

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DE UNA MICROESTRUCTURA DE SOLIDIFICACIÓN DENDRÍTICA EQUIAXIAL

Alejandro D. Moreno^{(1,2)*}, Mario R. Rosenberger^(1,2) y Carlos E. Schvezov^(1,2)

⁽¹⁾*Instituto de Materiales de Misiones, CONICET - Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Misiones, Argentina. <http://www.imam-conicet.gob.ar/>*

⁽²⁾*Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Misiones, Argentina. <http://www.fceqyn.unam.edu.ar/>*

*Correo Electrónico: morenoalejandro@conicet.gov.ar

Palabras clave: Microestructura dendrítica, resistencia mecánica, MEF.

Resumen. En piezas metálicas obtenidas por solidificación se distingue la estructura en granos equiaxiales o columnares y a nivel microscópico cada grano presenta una estructura dendrítica que es determinante en las propiedades del producto final. En el presente trabajo se desarrolla un modelo de elementos finitos bidimensional para estudiar los efectos del tamaño de la dendrita, la curvatura de la punta y la orientación respecto a la carga sobre los campos de tensión y deformación de una microestructura de solidificación dendrítica. Se construyen microestructuras artificiales que constan de una matriz homogénea con una sola dendrita equiaxial mediante una curva polar que indica las direcciones de crecimiento dendrítico, se simula un ensayo de tracción simple en régimen elastoplástico considerando dos fases que poseen igual rigidez pero distintas propiedades plásticas e interactuando mediante una adherencia perfecta. Se analizaron diferentes condiciones de contorno para simular un ensayo mecánico mediante deformación controlada en un análisis de elementos finitos y se dedujo la respuesta mecánica del material mixto a partir de la heterogeneidad de los campos tensión – deformación. Se encontró, para una misma relación de fases, una dependencia entre la distribución de tensiones y su valor medio según la forma y la orientación de la dendrita, lo cual incide en la resistencia de la microestructura.

1 INTRODUCCIÓN

Durante los procesos de fabricación de piezas metálicas por solidificación las estructuras que se forman (a niveles macroscópicos y microscópicos) son determinantes en las propiedades del producto final. En una pieza colada, a nivel macroscópico, se distingue la estructura en granos equiaxiales o columnares y, a nivel microscópico, cada grano puede presentar una morfología ramificada como consecuencia de un fenómeno denominado crecimiento dendrítico debido a la solidificación en un ambiente con subenfriamiento en el líquido (ver [Figura 1](#)).

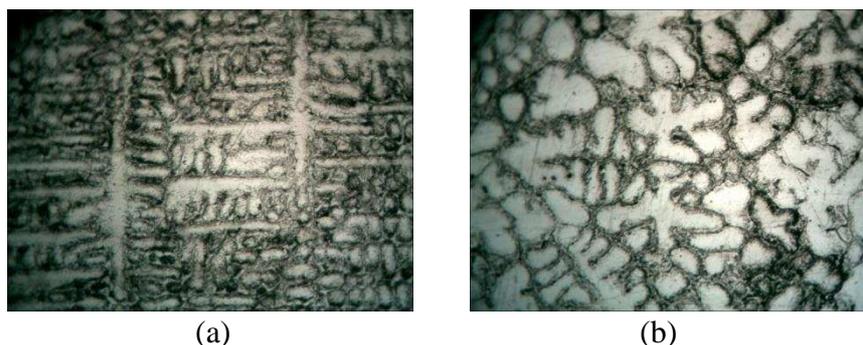


Figura 1: micrografías de una aleación Al-Cu ([Rodríguez et al., 2013](#)) que evidencia una microestructura dendrítica (a) columnar y (b) equiaxial.

Los primeros estudios relacionando macroestructura con las propiedades mecánicas de las aleaciones, dieron lugar a la conocida ecuación de Hall ([Hall, 1951](#)) y Petch ([Petch, 1953](#)) que midieron, a temperatura ambiente y de nitrógeno líquido, los valores de la tensión de fluencia mínima, σ_{ys} , para muestras policristalinas de α -Fe con diferentes tamaños de granos equiaxiales promedios. Se encontró que la tensión de fluencia depende del tamaño de grano según lo establece la ecuación $\sigma_{ys} = \sigma_0 + k \cdot d^{-0.5}$, donde σ_0 y k son constantes experimentales ([Armstrong, 2014](#)).

Se han encontrado ([Quaresma et al., 2000](#); [Osorio et al., 2002](#); [Osorio et al., 2006](#); [Canté et al., 2010](#)) que determinados parámetros metalográficos a un nivel más básico de carácter microestructural, por ejemplo espaciado entre los brazos de las dendritas, también presentan una relación con las propiedades mecánicas del material y son más apropiados especialmente cuando la estructura de solidificación es predominante y no es posible una vinculación directa con las dimensiones de un grano, ya que la estructura ramificada de una dendrita es más compleja que la morfología poligonal de un grano. La existencia de estas relaciones hace posible considerar que haya un mecanismo de endurecimiento más básico que el simple tamaño de grano y que esté relacionado con estos parámetros microestructurales.

En sentido amplio, las estructuras dendríticas de aleaciones metálicas solidificadas sin tratamiento térmico posterior, pueden considerarse como materiales compuestos conformados por una fase ramificada (dendritas), embebida en otra fase matriz (interdendrítico) originada por el líquido fundido que solidifica en último momento (generalmente un eutéctico), de composiciones, morfologías y de propiedades mecánicas diferentes. En consecuencia, las propiedades mecánicas de la aleación considerada como un compuesto dependerán no sólo de las propiedades de cada componente sino también del arreglo geométrico en la microestructura obtenida.

Para estudiar la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas es posible realizar un análisis por elementos finitos ya que permite estimar la influencia sobre las

propiedades mecánicas de los materiales compuestos, de los parámetros microestructurales como la fracción de fases, el tamaño de grano, la morfología del grano, orientación y comportamiento de los materiales constituyentes (Alfonso, 2015).

En este trabajo se modeliza el comportamiento mecánico de una microestructura dendrítica equiaxial de una aleación binaria a través del método de los elementos finitos (MEF) que considera la morfología de las fases, la estructura ramificada de la fase dendrítica y un interdendrítico que actúa como matriz del compuesto, cada uno con sus correspondientes propiedades mecánicas y vinculados a través de una interfase que adhiere perfectamente a ambas. El modelo se utiliza para estudiar la influencia de las diferentes características del arreglo microestructural sobre el campo de tensiones y deformaciones que se obtiene al aplicar sollicitaciones mecánicas simples tales como un proceso de tracción y/o corte.

2 MODELO MICROESTRUCTURAL

2.1 Geometría dendrítica

Se considera una celda unitaria bidimensional que corresponde a una fase dendrítica equiaxial inmersa en una matriz rectangular. La dendrita está formada por cuatro ramas primarias en concordancia con la morfología encontrada en las microestructuras de aleaciones con arreglo cristalino cúbico. Estas fases están adheridas perfectamente despreciando los efectos de la resistencia en la interfaz, es decir, no se consideran efectos de contacto en la interacción mecánica entre ambas fases.

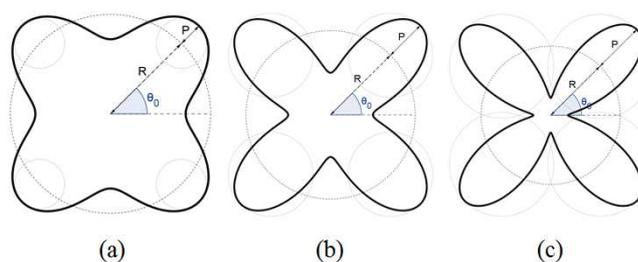


Figura 2: Diseño geométrico del borde dendrítico para distintas relaciones de aspecto P/R : (a) 0.25, (b) 0.5 y (c) 0.75.

Para modelar el límite de la fase dendrítica, se considera la siguiente curva polar:

$$\rho = R + P \cos[4(\theta + \theta_0)] \quad (1)$$

Donde R y P determinan la forma y el tamaño de las ramas, mientras que θ_0 indica la orientación de la dendrita. Con la curva se intenta reproducir la morfología de una dendrita y permite editar la geometría controlando la relación entre los parámetros: R , P y θ_0 para obtener similares tamaños, o valores específicos de la curvatura de las puntas, la orientación y posición relativa a la matriz, el área y el número de puntas. Una representación de la curva polar se muestra en la Figura 2 para distintas relaciones de aspecto P/R .

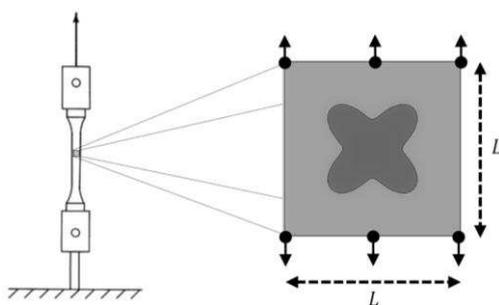


Figura 3: Geometría de la celda dendrítica en un ensayo de tracción simple.

Para la simulación se construyeron celdas (ver Figura 3) para analizar el efecto de los parámetros geométricos sobre los campos de tensión – deformación. Una morfología dendrítica correspondiente a un arreglo cristalino cúbico, presenta cuatro ramas que indican las direcciones preferenciales de crecimiento, en base a esto se construyeron diez celdas (ver Tabla 1).

Parámetros Geométricos		
Tamaño dendrita [mm]	R	0.25
Radio punta dendrita [mm]	P	0.08
Ángulo de orientación	θ_0	$0 - 45^\circ$
Longitud del lado de celda [mm]	L	1
Fracción volumétrica de fase dendrítica [%]	V_d	20.64

Tabla 1: Valores utilizados en la simulación para los parámetros geométricos.

2.2 Propiedades mecánicas

El problema está gobernado por las ecuaciones de la mecánica estructural considerando un estudio cuasiestático con comportamiento elastoplástico de los materiales.

Se supone que la segregación en una aleación dendrítica no produce una variación del módulo tensil en la microestructura pero si se produce una modificación de la dureza y, en consecuencia, de la tensión de fluencia. Por lo tanto, se configura la celda de manera que la fase matriz y la fase dendrítica posean iguales propiedades elásticas pero distintas tensiones de fluencia.

El comportamiento de los materiales asignados a las fases dendríticas y matriz se corresponden con materiales elastoplásticos isotrópicos perfectos, donde ambos poseen la misma rigidez pero distintas tensiones de fluencia. Para el régimen elástico se utiliza una ecuación constitutiva del tipo Hookeana para relacionar tensiones y deformaciones elásticas. El límite del régimen elástico se determina a partir del criterio de Von Mises considerando un proceso de deformación plástica sin endurecimiento.

Propiedades Físicas			
		Dendrita	Matriz
Módulo tensil [GPa]	E	1	1
Módulo de Poisson	μ	0.3	0.3
Densidad [kg/m^3]	ρ	1	1
Tensión de fluencia inicial [MPa]	σ_{ys}	$C^* \cdot 10$	10

Tabla 2: Valores de las propiedades físicas utilizadas en la simulación.

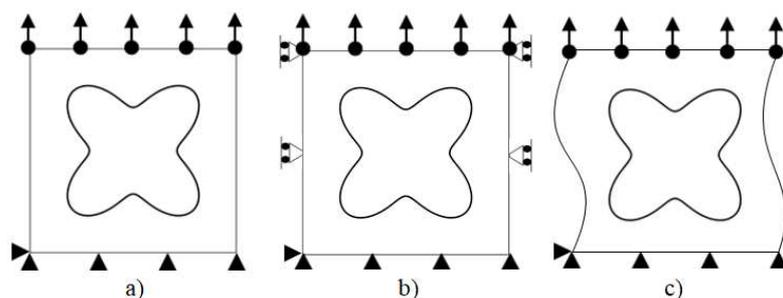


Figura 5: condiciones de contorno: (a) caso A: tracción vertical con bordes libres, (b) caso B: tracción vertical con bordes restringidos, y (c) caso C: tracción vertical con bordes periódicos.

Las condiciones de periodicidad en los bordes implican que $u_i(X_0) = u_i(X_1)$ para un desplazamiento u_i . De esta manera, es posible simular una microestructura periódica de celdas dendríticas y estudiar la respuesta del sistema a distintas sollicitaciones. Para este estudio se consideró el caso C (ver Figura 5) para estudiar cual es el efecto de las condiciones de borde periódicas sobre los campos de tensión y deformación.

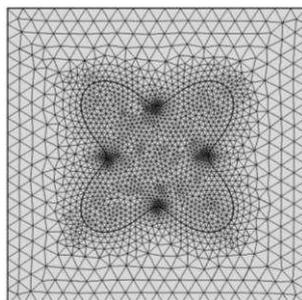


Figura 6: Discretización del dominio en un malla con elementos triangulares de segundo orden.

2.4 Mallado

Para todas las celdas se seleccionó una malla compuesta por elementos triangulares (ver Figura 6) con interpolación de segundo orden. La morfología dendrítica presenta zonas con curvaturas positivas y negativas en donde se aumenta el número de elementos. La convergencia de las simulaciones se logró con una malla donde la fase dendrítica se configuró el tamaño máximo de los elementos en 0.1 mm y un tamaño mínimo de 0.000075 mm; para la matriz el tamaño máximo de los elementos es de 0.02 mm y un tamaño mínimo de 0.0003 mm. Se obtuvieron aproximadamente 3700 elementos en el interior de la celda y 206 elementos de contorno.

Considerando que la celda dendrítica pertenece a una probeta macroscópica de espesor uniforme, es posible suponer que el espesor de la dendrita es mucho más pequeño que las demás dimensiones de manera tal que se consideran elementos finitos en tensión plana. Se configura el espesor en 10 μm , igual al 1% del tamaño de la celda.

2.5 Métodos de solución

El modelo se configura para un estudio estacionario realizando un análisis paramétrico sobre el desplazamiento impuesto a los nodos de la parte superior de la celda comenzando desde 0 hasta 0.02 mm (2% de deformación). Para la solución de los sistemas lineales asociados a la formulación en elementos finitos, se utilizó el método MUMPS (multifrontal massively parallel sparse direct solver) y para la solución no lineal se utiliza el método de

Newton con sub-relajación considerando una constante de relajación mínima de 10^{-4} .

Para analizar la influencia de la orientación de la fase dendrítica, se realizó un barrido paramétrico sobre el parámetro θ_0 . Debido a la simetría de la celda, el barrido se realiza comenzando en 0° y terminando en 45° considerando 10 valores intermedios de posibles orientaciones de la dendrita.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de la orientación de la dendrita

Se realizaron 10 simulaciones por cada condición de borde aplicada a la celda, para analizar el efecto de la orientación de la dendrita sobre el campo de desplazamiento obtenido a la deformación máxima. A partir de los desplazamientos se calcula la tensión equivalente de Von Mises y la deformación plástica equivalente para representarlos mediante un código de colores. Para todas las simulaciones se consideraron 20 estados estacionarios intermedios desde el estado inicial hasta la deformación máxima de la celda.

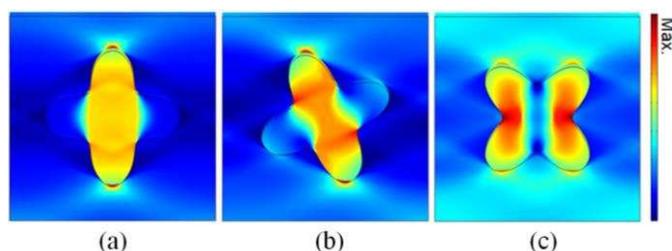


Figura 7: Tensión equivalente Von Mises cuando la celda alcanza una deformación $\varepsilon_y = 0.02$ con condición de contorno del caso B: (a) $\theta_0 = 0^\circ$, (b) $\theta_0 = 22.5^\circ$ y (c) $\theta_0 = 45^\circ$.

En los casos estudiados se encontró que al aumentar el ángulo de orientación de la fase dendrítica las tensiones mínimas y máximas disminuyen, como consecuencia de una distribución más homogénea de las ramas de la fase dendrítica en la matriz. Para el caso en que $\theta_0 = 0^\circ$ se generan fuertes gradientes de tensión soportados únicamente por las ramas verticales y con una distribución creciente desde el centro de la dendrita hacia las puntas (ver Figura 7). La fase matriz soporta las deformaciones de la fase dendrítica creando una singularidad en la punta y provocando una zona de acumulación de tensiones. A medida que se incrementa el ángulo de orientación θ_0 , la distribución de las tensiones en la matriz se vuelve más homogénea y se crean otras zonas de acumulación de tensiones, generándose gradientes de tensión en las cuatro ramas dendríticas, y se obtiene un campo de deformación caracterizado por dos zonas (ver Figura 8): la zona del centro de la celda con poca deformación plástica y la zona superior – inferior con mayor deformación plástica.

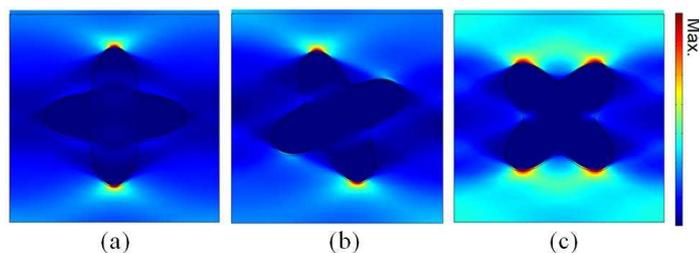


Figura 8: Deformación plástica equivalente cuando la celda alcanza una deformación $\varepsilon_y = 0.02$ con condición de contorno del caso B: (a) $\theta_0 = 0^\circ$, (b) $\theta_0 = 22.5^\circ$ y (c) $\theta_0 = 45^\circ$

Para el caso cuando el material de la fase matriz posee una tensión de fluencia mayor ($C^* = 0.9$, ver [Tabla 2](#)), la orientación de la dendrita determina campos de tensiones y deformaciones que son más heterogéneos en la matriz mientras la dendrita fluye plásticamente ya que alcanza primero el estado de plasticidad (ver [Figura 9](#)). Se obtienen zonas de concentración de tensiones en las puntas de las ramas de la dendrita que se encuentran a menor distancia de los bordes laterales, a diferencia del primer caso analizado. La distribución de tensiones es opuesta al primer caso de estudio ya que los gradientes se producen en la matriz mientras que al aumentar el ángulo de orientación de la fase dendrítica, las tensiones son distribuidas de manera uniforme en todas las ramas.

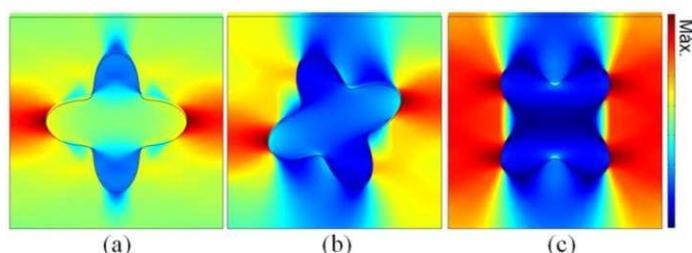


Figura 9: Tensión equivalente Von Mises cuando la celda alcanza una deformación $\varepsilon_y = 0.02$ con condición de contorno del caso B y matriz con mayor tensión de fluencia: (a) $\theta_0 = 0^\circ$, (b) $\theta_0 = 22.5^\circ$ y (c) $\theta_0 = 45^\circ$.

3.2 Efecto de las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno estudiadas no tienen un efecto cuantitativo apreciable respecto a las tensiones y deformaciones máximas alcanzadas en la celda sin embargo hay efectos cualitativos.

Para la celda con condición de contorno libre (caso A) los desplazamientos en el interior de la celda se observan dirigidos hacia adentro de la celda debido a los únicos grados de libertad restringidos son los del lado inferior, generando un estado de compresión en la dirección horizontal, ver la [Figura 10.a](#). Además, se registraron zonas con menor tensión que la mínima alcanzada en los demás casos obteniendo una reducción del orden del 10 %. En cambio, cuando se utiliza la condición de contorno restringido (caso B) los desplazamientos están dirigidos únicamente en la dirección de la carga, ver la [Figura 10.b](#).

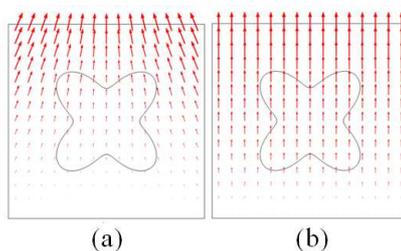


Figura 10: Desplazamientos obtenidos para las celdas con condiciones de contorno: (a) tracción vertical con bordes libres, (b) tracción vertical con bordes restringidos.

Utilizando las condiciones del caso B, se obtiene un campo de tensiones y deformaciones simétricos respecto a un eje horizontal que pasa por el centro de la celda para los casos en que las ramas dendríticas están orientados a 0° y a 45° , como se observa en la [Figura 7.a](#), [Figura 7.c](#), [Figura 8.a](#) y [Figura 8.c](#). Al observar la [Figura 11](#), la simetría se pierde cuando se liberan los bordes y se obtienen campos con mayor heterogeneidad en la matriz y más homogeneidad en las ramas dendríticas respecto a los campos que se observan en la [Figura 7](#). Esta distinción

es importante tenerla en cuenta si se pretende analizar un modelo más complejo aprovechando las simetrías que ofrece la geometría de la celda dendrítica.

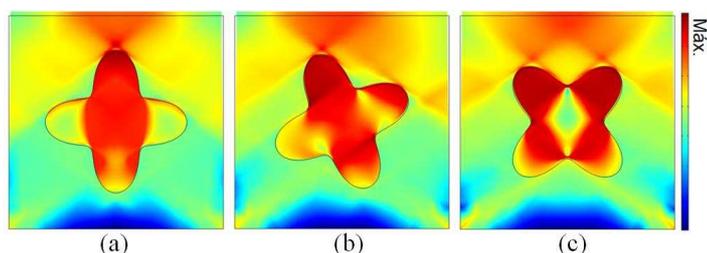


Figura 11: Tensión equivalente de Von Mises cuando la celda alcanza una deformación $\varepsilon_y = 0.02$ con condición de contorno del caso A: (a) $\theta_0 = 0^\circ$, (b) $\theta_0 = 22.5^\circ$ y (c) $\theta_0 = 45^\circ$.

La implementación de las condiciones de contorno periódicas (caso C) resulta en un campo de tensiones y deformaciones similares a los obtenidos con la condición de contorno del caso B. Las diferencias se observan en la distribución de los campos en fase matriz, como se puede apreciar en la Figura 12 donde se observan los campos de tensión y deformación para las distintas orientaciones de la dendrita.

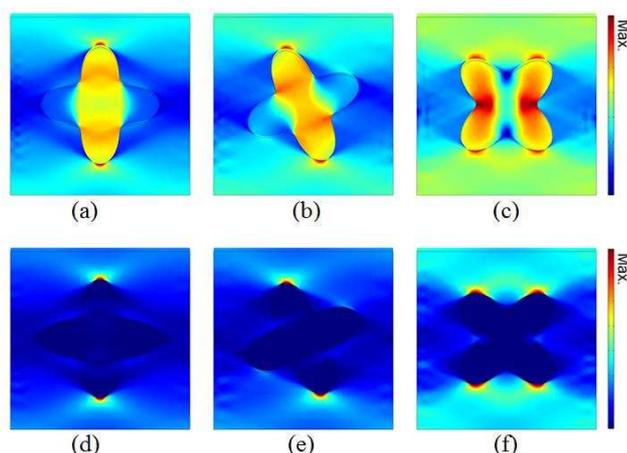


Figura 12: Campos de tensión y deformación equivalentes cuando la celda alcanza una deformación $\varepsilon_y = 0.02$ con condición de contorno del caso C: Tensión de Von Mises para (a) $\theta_0 = 0^\circ$, (b) $\theta_0 = 22.5^\circ$ y (c) $\theta_0 = 45^\circ$; Deformación plástica equivalente para (d) $\theta_0 = 0^\circ$, (e) $\theta_0 = 22.5^\circ$ y (f) $\theta_0 = 45^\circ$.

3.3 Análisis la curva tensión deformación de la celda

En el análisis de las tensiones que se pueden esperar en la celda, la regla de mezclas es una herramienta muy utilizada para predecir las tensiones que se puede llegar a alcanzar. A partir de las propiedades de materiales de cada fase y su proporción en la celda (ver Tabla 2), en la Figura 13 se muestra la curva de tensión – deformación considerando la regla de mezcla en isodeformación y se compara con la de los materiales puros modelados. El cálculo de las tensiones se obtiene sumando las fuerzas de reacción en el borde inferior de la celda dividido por el área de la sección transversal y la deformación se obtiene como el desplazamiento impuesto en el borde superior dividido la longitud de la celda. En la misma figura se incorpora la curva para la celda dendrítica con la orientación a 0° donde se puede observar que hay un buen ajuste entre dicha curva y la correspondiente a la regla de la mezcla.

Por otro lado, tomando los resultados de las simulaciones de la celda se construyeron las curvas tensión – deformación en toda la celda y en cada fase (dendrítica y matriz) utilizando

las ecuaciones (2) y (3) de la regla de mezcla modificada, las mismas se muestran en la [Figura 14](#), para los casos límites en cuanto a orientación de la dendrita: 0° y 45° ; y cuando la matriz es menos resistente que la dendrita, $C^* = 0.9$ (ver [Tabla 2](#)). Dichos gráficos evidencian la distribución heterogénea de los campos en ambas fases y se observa que la fase matriz fluye en mayor grado que la fase dendrítica como es de esperar dado que la matriz posee menor tensión de fluencia. Al aumentar el valor del ángulo de orientación θ_0 , las tensiones promedio disminuyen en un 1% aproximadamente dentro de la dendrita mientras que en la matriz no se registró una disminución apreciable. En cambio, las deformaciones en promedio disminuyen en 7% en la dendrita y menos del 1% en la matriz.

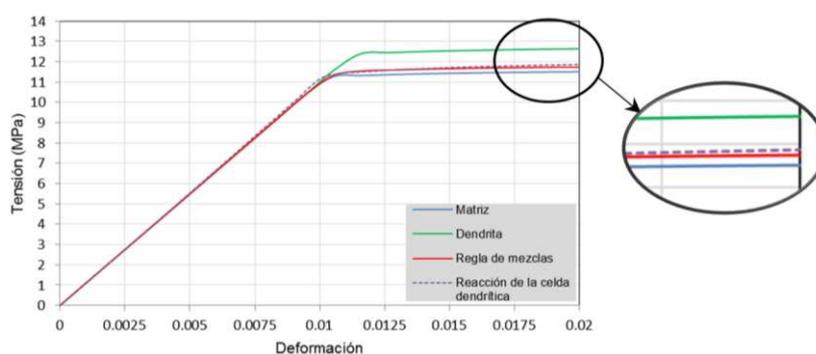


Figura 13: Curva tensión – deformación calculadas a partir de la reacción de la celda.

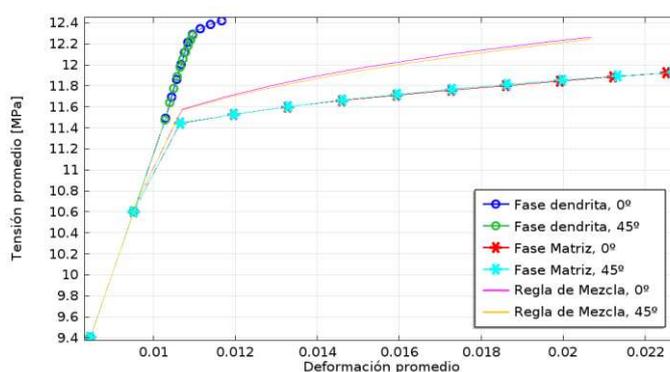


Figura 14: Curva tensión – deformación para la condición de contorno del caso B.

Al comparar la reacción de la celda dendrítica de la [Figura 13](#) con la regla de mezcla modificada de la [Figura 14](#) se observa que esta última sobrestima los valores de tensiones alcanzadas en la celda.

El análisis de las tensiones y deformaciones promedio en cada fase permite distinguir en el proceso de deformación tres etapas: (1) ambas fases deforman elásticamente; (2) la matriz comienza a deformarse plásticamente mientras que la dendrita aún permanece en régimen elástico; (3) ambas fases deforman plásticamente (ver [Figura 15](#)).

Para el caso donde el material de la fase matriz posee una tensión de fluencia mayor ($C^* = 0.9$, ver [Tabla 2](#)), se calculan las curvas tensión – deformación de la celda y las fases individuales, representadas en la [Figura 16](#), donde se observa que existe una disminución de la elongación conforme aumenta el ángulo de orientación de la dendrita. Se determina que la deformación promedio de la fase dendrítica disminuye en un 12% mientras que la fase matriz disminuye la deformación promedio en un 6% aproximadamente. Para las tensiones equivalentes no se registraron disminuciones apreciables al variar el ángulo de orientación de

la dendrita.

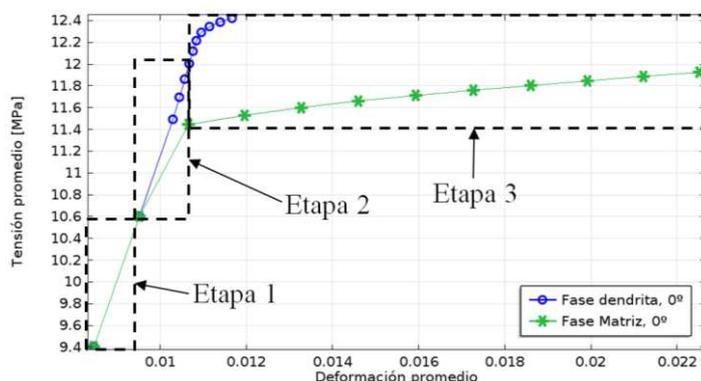


Figura 15: Curva tensión – deformación de la celda dendrítica (caso A) donde se observan las zonas donde se señalan las etapas del proceso de deformación.

En los dos casos analizados con $C^* = 0.9$ y $C^* = 1.1$ (ver Tabla 2) se observa que la fase dendrítica actúa como un refuerzo. Se observa un endurecimiento de la celda cuyo mecanismo puede ser explicado observando los campos de tensiones de Von Mises (ver Figura 7 y Figura 9) donde se observa que algunos puntos del material de la matriz están a mayor tensión que la tensión de fluencia pero están impedidos de desplazamiento debido a la discontinuidad de la fase dendrítica.

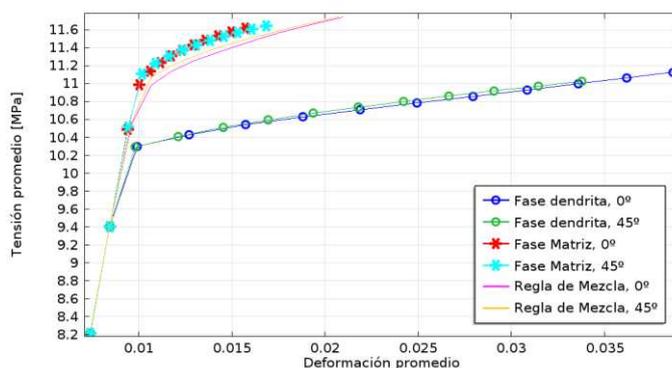


Figura 16: Curvas tensión – deformación para el caso donde la matriz es más resistente que la dendrita, ($C^* = 0.9$, ver Tabla 2).

4 CONCLUSION

Se desarrolló un modelo de elementos finitos utilizando una celda unitaria conteniendo una fase con morfología dendrítica para estudiar la deformación de una microestructura de solidificación dendrítica equiaxial.

Para el análisis de morfologías dendríticas se buscó, propuso e implementó el diseño de una geometría dendrítica equiaxial a través de una curva polar y de esta forma para controlar los parámetros geométricos como ser: número de brazos dendríticos, radios de curvatura (que pueden generar errores numéricos por generación de dominios muy estrechos), ancho de los brazos dendríticos, tamaño de la dendrita y la orientación de la misma respecto a la horizontal.

Los resultados de la modelización de la deformación de la fase dendrítica embebida en una matriz elastoplástica indican que a medida que las ramas se alinean a la dirección de la carga la fase dendrítica distribuye mayor deformación plástica provocando zonas de concentración

de tensiones en las puntas de las ramas alineadas. Esto provoca un efecto importante en la resistencia y la elongación de la dendrita. La respuesta mecánica estuvo condicionada a las condiciones de contorno de la celda indicando en algunos casos una pérdida de simetría y homogeneidad en los campos de tensiones y deformaciones.

La curva de tensión – deformación de la celda dendrítica es similar a la predicha por la regla de mezclas, en cambio la curva obtenida por la regla de mezcla modificada sobrestima los valores de las tensiones.

REFERENCIAS

- Hall, E. O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. Proceedings of the Physical Society. Section B, 64(9), 747, 1951.
- Petch, N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals. The Journal of the Iron and Steel Institute, 173(5), 25–28, 1953.
- Armstrong, R. W. Engineering science aspects of the Hall-Petch relation. Acta Mechanica, 225(4-5), 1013, 2014.
- Rodriguez, C. M., Ares, A. E., Rosenberger, M. R. Relación entre la microestructura y la microdureza de las aleaciones Al-Cu solidificadas direccionalmente. UNSAN, CNEA, Instituto de Tecnología “Prof. Jorge A. Sabato”, 2013.
- Quaresma, J. M., Santos, C. A., & Garcia, A. Correlation between unsteady-state solidification conditions, dendrite spacings, and mechanical properties of Al-Cu alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, 31(12), 3167-3178, 2000.
- Osório, W. R., & Garcia, A. Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn–Al alloys as a function of solidification conditions. Materials Science and Engineering: A, 325(1), 103-111, 2002.
- Osorio, W. R., Goulart, P. R., Garcia, A., Santos, G. A., & Neto, C. M. Effect of dendritic arm spacing on mechanical properties and corrosion resistance of Al 9 Wt Pct Si and Zn 27 Wt Pct Al alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, 37(8), 2525-2538, 2006.
- Canté, M. V., Spinelli, J. E., Cheung, N., & Garcia, A. The correlation between dendritic microstructure and mechanical properties of directionally solidified hypoeutectic Al-Ni alloys. Metals and Materials International, 16(1), 39-49, 2010.
- Ares, A.E.; Gassa, L.M.; Schvezov, C. E.; Rosenberger, M. R. Corrosion and Wear Resistance of Hypoeutectic Zn-Al Alloys as a Function of Structural Features. Materials Chemistry and Physics, 136, 394 – 414, 2012.
- Alfonso, I., Rodríguez-Iglesias, V., & Figueroa, I. A. Potencialidades computacionales del Método de los Elementos Finitos para la modelación y simulación de materiales compuestos: revisión. Matéria (Rio de Janeiro), 20(2), 293-303, 2015.
- Siegmund, T., Werner, E., & Fischer, F. D. Structure-property relations in duplex materials. Computational materials science, 1(3), 234-240, 1993.
- Rosenberger, M. R.; Forlerer, E.; Schvezov, C. E. Modeling the micro-indentation of metal matrix composites. Materials Science and Engineering A - Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 463, 275 – 283, 2007.
- Agalotis, E. M.; Schvezov, C. E.; Rosenberger, M. R.; Ares, A.E. A Numerical Model Study of the Effect of Interface Shape on Particle Pushing. Journal of Crystal Growth, 354, 49 – 56, 2012.
- Sharifi, H., & Larouche, D. Numerical Study of Variation of Mechanical Properties of a Binary Aluminum Alloy with Respect to Its Grain Shapes. Materials, 7(4), 3065-3083, 2014.
- Nygårds, M., & Gudmundson, P. Micromechanical modeling of ferritic/pearlitic steels. Materials Science and Engineering: A, 325(1), 435-443, 2002.