

MODELO DE RECRISTALIZACION CONSIDERANDO DENSIDAD DE DISLOCACIONES - SIMULACION PARA ALUMINIO

Carlos A. Cattaneo^a, Silvia P. Silvetti^b

^a *Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Av. Belgrano Sur 1912; G4200ABT Santiago del Estero, Argentina, cacatta@unse.edu.ar*

<http://faa.unse.edu.ar>

^b *Facultad de Matemáticas Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba. Ciudad Universitaria, 5000 Córdoba, Argentina, silvetti@famaf.unc.edu.ar*

<http://www.famaf.unc.edu.ar>

Palabras clave: Recristalización, densidad de dislocaciones, autómatas celulares, Monte Carlo.

Resumen.

Los procesos de recristalización de metales y aleaciones deformados plásticamente son de central importancia en el procesamiento de metales por dos razones. La primera es el ablandamiento y la restauración de la ductibilidad de materiales endurecidos por deformaciones a baja temperatura. La segunda es el control de la estructura de grano del producto final. Para metales como el cobre, níquel, aluminio y sus aleaciones, después de la deformación, la recristalización es el único método para producir una nueva estructura de grano, con el tamaño de grano modificado.

Durante la deformación la energía se almacena en el material principalmente mediante dislocaciones. Una de las formas de liberar esta energía es por recristalización.

En el presente trabajo se presenta un modelo que permite relacionar el porcentaje de trabajo en frío con la densidad de dislocaciones presente en la muestra.

Por otra parte se describe un algoritmo basado en autómatas celulares y en el método de Monte Carlo para simular la recristalización, que evalúa la variación de la energía de un micro cristal cuando éste recristaliza en un nuevo grano, considerando la energía de borde de grano y la energía almacenada por el trabajo en frío; también considera la densidad de dislocaciones, la autodifusión de la muestra y la temperatura del ensayo.

Las simulaciones se realizan para aluminio puro, y los resultados muestran la variación del porcentaje de recristalización en función del tiempo, para las distintas temperaturas y los distintos porcentajes de trabajo en frío.

1 INTRODUCCION

El proceso de de recristalización de metales y aleaciones deformadas plásticamente, es de fundamental importancia en el procesado de estos materiales por dos razones. La primera es que produce un ablandamiento y restitución de la ductibilidad del material deformado a bajas temperatura. Y la segunda es que permite controlar la estructura de granos del producto final. La recristalización es el proceso por el cual granos deformados, son reemplazados por un conjunto de nuevos granos que nuclean y crecen hasta que los granos originales son totalmente consumidos.

Simple fenómenos como el crecimiento de grano y la recristalización, todavía no son bien comprendidos debido a la gran cantidad de variables que influyen en el problema, que hacen que la evolución de la microestructura sea un problema de múltiples variables

Es conocido que la clave para controlar las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones, es el control de la microestructura de estas. En la práctica, esto significa, comprender la conexión entre los procesos de manufactura (mecánicos y térmicos) y la evolución de la microestructura.

Durante la deformación plástica a bajas temperatura de metales, la mayor parte de la energía gastada en el proceso se desprende en forma de calor, mientras que el resto es almacenada por el metal como energía de deformación, asociada con diversos defectos reticulares creados por la deformación, por eso el material deformado, en comparación con el que no ha sido deformado, posee una elevada reserva de energía y se encuentra en estado de desequilibrio y termodinámicamente inestable. En este metal, incluso a temperatura ambiente, pueden ocurrir procesos espontáneos que conducen a un estado más estable. Al elevar la temperatura la velocidad de estos procesos crecen (Reed Hill, 1986). La velocidad a la que recristaliza un metal depende tanto de la velocidad a la que se forme el núcleo como de la velocidad a la cual éste crece. Estas dos velocidades determinan el tamaño de grano final de un metal recristalizado. Si el núcleo se forma rápidamente y crece con lentitud, se forman muchos cristales antes que de sus choques mutuos completen el proceso de recristalización. En este caso el tamaño final de grano será pequeño. Por otra parte, el tamaño del grano será grande si la velocidad de nucleación es lenta comparada con la velocidad de crecimiento.

Los factores que afectar la cinética de recristalización son: la energía de deformación almacenada en el metal, la temperatura a la cual se realiza el ensayo, la presencia de átomos en solución sólida, de partículas de segunda fase, la energía de borde de grano y la textura del material (Martin y Doherty, 1980).

Por otro lado existe una gran variedad de trabajos de simulación, que intentan reproducir el fenómeno recristalización, entre los pioneros se encuentran Srolovitz *et al.* quienes, en 1986 y 1988, realizan simulaciones con Monte Carlo para estudiar la recristalización bajo condiciones de nucleación homogéneas e in homogéneas, obteniendo como resultado que la fracción de volumen recristalizada muestra una variación sigmoideal con el tiempo y que los resultados para tiempos grandes son ajustados por la ecuación de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov.

Posteriormente, Rajmohan *et al.* en 2000, aplica un sistema de Monte Carlo tridimensional que tiene en cuenta la energía de deformación almacenada dependiente de la orientación, obteniendo que la tasa de reducción de la energía almacenada juega un rol principal en la tasa de la nucleación de los nuevos granos.

Y, más recientemente, Mukhopadhyay *et al.* introducen, en 2007, avances en el modelo de recristalización basado en autómatas celulares, que consisten en incorporar

nucleación estimulada por partículas y en borde de grano, además permite que este modelo sea compatible con los modelos de textura de deformación y de precipitación.

Pero, ninguno de los modelos computacionales propuestos permite reproducir los resultados experimentales en su totalidad. Por eso, el objetivo del presente trabajo es presentar un modelo de simulación para recristalización que tiene en cuenta: la temperatura del ensayo, la energía de deformación almacenada por el trabajo en frío, y las siguientes constantes del material: la energía de borde grano, la energía de activación para autodifusión, el módulo de corte y el vector de Burgers del material.

2 MODELO PARA ESTIMAR DE LA DENSIDAD DE DISLOCACIONES EN FUNCION DEL TRABAJO EN FRIO

Cuando un metal se trabaja en frío, esto es, cuando se lo deforma plásticamente a temperatura ambiente, la energía almacenada se encuentra principalmente en forma de energía elástica en los campos de deformación que rodean a las dislocaciones y los defectos puntuales que se producen durante el proceso. Cuando aumenta el grado de deformación se eleva la densidad de dislocaciones. Así, la densidad de dislocaciones aumenta con la cantidad de trabajado en frío, por lo cual es importante encontrar una relación que vincule densidad de dislocaciones con el porcentaje de trabajo en frío aplicado al material.

Existen en la bibliografía gran cantidad de trabajos experimentales y de simulación, que intentan determinar esa relación, aunque todos ellos han sido desarrollados para materiales específicos. Roy *et al.* en 2006 realizaron los estudios en aleaciones martensíticas sometidas a pequeños porcentajes de trabajo en frío; Verdier *et al.* en 1991 analizaron una aleación de aluminio magnesio; en 2005 Benzerga *et al.* determinaron la relación utilizando un modelo plano en un cristal con estructura cristalina FCC.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo geométrico sencillo para determinar la densidad de dislocaciones en función del trabajo en frío.

Consideremos una muestra de material monocristalina. El monocristal, que inicialmente tiene forma de cubo con arista l_0 se deforma mediante trabajo en frío. Por efecto de la deformación el monocristal adquiere la forma de un paralelepípedo rectangular, de manera tal que, el volumen (V) de la muestra se conserva y un lado del monocristal mantiene la dimensión original (l_0).

En la figura 1 se presentan la muestra antes y después de deformarla:

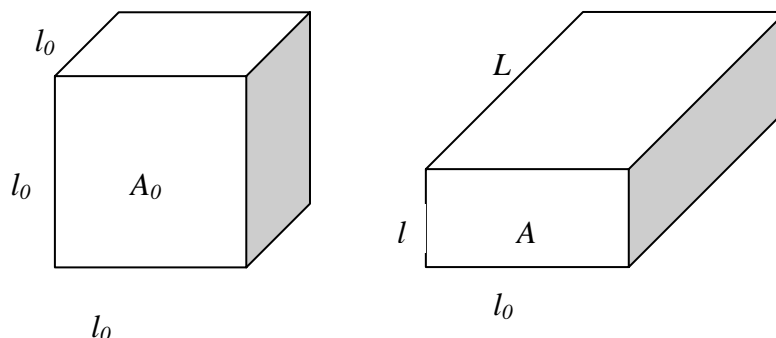


Figura 1. Monocristal con y sin deformación

Considerando que el volumen se conserva (ecuación 1)

$$V = l_0^3 = l_0 l L \quad (1)$$

El área original es (ecuación 2)

$$A_0 = l_0^2 \quad (2)$$

Como se muestra en la ecuación 3, luego de aplicar el trabajo en frío se reduce a

$$A = l_0 l \quad (3)$$

De la ecuación 1 podemos determinar el lado que se alarga (ecuación 4)

$$L = \frac{l_0^2}{l} \quad (4)$$

Por medio de la ecuación 4 podemos determinar el alargamiento del muestra en la dirección del lado que se estira, como se observa en la ecuación 5

$$\Delta L = L - l_0 \quad (5)$$

Consideramos que este alargamiento se debe a que se ubican m dislocaciones de borde, con vector de Burgers b , cuyas líneas de dislocación tienen, cada una, longitud l_0 , como se indica en la figura 2:

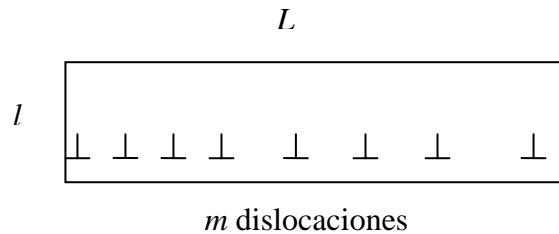


Figura 2

Por lo tanto podemos expresar el alargamiento en función del número de dislocaciones, como (ecuación 6)

$$\Delta L = L - l_0 = mb \quad (6)$$

Podemos despejar el número de dislocaciones en función de las dimensiones de la muestra antes y después de la deformación y del vector de Burgers (ecuación 7)

$$m = \frac{\Delta l}{b} = \frac{L - l_0}{b} = \frac{l_0^2/l - l_0}{b} = \frac{l_0^2 - l_0 l}{bl} \quad (7)$$

Recordando que al porcentaje de trabajo en frío se lo puede escribir como se indica en la ecuación 8:

$$cw = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100 = \frac{l_0^2 - l_0 l}{l_0^2} \times 100 \quad (8)$$

Despejando, se obtiene la ecuación 9

$$l_0^2 - l_0 l = \frac{cw}{100} l_0^2 \quad (9)$$

Reemplazando la [ecuación 9](#) en la [ecuación 7](#) se obtiene m en función del trabajo en frío ([ecuación 10](#))

$$m = \frac{(cw/100)l_0^2}{bl} \quad (10)$$

Como la densidad de dislocaciones es la cantidad de línea de dislocaciones dividido por el volumen de la muestra, para nuestra muestra, es igual al número de dislocaciones (m) por la longitud de cada dislocación (l_0) dividido el volumen de la muestra ([ecuación 11](#))

$$\rho = \frac{ml_0}{V} = \frac{ml_0}{l_0^3} = \frac{(cw/100)l_0^2l_0}{bl_0^3} \quad (11)$$

Simplificando, se obtiene la [ecuación 12](#)

$$\rho = \frac{(cw/100)}{bl} \quad (12)$$

De la [ecuación 9](#) podemos despejar l como función del trabajo en frío como se ve en la [ecuación 13](#)

$$l = (1 - cw/100)l_0 \quad (13)$$

Remplazamos la [ecuación 13](#) en la [ecuación 12](#) se obtiene la [ecuación 14](#)

$$\rho = \frac{(cw/100)}{b(1 - (cw/100))l_0} \quad (14)$$

Suponiendo que la longitud inicial de nuestro monocristal l_0 , corresponde al tamaño inicial de grano d_0 , la [ecuación 14](#) queda como se muestra en la [ecuación 15](#)

$$\rho = \frac{(cw/100)}{bd_0(1 - (cw/100))} \quad (15)$$

De la [ecuación 15](#) se concluye que densidad de dislocaciones aumenta con el aumento del trabajo en frío, y que es mayor a menor tamaño inicial de grano.

Hasta ahora sólo se consideraron dislocaciones con líneas de dislocación en una sola dirección. Si agregamos dislocaciones con líneas de dislocaciones en las otras dos direcciones de la muestra, las líneas de dislocaciones estarían en las direcciones de l y de L , como se muestra en la [figura 3](#).

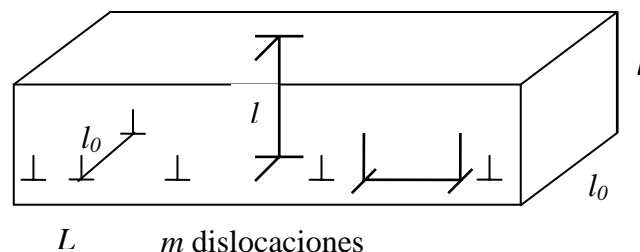


Figura 3

Analicemos primero las dislocaciones en la dirección de l . En esa dirección colocamos m dislocaciones con una longitud l cada una, aportando una longitud total de línea de dislocación de ml .

Consideremos que cada plano extra colocado perpendicularmente a la dirección de L , tiene una línea de dislocación de largo l_0 y otra de largo l . Entonces, como la muestra tiene m planos extras, obtenemos una línea de dislocación total de $m(l_0+l)$.

Analicemos ahora cuantas dislocaciones con líneas de dislocación en la dirección de L podemos colocar. El espacio entre dos planos extras es de L/m . Si colocamos en este espacio n dislocaciones de longitud L/m , esta cantidad de dislocaciones n , es igual a l_0 dividido L/m (ecuación 16)

$$n = \frac{ml_0}{L} \quad (16)$$

el total de línea de dislocaciones entre los dos planos extras será el número de dislocaciones por el largo de cada una, es decir (ecuación 17):

$$ml_0/L * L/m = l_0 \quad (17)$$

como tenemos m espacios debemos multiplicar la longitud anterior por m , por lo tanto la longitud total de dislocaciones en la dirección de L es ml_0

Si sumamos las longitudes totales de líneas de dislocación en las tres direcciones tendremos el total $m(l_0+l) + ml_0$ de línea de dislocaciones.

La densidad de dislocaciones es el total de línea de dislocaciones dividido entre el volumen de la muestra, como se expresa en la ecuación 18

$$\rho = \frac{2ml_0 + ml}{V} = \frac{2ml_0 + ml}{l_0^3} \quad (18)$$

Si reemplazamos en la ecuación 18 el valor de l de la ecuación 13 y valor de m de la ecuación 10 se obtiene

$$\rho = \frac{\left(\frac{cw}{100}\right)\left(2 + \left(1 - \frac{cw}{100}\right)\right)}{bl_0\left(1 - \frac{cw}{100}\right)} \quad (19)$$

Considerando que la longitud inicial l_0 , corresponde al tamaño inicial de grano d_0 , la ecuación 19 puede expresarse como la ecuación 20:

$$\rho = \frac{\left(\frac{cw}{100}\right)\left(3 - \left(\frac{cw}{100}\right)\right)}{bd_0\left(1 - \left(\frac{cw}{100}\right)\right)} \quad (20)$$

En la figura 4 se muestra la gráfica de la ecuación 20 para dos microcristales de distinto tamaño (d_0), uno de 10 micrones y otro de 100 micrones, ambos sistemas con vector de Burgers de 0,3 nm.

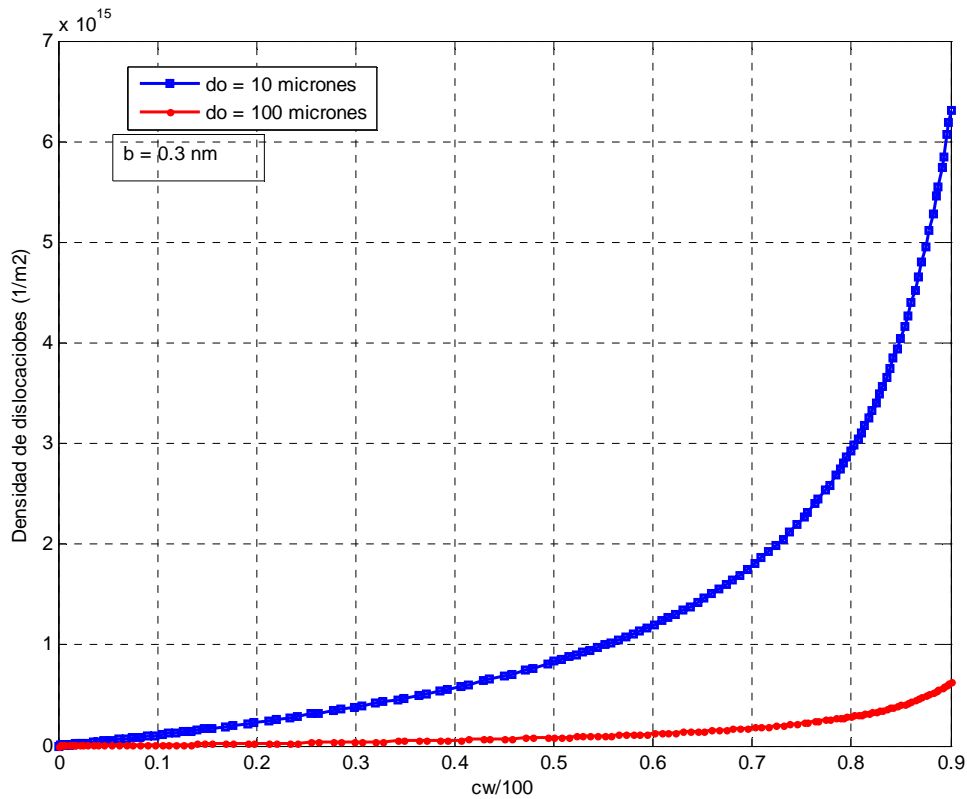


Figura 4. Evolución de la densidad de dislocaciones en fusión del porcentaje de trabajo en frío

3 MODELO PARA LA SIMULACION

Para estudiar la recrystalización en sistemas puros se utiliza un algoritmo que se basa en autómatas celulares y Monte Carlo, similar al propuesto por Cattaneo y Silvetti en 2008 y 2009, aplicado a crecimiento de grano.

La matriz inicial de granos es representada por una matriz cuadrada de dimensiones $n \times n$, donde cada sitio de matriz representa un microcristal, además a esta matriz se le asocia otra de las mismas dimensiones donde en cada sitio de red se coloca el valor de la densidad de dislocaciones promedio del microcristal correspondiente.

El algoritmo de simulación es el siguiente:

- Parados en un sitio de red de la matriz de granos (microcristal), se mira el sitio equivalente en la matriz de densidad de dislocaciones, y tomamos el valor de densidad de dislocaciones, si este valor es distinto de cero analizamos si el microcristal puede recrystalizar, si es cero pasamos a la parte de crecimiento normal de grano para el microcristal.
- Primero, para la recrystalización, generamos una nueva orientación al azar del microcristal (microcristal recrystalizado),
- Segundo, evaluamos la variación en la energía del sistema, correspondiente a la energía de borde de grano debida al nuevo microcristal recrystalizado (ecuación 21)

$$\Delta U_{BG} = \left(-\gamma A_{mc} \sum_{i,j} (\delta_{S_i S_j} - 1) \right)_{\text{recrystalizado}} - \left(-\gamma A_{mc} \sum_{i,j} (\delta_{S_i S_j} - 1) \right)_{\text{antes de recrystalizar}} \quad (21)$$

donde γ es la energía de borde de grano, A_{mc} es el área del microcristal en contacto con otro microcristal, S_i es una de las Q_i orientaciones posibles del elemento i de la matriz y $\delta_{S_i S_j}$ es el delta de Kronecker.

- Tercero, evaluamos la variación en la energía del sistema (ecuación 22), correspondiente a la energía de relajación de tensiones del microcristal recristalizado (antes de la recristalización el micro cristal tiene una determinada densidad de dislocaciones, luego de la recristalización esta densidad queda en cero)

$$\Delta U_{RT} = -\frac{1}{2} G b^2 \rho_{dis} V_{mc} \quad (22)$$

donde G es el módulo de corte, b el vector de Burgers, ρ_{dis} la densidad de dislocaciones del microcristal y V_{mc} el volumen del microcristal.

- Cuarto, calculamos el cambio total de energía (ecuación 23) que es igual a la suma de las energías calculadas anteriormente

$$\Delta U = \Delta U_{BG} + \Delta U_{RT} \quad (23)$$

- Si ΔU es menor o igual a cero se calcula la probabilidad de transición como se muestra en la ecuación 24

$$P_t = \frac{\exp(-(Q - (Q/2) * cw) / k_B T)}{\exp(-(Q - (Q/2) * cw) / k_B T_f)} \quad (24)$$

donde Q es la energía de activación para la autodifusión, $Q/2$ energía de activación para movilidad de las vacancias (Bokshstein, 1980), cw es la fracción de trabajo en frío, T_f la temperatura de cambio de fase del sistema, k_B la constante de Boltzmann y T la temperatura del ensayo.

- Si ΔU es mayor que cero se calcula la probabilidad de transición (ecuación 25)

$$P_t = \frac{\exp(-(Q - (Q/2) * cw) / k_B T)}{\exp(-(Q - (Q/2) * cw) / k_B T_f)} \exp(-\Delta U / k_B T) \quad (25)$$

- Luego se genera un número al azar ξ entre 0 y 1, y se compara este número con la probabilidad de transición calculada, si ξ es menor que la probabilidad calculada, la recristalización es exitosa, el microcristal toma la nueva orientación y el correspondiente sitio de red en la matriz de densidad de dislocaciones queda en cero; si ξ es mayor que la probabilidad calculada el microcristal no modifica su estado, y se pasa al sitio de red de la matriz de granos (microcristal) siguiente y se repiten todos los pasos.

4 RESULTADOS

Para estudiar cómo influye la relación entre la densidad de dislocaciones y el porcentaje de trabajo en frío en la recristalización, se construyó una matriz de densidad de dislocaciones. En la matriz se colocó, en los sitios de los microcristales que están en los bordes de grano, la mayor densidad de dislocaciones y esta densidad fue disminuyendo para los sitios de microcristales en el interior de los granos. Se estimó la densidad de dislocaciones promedio en toda la muestra y se relacionó con el porcentaje de trabajo en frío, utilizando la ecuación 20.

En este trabajo se estudió un sistema constituido por muestras de aluminio puro las que han sido sometidas a distintos porcentajes de trabajo en frío respectivamente.

Se analizó aluminio puro utilizando los siguientes valores característicos:

$$Q = 30000 \text{ Cal/mol}, \gamma = 0,6 \text{ J/m}^2, T_f = 933^\circ\text{K}, G = 26 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2, b = 0,286 \cdot 10^{-9} \text{ m}.$$

Se definió un microcristal de $0,8 \times 10^{-6}$ m de lado, y una matriz inicial de grano con un tamaño medio de grano de $10,97 \mu\text{m}$.

Las temperaturas seleccionadas para realizar las simulaciones fueron: 573°K , 673°K , 773°K y 873°K .

4.1 Caso 1

Se estudió la recrystalización para un sistema con un porcentaje de trabajo en frío $cw = 84\%$, a la cual le corresponde una densidad de dislocaciones promedio de $1.77 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$. En la [figura 5](#) se muestra la matriz de densidad de dislocaciones

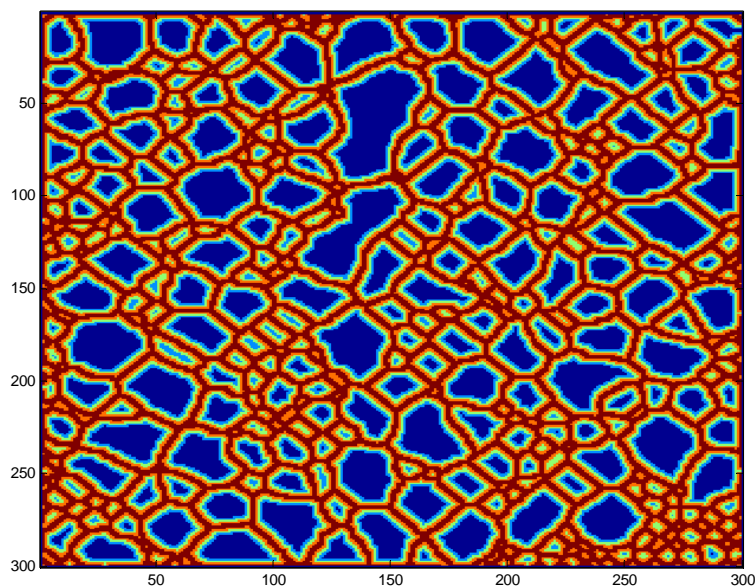


Figura 5. Matriz de densidad de dislocaciones para 84% de trabajo en frío
 Marrón $\rho_{dis} = 3 \cdot 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Naranja $\rho_{dis} = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Verde $\rho_{dis} = 2 \cdot 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Celeste $\rho_{dis} = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Azul $\rho_{dis} = 1 \cdot 10^{15} \text{ 1/m}^2$

En la [figura 6](#) se grafica el porcentaje de recrystalización obtenida un función del tiempo (lazos de autómatas celulares), para las distintas temperaturas de ensayo. Se puede observar que la recrystalización depende de la temperatura del ensayo, siendo mucho más rápida a mayor temperatura.

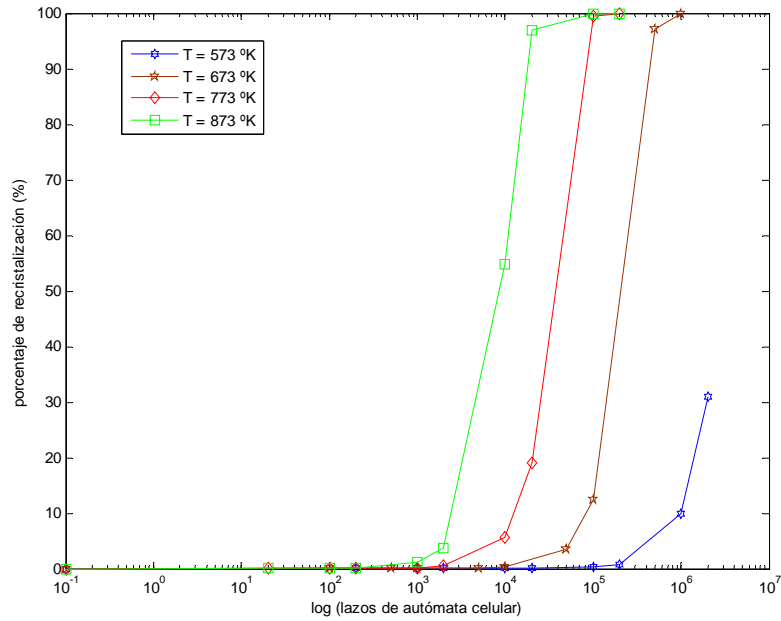
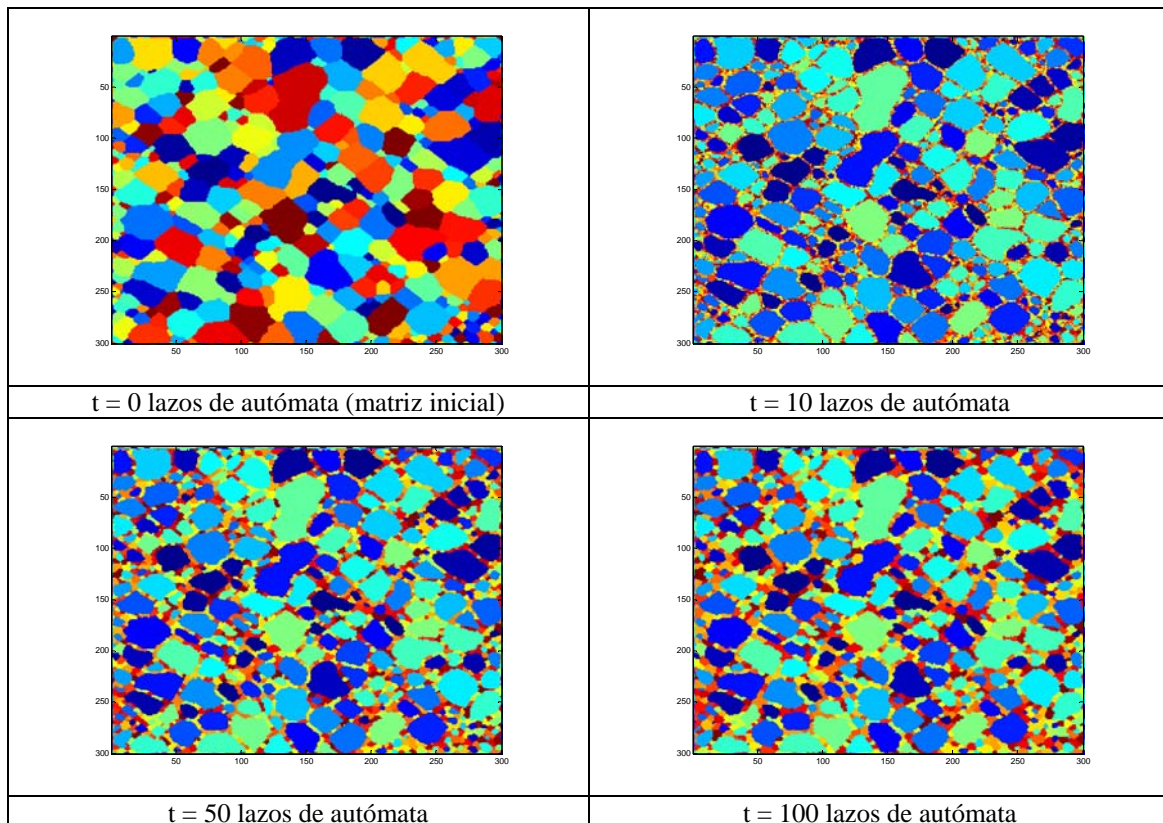


Figura 6. Evolución de la recrystalización en función del tiempo para un porcentaje de trabajo en frío de 84%

En la figura 7 se muestra la evolución de la microestructura a 873°K, durante la recrystalización. Se puede apreciar que la recrystalización se inicia en los borde de grano y luego se extiende hacia el interior del grano, acompañada de un crecimiento normal de grano. Este comportamiento fue observado para todas las temperaturas analizadas.



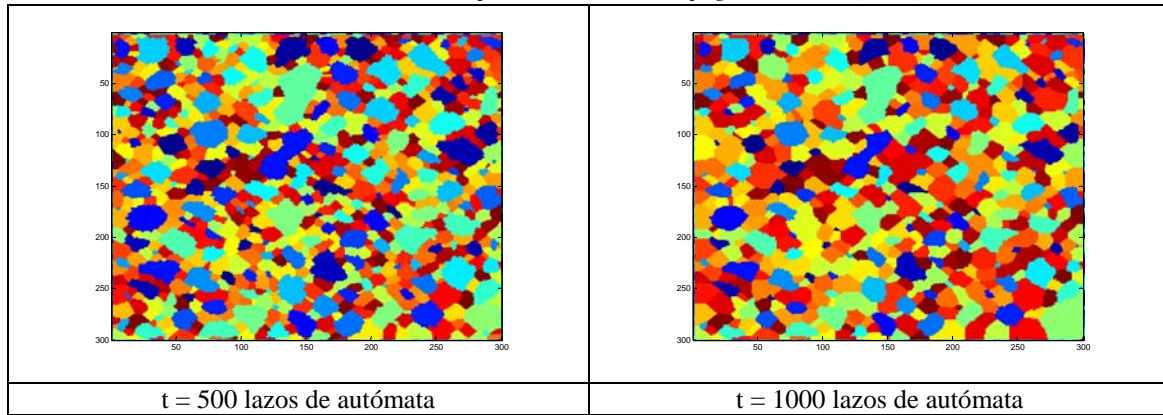


Figura 7. Evolución de la microestructura para $cw = 84\%$ y 873°K

4.2 Caso 2

Se estudia la recristalización para un sistema con un porcentaje de trabajo en frío $cw = 74\%$, a la cual le corresponde una densidad de dislocaciones promedio de $0.96 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$. La figura 8 muestra la matriz de densidad de dislocaciones.

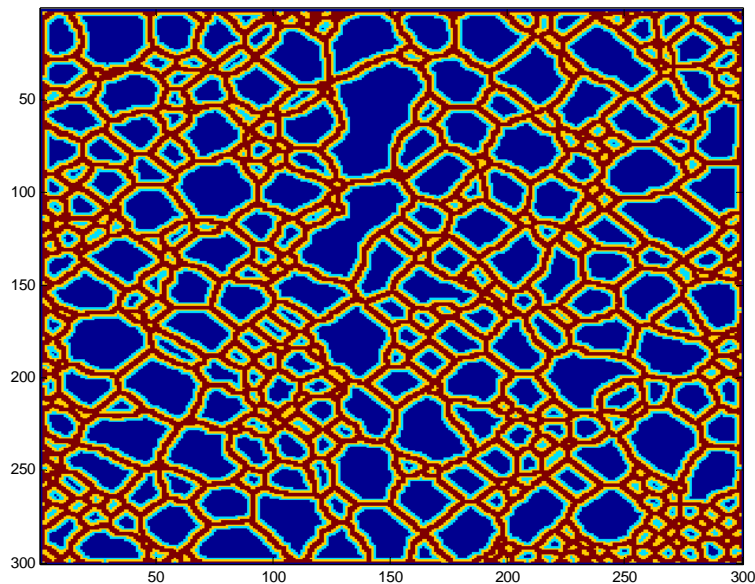


Figura 8. Matriz de densidad de dislocaciones para 74% de trabajo en frío
 Marron $\rho_{dis} = 2 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Naranja $\rho_{dis} = 1.5 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Celeste $\rho_{dis} = 1 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Azul $\rho_{dis} = 0.5 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$

En la figura 9 se grafica el porcentaje de recristalización obtenida un función del tiempo (lazos de autómata celular), para las distintas temperaturas de ensayo. En la misma se puede observar que la recristalización depende de la temperatura del ensayo, siendo mucho más rápida a mayor temperatura.

La evolución de la microestructura, para 873°K , se muestra en la figura 10. Se puede observar que recristalizan unos pocos granos en determinados lugares de la matriz inicial y luego estos nuevos granos recristalizados son los que crecen, mediante un crecimiento normal de grano.

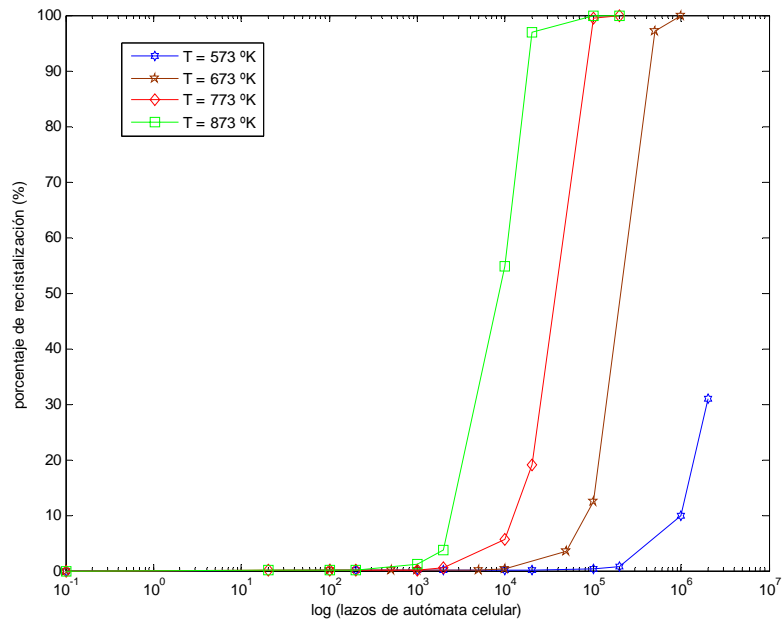


Figura 9. Evolución de la recrystalización en función del tiempo para un porcentaje de trabajo en frío de 74%

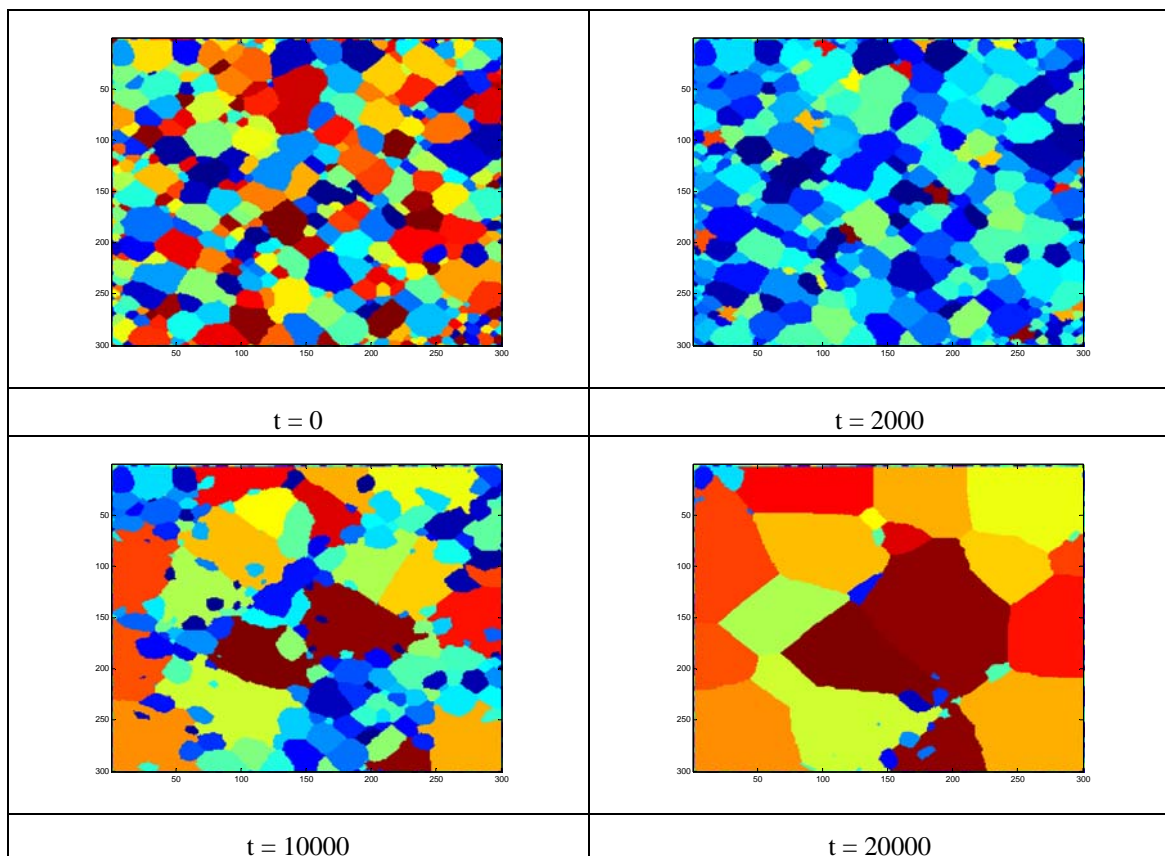


Figura 10. Evolución de la microestructura para $cw = 74\%$ a 873°K

4.3 Caso 3

Se estudia la recrystalización para un sistema con un porcentaje de trabajo en frío $cw = 50\%$, al cual le corresponde una densidad de dislocaciones promedio $0.33 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$. En la figura 11 se muestra la matriz de densidad de dislocaciones

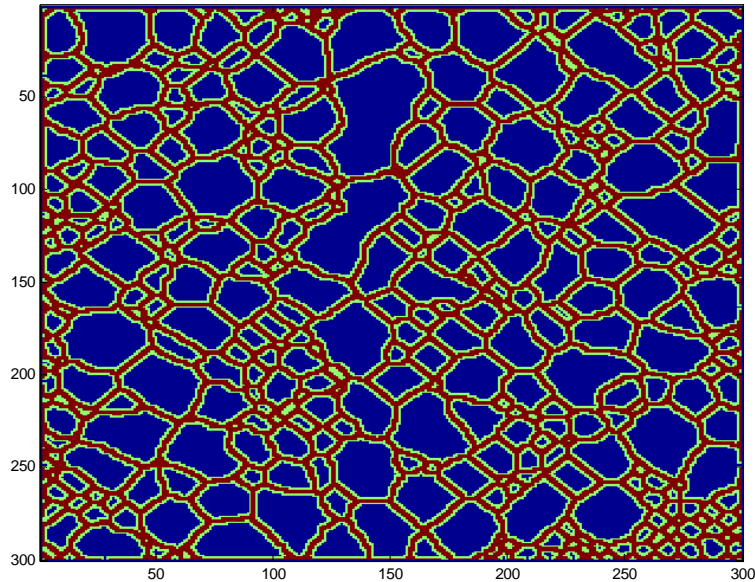


Figura 11. Matriz de densidad de dislocaciones para 50% de trabajo en frío
Marrón $\rho_{dis} = 1.1 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Verde $\rho_{dis} = 0.6 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$, Azul $\rho_{dis} = 0.1 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2$

En la figura 12 se grafica el porcentaje de recrystalización en función del tiempo (lazos de autómatas celulares), para las distintas temperaturas de ensayo. En la misma se puede observar que la recrystalización depende de la temperatura del ensayo, siendo mucho más rápida a mayor temperatura.

La evolución de la microestructura, para 873°K, se muestra en la figura 13. En ella se puede observar que la recrystalización inicial es muy escasa, apareciendo solamente dos granos nuevos, los cuales crecen mostrando un crecimiento anormal de grano.

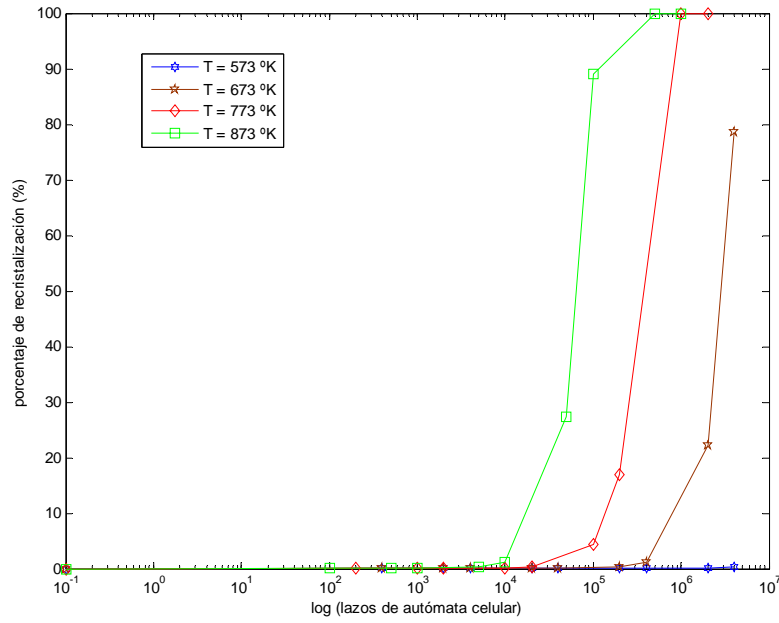


Figura 12. Evolución de la recristalización en función del tiempo para un porcentaje de trabajo en frío de 50%

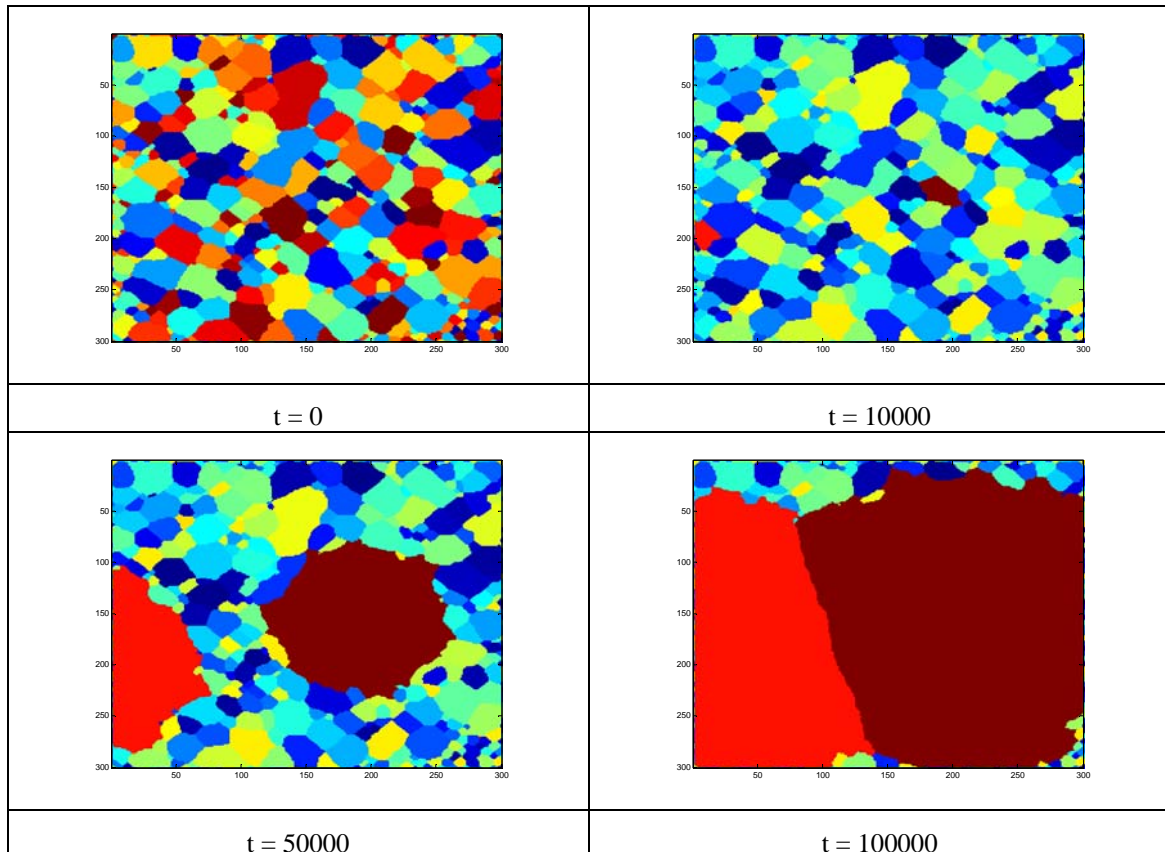


Figura 13. Evolución de la microestructura para $cw = 50\%$ a 873°K

5 CONCLUSIONES

Se presenta un simple modelo que relaciona la densidad de dislocaciones con el porcentaje de trabajo en frío realizado sobre un metal (figura 4).

Se presenta un algoritmo, basado en autómatas celulares y Monte Carlo, para simular la recrystalización de metales que tiene en cuenta el porcentaje de trabajo en frío y la densidad de dislocaciones presente en la muestra (ecuaciones 22, 24 y 25).

Los resultados de las simulaciones para un trabajo en frío de 84%, se corresponden con los resultados reportados experimentalmente: la recrystalización comienza en los bordes de granos (figura 7), y la velocidad de recrystalización aumenta con el aumento de la temperatura (figura 6).

Para las simulaciones con 74% y 50% de trabajo en frío las curvas de recrystalización se corresponden con las reportadas experimentalmente, no así el comportamiento de la microestructura, observándose que para 50% de trabajo en frío los granos recrystalizados tienen un desarrollo anormal.

REFERENCIAS

- Benzerga, A.A; Brechet, Y.; Needleman, A.; Huyesen, E. Van der. The stored energy of cold work: Predictions from discrete dislocation plasticity. *Acta Materialia* 53: 4765–4779. 2005
- Bokshstein, B. S. *Difusión en Metales*. Editorial Mir, 1980
- Cattaneo, C.A.; Silvetti, S.P. Modelo híbrido para el crecimiento de grano aplicando autómatas celulares y método de Monte Carlo. *Mecánica Computacional*. Vol XXVII: 2385-2395. 2008
- Cattaneo, C.A.; Silvetti, S.P. Efectos de la difusión en borde de grano en el crecimiento anormal de grano. *Mecánica Computacional* Vol XXVIII: 2425-2433. 2009
- Martin, J. W and Doherty, R. D. *Stability of Microstructure in Metallic System*. Cambridge Solid State Science Series. 1980
- Mukhopadhyay, P; Loeck, M. and Gottstein, G. A cellular operator model for the simulation of static recrystallization, *Acta Materialia*. Vol 55: 551–564. 2007
- Rajmohan, N. and Szpunar, J.A. A new model for recrystallization of heavily cold-rolled aluminum using orientation-dependent stored energy. *Acta Materialia*. Vol 48: 3327-3340. 2000
- Reed Hill, R.E. *Principios de Metalurgia Física*. Cia. Editorial continental 1986
- Roy, A.K; Bandyopadhyay, S; Suresh, S.B; Maitra, D; Kumara, P; Wells, D; Mac, L. Relationship of residual stress to dislocation density in cold-worked martensitic alloy *Materials Science and Engineering A* 416: 134–138. 2006
- Srolovitz, D.J; Grest, G.S. and Anderson, M.P. Computer simulation of recrystallization I. Homogeneous nucleation and growth. *Acta Metallurgica*. Volume 34: Issue 9, Pages 1833-1845. 1986,
- Srolovitz, D.J; Grest, G.S; Anderson, M.P and Rollett, A.D. Computer simulation of recrystallization II. Heterogeneous nucleation and growth, *Acta Metallurgica* Volume 36: Issue 8, 2115-2128. 1988
- Verdier, M; Groma, I; Flandin, L; Lendvai, J; Brkhet, Y. and Guyot, P. Dislocation densities and stored energy after cold rolling of al-mg alloys: investigations by resistmty and differential scanning calorimetry. *Scripta Mater*, Vol. 31, No. 4: pp. 449-454. 1991.