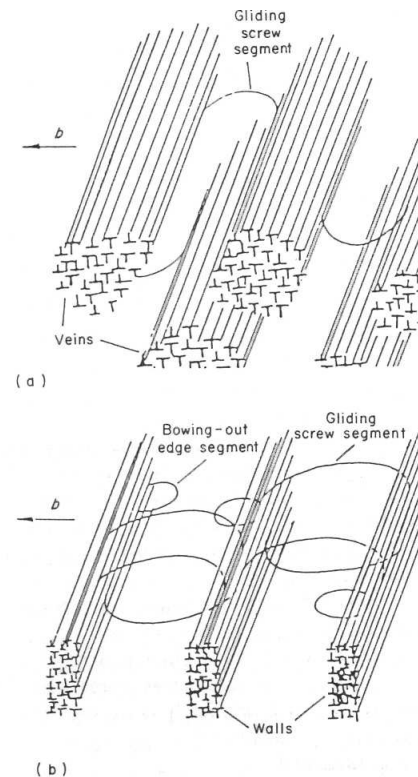
Segundo KW-V, a transformação dos LPs em PSBs seria consequência da ativação de um sistema de escorregamento secundário, que levaria ao colapso dos *loop patches*.

## *A região do Plateau*



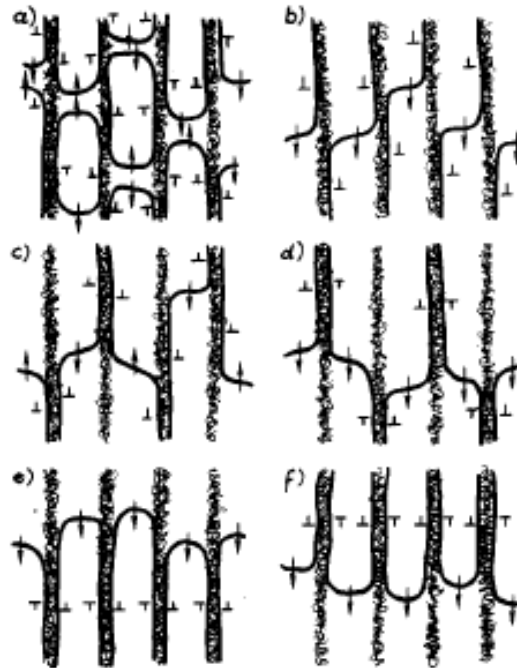
Esta figura é usada por KW-V como evidência da transformação gradual dos LP em PSBs.

# A região do Plateau



Modelo da estrutura dos LP (representados como “veios”, *veins*, na figura) e das PSBs, proposto por P. Neumann, *Mater. Sci. Engng.* **81** (1986) 465 – 475.

# A região do Plateau



Modelo de KW-V para a estrutura das PSBs, seis possíveis configurações que poderiam acomodar a deformação de cíclica nos canais. Segundo a autora, a configuração “a” é instável, pois as discordâncias postas se aniquilariam no primeiro ciclo, “b” e “c” são energeticamente desfavoráveis, pois não mantêm o caráter dipolar da discordância da parede que está deslizando.

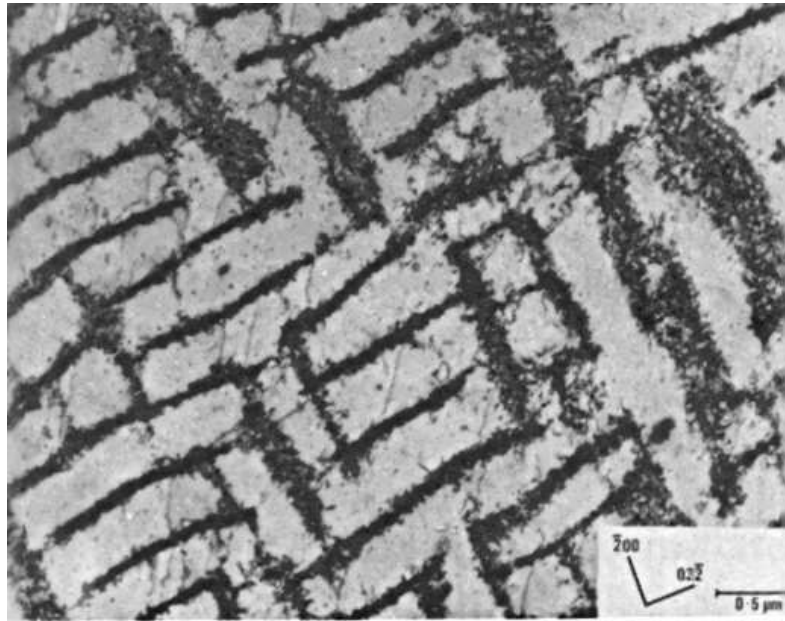
## *A região do Plateau*

---

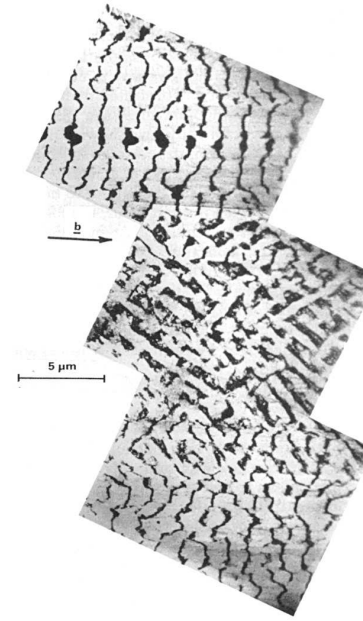
Segundo Laird, o modelo de duas fases é muito simplista, ignorando a ampla dispersão da magnitude da deformação localizada em diferentes PSBs. Para deformações maiores que  $2 \times 10^{-3}$  a estrutura de discordâncias muda → estrutura tipo “labirinto” (ou *maze*).



# A região do Plateau



(a)



(b)

Estruturas de “labirinto” formadas em liga cobre-niquel policristalina (a) e em cobre monocristalino ciclado até  $5 \times 10^{-3}$  e observado na seção  $(1\bar{2}1)$ . Note que a presença de dois tipos de paredes dipolares no *maze* requer a contribuição significativa de um sistema de escorregamento secundário.

# A estrutura pós-Plateau



Após o Plateau desenvolve-se uma estrutura celular de discordâncias (note que na seção (111) ela ainda se assemelha a uma PSB) com o aumento da contribuição de sistemas de escorregamento secundários.

# Segunda parte: Conexão com trincas em propagação

Baseado em

**Huang-I** H. L. Huang, A study of dislocation evolution in poly crystalline copper during low cycle fatigue at low strain amplitudes, *Mater. Sci. Engng. A* **342** (2003) 38 – 43.

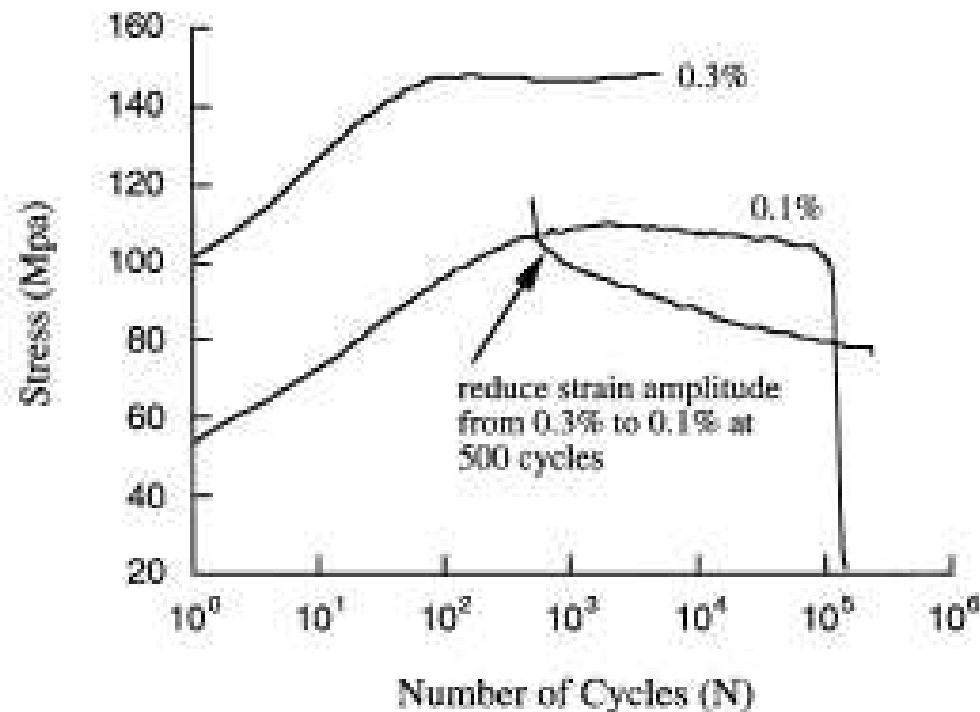
**Huang-II** H. L. Huang, N. J. Ho, The observation of dislocation reversal in front of crack tips of polycrystalline copper after reducing the maximum load, *Mater. Sci. Engng. A* **345** (2003) 215 – 222.

**Huang-III** H. L. Huang, J. L. Ho, T. L. Hu, Estimating the amplitude of plastic strain from the distribution of the dislocation morphologies in front of the crack tips *Mater. Sci. Engng. A* **386** (2004) 112 – 117.

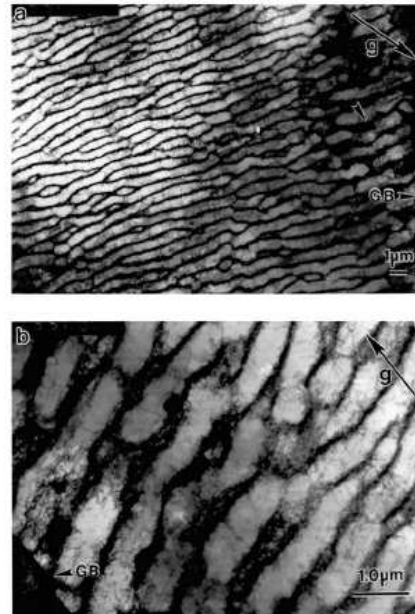
**Huang-IV** H. L. Huang, D. L. Ho, The observation and analysis of the dislocation morphology of fatigue crack tips at steady state propagation rates subject to a single peak load *Mater. Sci. Engng. A* **298** (2001) 251 – 261.

# Os experimentos de Huang-I

Huang-I apresenta uma análise da variação da estrutura de deformação de cobre policristalino quando a amplitude de deformação é reduzida durante o ensaio.

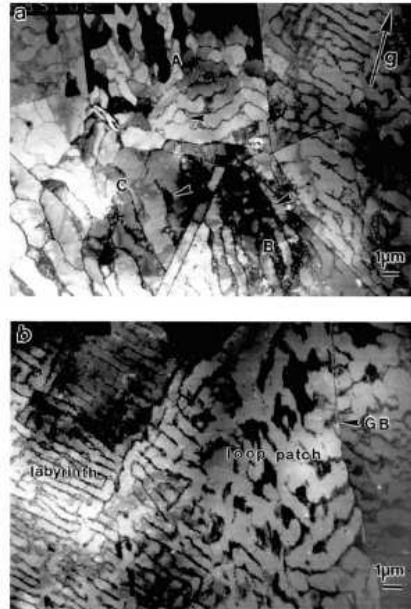


# Os experimentos de Huang-I



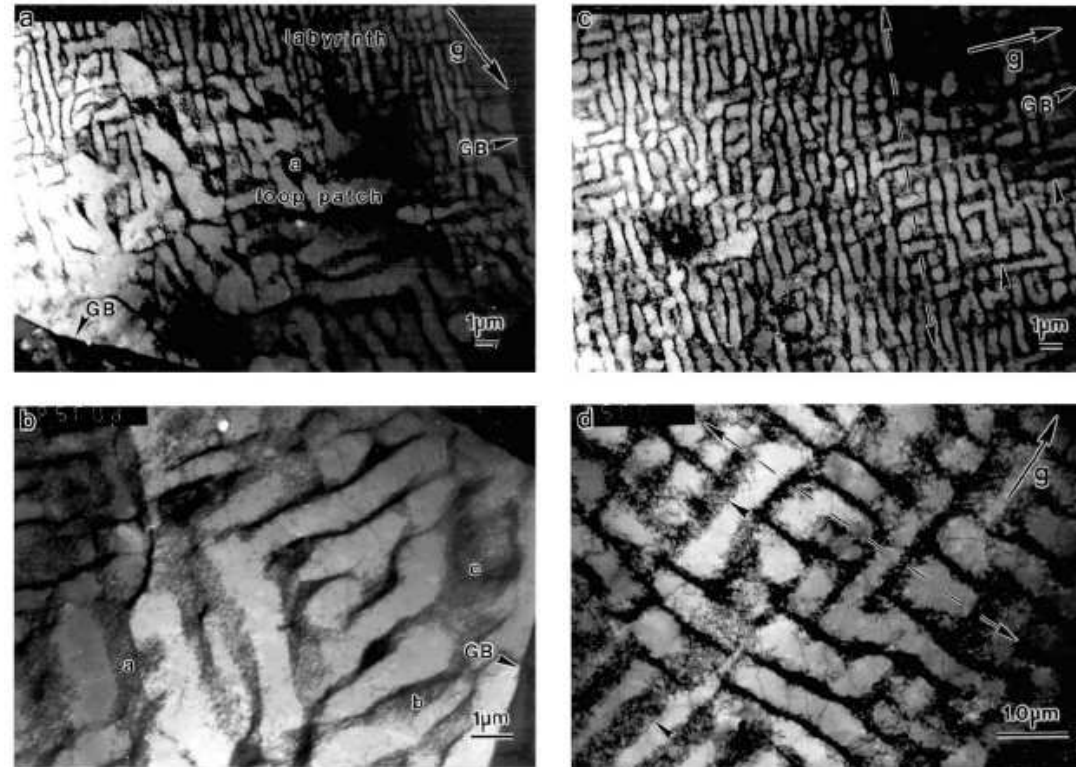
Estruturas de discordâncias 10000 ciclos após a redução da amplitude de deformação de 0.003 para 0.001. Condição (a) Plano da lâmina fina  $B = (011)$  e direção do feixe de elétrons  $g = [200]$ , (b)  $B = (011)$  e  $g = [\bar{1}1\bar{1}]$ . GB indica a posição do contorno de grão.

# Os experimentos de Huang-I



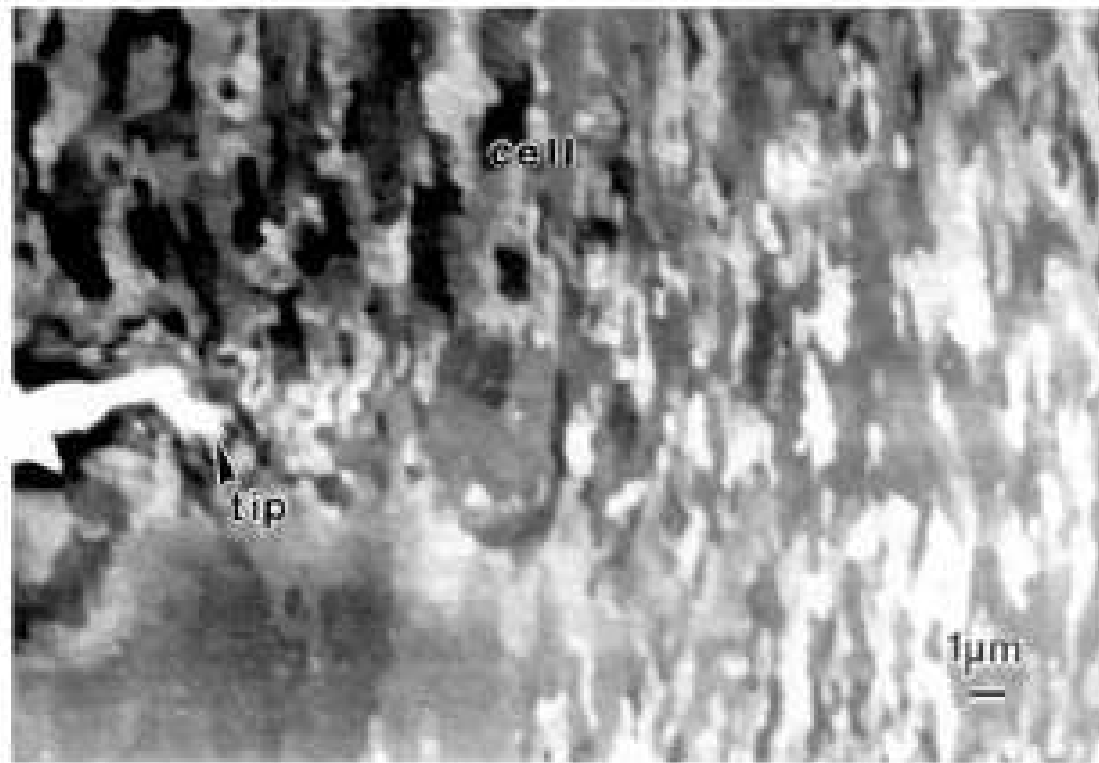
Estruturas de discordâncias 20000 ciclos após a redução da amplitude de deformação de 0.003 para 0.001. Condição (a) Plano da lâmina fina  $B = (011)$  e direção do feixe de elétrons  $g = [200]$ , (b)  $B = (011)$  e  $g = [\bar{1}1\bar{1}]$ . GB indica a posição do contorno de grão.

# Os experimentos de Huang-I



Estruturas de discordâncias 20000 ciclos após a redução da amplitude de deformação de 0.003 para 0.001. Condição (a) Plano da lâmina fina  $B = (011)$  e direção do feixe de elétrons  $g = [200]$ , (b)  $B = (011)$  e  $g = [\bar{1}1\bar{1}]$ . GB indica a posição do contorno de grão, (c)  $B = (011)$  e direção do feixe de elétrons  $g = [200]$ , (d)  $B = (011)$  e  $g = [\bar{1}1\bar{1}]$ . GB indica a posição do contorno de grão.

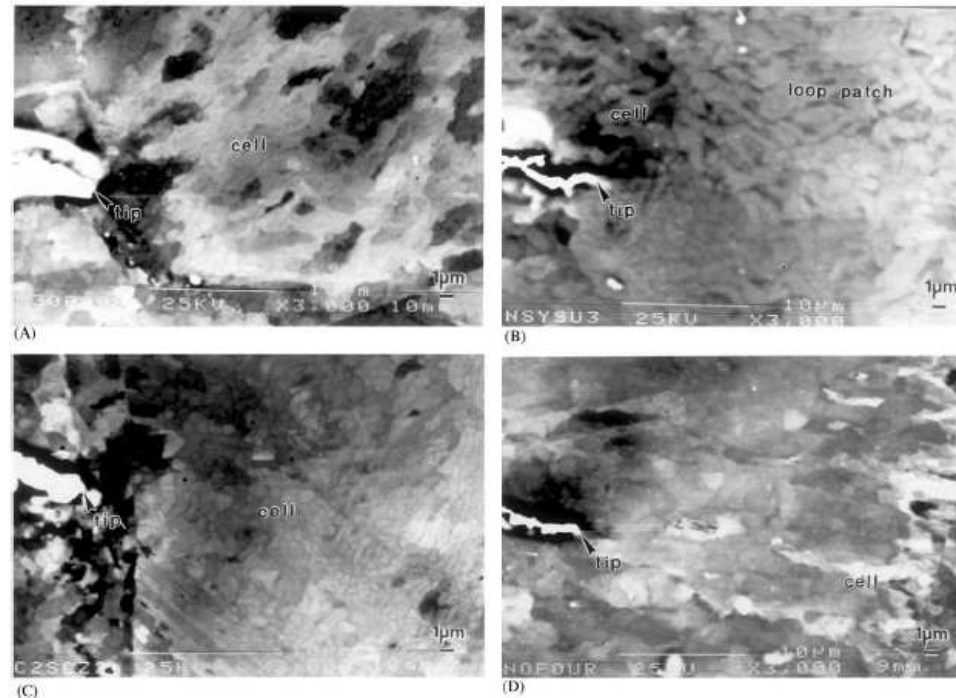
# Os experimentos de Huang-II



Condição de estado estacionário:  $\dot{a} = 2.0 \times 10^{-5}$  mm ciclo<sup>-1</sup> com carga máxima de 320 Kgf. Células desenvolvidas ocupam todo o grão onde a trinca está se propagando.

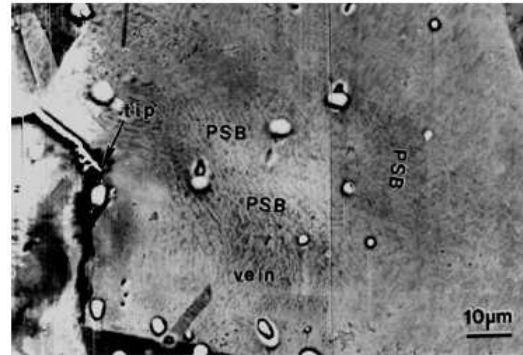


# Os experimentos de Huang-II

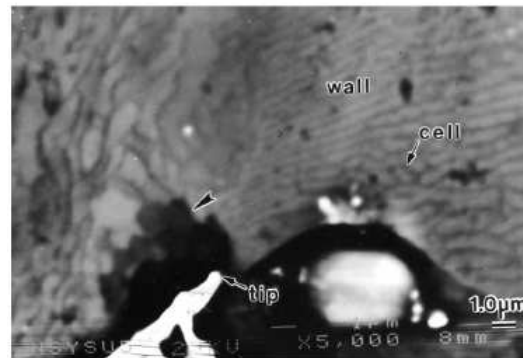


Condição após a redução da carga máxima para 112 Kgf (a) após  $3.0 \times 10^5$  ciclos as células aumentaram de tamanho, (b) após  $4.0 \times 10^5$  ciclos as células desapareceram e foram substituídas por *loop patches*, (c) após  $7.0 \times 10^5$  ciclos novas células se formaram, assim como paredes dipolares e PSBs e finalmente (d) após  $9.0 \times 10^5$  ciclos novas células se desenvolvem completamente e a trinca retoma a propagação.

# Os experimentos de Huang-III



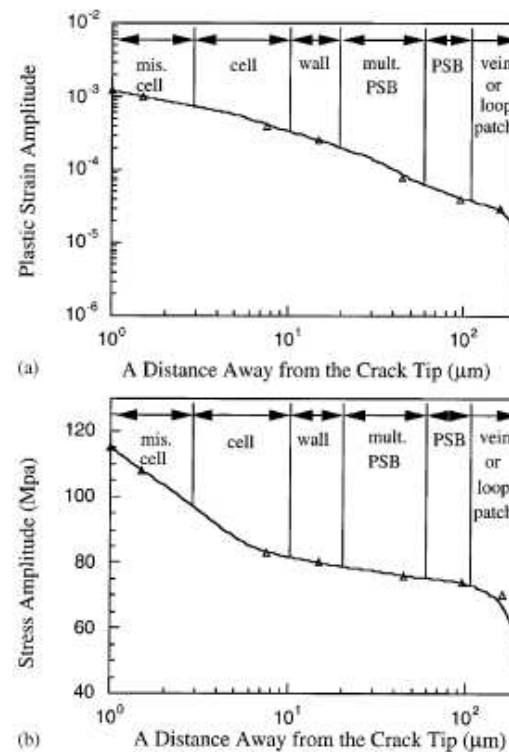
(a)



(b)

Estrutura de discordâncias à frente de uma trinca propagando a uma razão de  $5 \times 10^{-6}$  mm ciclo<sup>-1</sup> (a) baixa magnificação e (b) alta magnificação.

# Os experimentos de Huang-III



Estimativa da distribuição de amplitudes de deformação (a) e de tensão (b) à frente de uma trinca propagando a  $10^{-6}$  mm ciclo $^{-1}$ .

## *Os experimentos de Huang-IV*

---

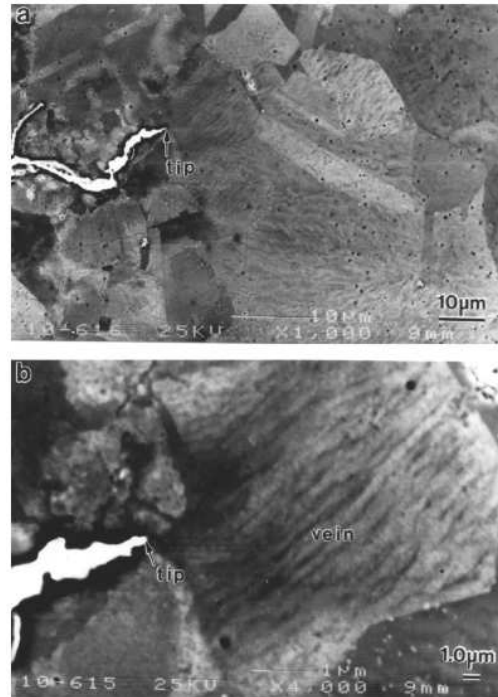
Os resultados anteriormente descritos podem ser complementados pelas observações contantes em Huang-IV (apesar deste artigo ser, a rigor, mais antigo que os demais). Neste artigo os autores estudam a evolução da microestrutura de deformação à frente da ponta da trinca após um pico de sobrecarga (*overload*) ou de subcarga (*underload*).

# Os experimentos de Huang-IV

Propagação em estado estacionário (de  $10^{-8}$  a  $10^{-6}$  mm ciclo $^{-1}$ ) → hierarquia de estruturas à frente da ponta da trinca:

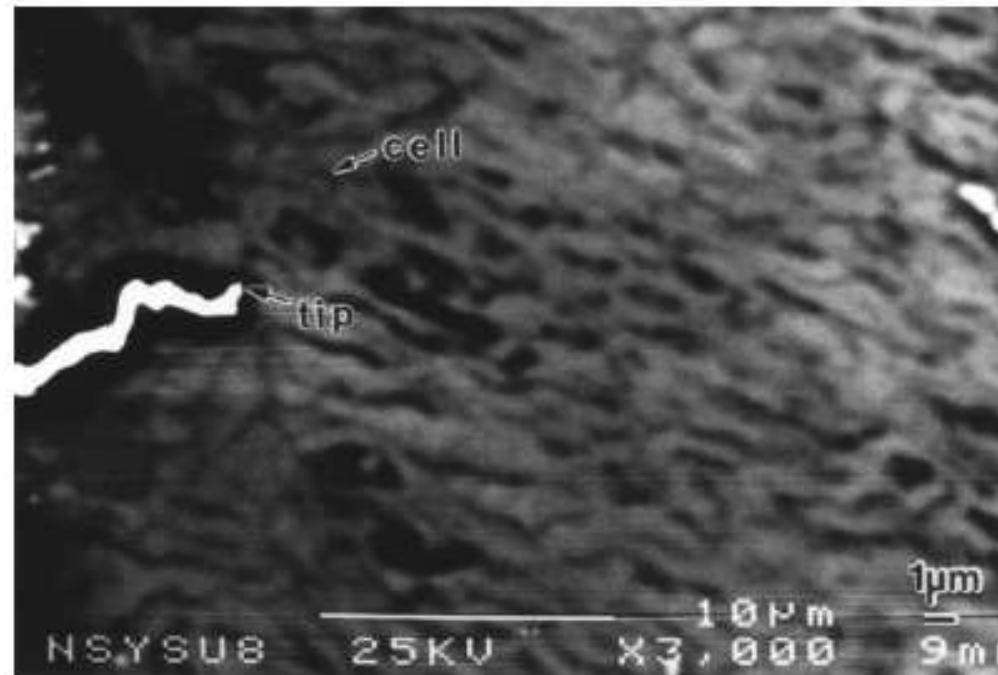
- Células com um diâmetro médio de  $0.7 \mu\text{m}$ ,
- Paredes dipolares (*condensed walls*)
- PSBs multidirecionais
- PSBs unidirecionais
- Veios e *loop patches*

# Os experimentos de Huang-IV



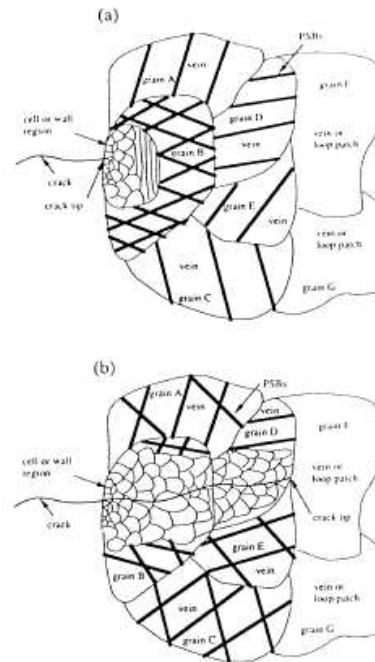
Microestrutura desenvolvida na ponta de uma trinca propagando a  $10^{-6}$  mm ciclo $^{-1}$  submetida a um pico de sobre-carga (*overload*) → a microestrutura alterou para veios e *loop patches* e aproximou-se da observada para propagação a  $10^{-7}$  mm ciclo $^{-1}$ .

# Os experimentos de Huang-IV



Microestrutura desenvolvida na ponta de uma trinca propagando a  $3 \times 10^{-7}$  mm ciclo<sup>-1</sup> submetida a um pico de sub-carga (*overload*) → a microestrutura continua apresentando células, porém ocupando um volume maior → aceleração.

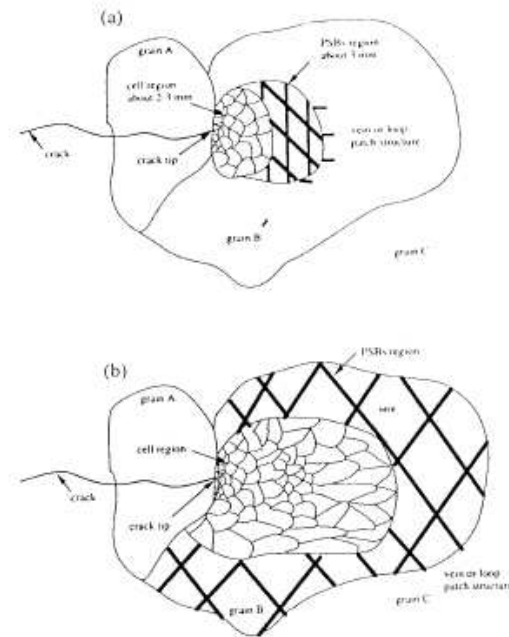
# Os experimentos de Huang-IV



Representação esquemática da evolução da microestrutura de deformação à frente da ponta da trinca (a) com propagação em estado estacionário e (b) após um pico de sobre-carga (*overload*).



# Os experimentos de Huang-IV



Representação esquemática da evolução da microestrutura de deformação à frente da ponta da trinca (a) com propagação em estado estacionário e (b) após um pico de sub-carga (*underload*).

- Há uma correspondência entre as microestruturas de deformação macroscópicas me FBC e as microestruturas observadas à frente de uma trinca em propagação estacionária → Método *rainflow*.
- Há evidências de que o desenvolvimento de uma microestrutura celular de discordâncias é essencial para manter a propagação da trinca → papel do polideslizamento na propagação da trinca.