

Micromodeling of a dual-phase steel using an idealized micrograph generated by Voronoi diagrams (June 2021)

Micromodelamiento de un acero doble fase empleando una micrografía idealizada generada por diagramas de Voronoi

Y. Ruiz-Cuero  ; C. A. Bohorquez-Avila 
 DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24822>
 Artículo de investigación científica y tecnológica

Abstract— Dual phase (DP) steels are high strength steels used mainly in the production of vehicle bodies, currently about 74% of the structural components are made of this type of material. These DP steels are composed of a soft ferrite matrix with a hard, martensite phase. In this research, mechanical properties characteristic of these materials is linked, establishing dependence between volume fractions of each phase and simulations of the mechanical behavior in different situations are developed. Implementing a 2D bilinear plasticity model from the synergy of three design programs, regions of the martensitic phase of the material were generated in a 3D space. In the same way, these inclusions were parameterized and modeled together with a ferritic matrix. Then, using FEM to simulate 3D micromodeling (RVE), stress-strain diagrams are obtained. Finally, the results show deviations of 10% on average from the experimental values.

Index Terms— Microstructure, tessellations, modeling, idealized micrographs, heat treatments, intercritical temperatures.

Resumen— Los aceros doble fase (DP) son aceros de alta resistencia utilizados principalmente en la producción de carrocería para vehículos, actualmente alrededor del 74% de los componentes estructurales se fabrican en este tipo de material. Estos aceros DP están compuestos por una matriz de ferrita blanda, con una fase dura, martensita. En esta investigación se vinculan propiedades mecánicas características de estos materiales, estableciendo dependencia entre fracciones volumétricas de cada fase son desarrolladas simulaciones del comportamiento mecánico en diferentes situaciones. Implementando un modelo de plasticidad bilineal 2D a partir de la sinergia de tres programas de diseño, se generaron regiones de la fase martensítica del material en un espacio 3D. De la misma manera, estas inclusiones se parametrizaron y modelaron junto con una matriz ferrítica. Luego, utilizando FEM para simular el micromodelado 3D (RVE), se obtienen diagramas de tensión-

deformación. Finalmente, los resultados demuestran desviaciones del 10% en promedio de los valores experimentales.

Palabras claves— Microestructura, teselaciones, modelamiento, micrografías idealizadas, tratamientos térmicos, temperaturas intercríticas.

I. INTRODUCCION

Los aceros doble fase (DP) se emplean en la producción de carrocería para vehículos, actualmente cerca de un 74% de los componentes estructurales se fabrican en este tipo de material, debido principalmente a la buena combinación de propiedades. Los aceros DP están compuesto por una matriz blanda de ferrita y una fase dura generalmente martensita. Las propiedades mecánicas de estos aceros dependen de cada fase (fluencia, dureza etcétera) y de las fracciones volumétricas de las mismas dentro de la microestructura. Con el propósito de poder establecer las características de cada acero en particular se hace necesario modelar su comportamiento para verificar su respuesta ante diferentes situaciones.

En investigaciones que incorporan modelos de generación de estructuras granulares con teselaciones como método para estudiar condiciones particulares en aceros, se destaca el desarrollo de un modelo por elementos finitos elástico-plástico de la fatiga de contacto por rodadura de los aceros carburados, basado en pruebas de microindentación, con el fin de determinar factores influyentes en la generación de vacíos en el material como el tamaño y orientación de grano, la distribución de defectos iniciales e inclusiones del material en el crecimiento temprano de grietas [1].

La generación de una estructura que simule los resultados experimentales implementado métodos cuantitativos y computacionales para lograr una microestructura ideal para los aceros Advanced High Strength Steel (AHSS) y los High Strength Steel (HSS). Estos resultados se relacionan en variedad de estudios e investigaciones donde analizan

Este manuscrito fue enviado el 30 de junio de 2021 y aceptado el 05 de diciembre de 2022. Este trabajo fue apoyado por el grupo de investigación en Mecánica Computacional (SIMEC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Sede Tecnológica.

Yors. Ruiz-Cuero estudia en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia (email: yruizc@correo.udistrital.edu.co)
 Carlos A. Bohórquez-Ávila trabaja en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia (email: cahorqueza@udistrital.edu.co)



diferentes configuraciones de las fases presentes en muestras determinadas [2]. Con la implementación de un software que permite generar y definir fases en estructuras microgranulares en 2D y 3D en una interfaz la cual emplea teselaciones o diagramas de Voronoi para construir dichas estructuras. En este apartado, es posible entender a detalle uno de los conceptos principales presente en el modelamiento de microgeometrias, como lo es la unidad de medida cubica en objetos tridimensionales llamada vóxel; y como, en cada uno de estos modelos es posible distribuir de manera arbitraria una cantidad de puntos que generalmente se llaman semillas las cuales más adelante representaran los granos de una microestructura [3]. Aunque este tipo de investigaciones se limiten llanamente a la construcción de microestructuras y sus resultados sean bastante subjetivos al no incorporar propiedades cuantitativas presentes en cada fracción volumétrica, la existencia de estas define un proceso encaminado hacia la vinculación de métodos experimentales que permitan mejorar el diseño de diferentes componentes metálicos.

En la actualidad las tendencias investigativas presentan un auge exponencial por el modelamiento o simulación de componentes, con el fin de minimizar costos de prototipado y fabricación, al igual que diseñar la estructura de algún material para dictaminar mediante simulaciones, interpretaciones completas o parciales el desarrollo y el comportamiento de un acero [4]. Y es por esta razón que esta investigación se encamina hacia la optimización de microestructuras presentando como metodología la incorporación de software que permita establecer características presentes en un acero doble fase y generar fracciones volumétricas emparentadas a un modelo de plasticidad bilineal para definir mediante un estudio basado en pruebas metalográficas las características, condiciones y respuesta mecánica de este tipo de materiales.

II. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo basado en los resultados experimentales de investigaciones sobre el comportamiento mecánico de aceros doble fase obtenidos por tratamientos térmicos a temperaturas intercríticas. La importancia de relacionar esta investigación con datos teórico-experimentales de prácticas anteriores permiten medir con mayor precisión los resultados esperados de este tipo de estudios.

La generación de estructuras granulares se realizó implementado el método de diagramas de Voronoi, este consiste en construir geometrías basadas en puntos aleatorios en un plano cartesiano, estos luego se convertirían en regiones poliédricas determinadas por la disposición de cada mediatriz equidistante a cada punto [5].

Este tipo de método permite no solo construir estructuras granulares, sino también, es utilizado en el diagnóstico de tumores, evitar colisiones entre barcos y la navegación GPS [6][7]. Además de lo anterior, esta técnica destaca por encima del modelo del algoritmo de Bebabbou, el método constructivo de Katalin Bagi y el particionamiento de Laguerre, como uno de los más utilizados en la modelación de microestructuras debido a que no presenta limitaciones en la configuración del tamaño de las celdas generadas [8]. Con lo cual se puede establecer como parámetro o factor determinante de

interpretación, el tamaño de grano generado en cada geometría construida.

Empleando MATLAB® se estableció una serie de puntos cartesianos aleatorios en una matriz 2D que iniciarían la creación de una estructura granular poliédrica como la mostrada en la Fig. 1, esto permitiría no solo determinar la cantidad de regiones existentes en el plano, sino también, fijar la distancia y sección a visualizar en cada representación geométrica [9].

Los valores experimentales de tamaño de grano expresados en micras y tiempo de permanecía en el horno se muestran ordenados de forma ascendente en la Tabla I. Se seleccionaron como rango de tamaño de grano los 11 valores que corresponden a la última columna de la Tabla I, la cual presenta un valor mínimo de 28.3 μm y un valor máximo 52.3 μm , con una desviación estándar de 4.4 y una media en el tamaño de grano de 41.92 μm [10].

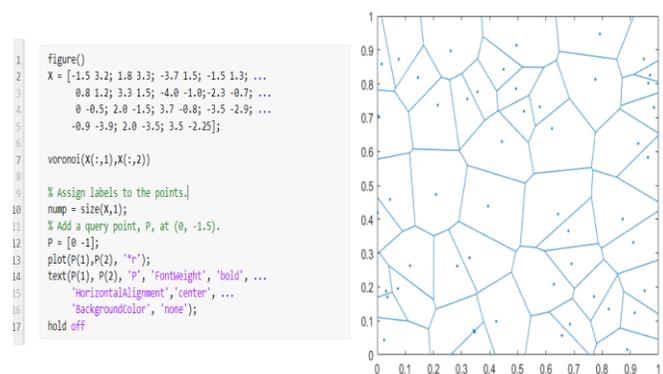


Fig. 1. Representación de geometría generada en MATLAB

Luego de obtener las representaciones granulares realizadas en MATLAB® fue necesario modificar el formato de cada estructura para así realizar un proceso de segmentación de elementos de línea como se muestra en la Fig. 2 y medición del tamaño grano con la ayuda de un programa de diseño computacional, los resultados se pueden ver en la Fig. 3, y de esta manera determinar si el tamaño de las celdas generadas está dentro del rango establecido.

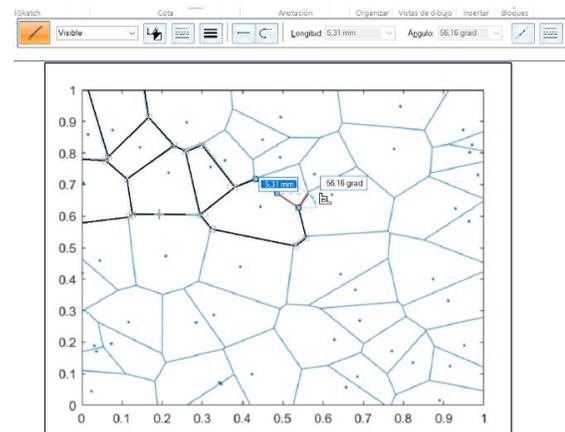


Fig. 2. Construcción por segmentos de línea de microestructura

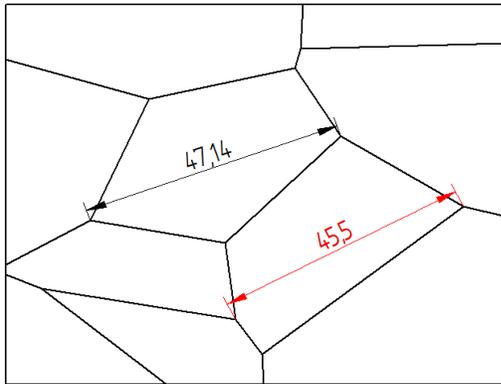


Fig. 3. Medición de microestructura con unidad de medida en μm

TABLA I
VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO POR PERMANECÍA EN HORNO A 770°C

	Tiempo de permanencia en [min]					
	0	60	120	180	240	300
Tamaño de grano en [μm]	12,3	13,78	20,78	21,64	23,84	28,3
	12,6	14,44	23,8	23,45	26,11	30,32
	13,2	14,86	24,32	26,6	31,8	35,09
	15,4	16,52	26,13	26,86	33,57	37,5
	15,7	17,15	27,78	27,43	35,78	39,52
	18,5	22,14	28,3	30,03	38,18	41,88
	20,1	22,38	28,71	30,44	38,54	44,02
	23,3	24,73	30,19	32,47	40,85	45,51
	23,9	25,35	31,22	34,33	43,36	46,36
	24,1	25,7	33,39	35,93	43,82	47,31
	24,3	26,74	34,6	39,6	44,18	52,3
	27,1	27,8	40,24	46,29	47,23	57

Obtenida la estructura con el formato adecuado y tamaños de región o tamaño de grano determinado por la Tabla I. La estructura se exporta a un programa de estudio por elementos finitos que permite identificar las propiedades de cada fase y evidenciar su comportamiento mecánico bajo determinadas situaciones.

En este primer ítem, se relacionan tanto las propiedades de cada microconstituyente como también el porcentaje de fase volumétrica presente en cada microestructura.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, los aceros doble fase como su nombre lo indica, están constituidos por dos fases llamadas: Martensita, obtenida al enfriar rápidamente los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas (727°C) y se caracteriza por tener una dureza de 50 a 68 RC con una resistencia a la tracción de 1667.13 a 2451.6 MPa, con un alargamiento del 0.5 al 2.5 % y la Ferrita, constituyente más blando del acero caracterizado por otorgar al material ductilidad [11]. Estos constituyentes siempre están presentes con un porcentaje de fase definido por la temperatura a la que se realiza el tratamiento térmico, por lo cual se hace necesario determinar

de manera acertada la cantidad volumétrica de cada fase. Para ello se tomaron como valores de cada fase los presentes en el análisis a una micrografía como se puede apreciar en la Fig. 4, esto nos permite identificar la cantidad de área por cada constituyente en la micrografía del área total de la estructura generada [12]. Luego de esto, se seleccionan regiones determinadas en la estructura llamada Voronoi 1 que representarían una de las fases ya antes mencionadas.

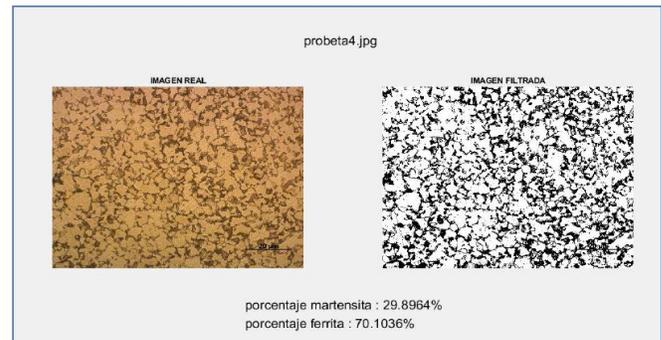


Fig. 4. Micrografía filtrada para determinar porcentaje de fases.

Para el caso particular la estructura Voronoi 1 presenta una configuración de 29.9% de fase martensítica (pequeñas islas con color negro) en una interfaz de ferrita del 70.1%, Fig. 5. Debido a que estos constituyentes poseen propiedades específicas, Tabla II, es indispensable establecer estos valores en una biblioteca de datos dentro del programa.

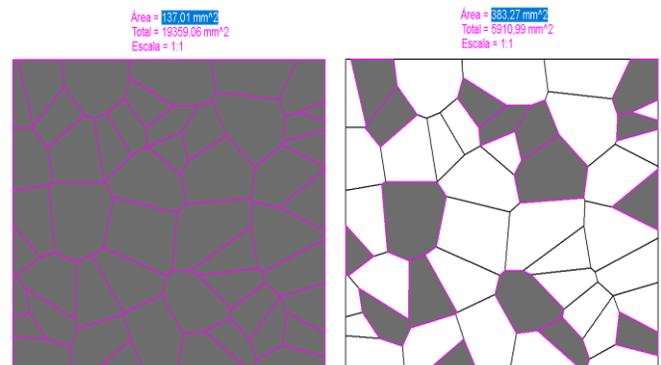


Fig. 5. Micrografía filtrada para determinar porcentaje de fases.

TABLA II
PROPIEDADES MECÁNICAS DE MICROCONSTITUYENTES

	Coefficiente de endurecimiento	Limite a la fluencia
Ferrita	0.001541	300 MPa
Martensita	0.02875	1500 MPa

Terminado el proceso de construcción de microestructuras y parametrización de las mismas, se plantea la elaboración de pruebas metalográficas a tres estructuras con ares diferentes: Voronoi 1 con área de 0.0442 mm², Voronoi 2 con área de 0.169 mm² y Voronoi 3 con un área de 0.0156 mm² cada una de estas con porcentajes de fase del 29.9% y 70.1%, 34.4% y 65.6%, 21.3% y 78.2% de fase martensítica y ferrítica respectivamente. La práctica realizada fue el modelamiento de esfuerzos micromecánicos basados en micrografías, implementando como

modelo a seguir un análisis por plasticidad al material, el cual tiene como finalidad determinar las propiedades mecánicas con el valor máximo cuantificado al estudiar la estructura en condiciones de deformaciones plásticas, sometiéndola a tensiones normales que incrementen hasta sobre pasar su rango elástico y predecir la capacidad que puede tener cada estructura artificial generada al deformarse sin romperse [13].

Como primera medida para realizar la practica en cada estructura, es necesario limitar el movimiento horizontal y vertical tomando dos lados de la micrografía idealizada a 90 grados uno con respecto a otro, luego se aplica para el costado vertical restricción en el eje x, y en sentido contrario para el costado horizontal, restricción o empotramiento en el eje y. Para este estudio en particular se tendrán limitaciones en el costado lateral izquierdo e inferior.

Debido a que la práctica es un estudio por plasticidad se requiere incorporar tensiones como se establece por definición, y de esta manera incrementar estas presiones hasta superar el límite a la fluencia del material. Para esta investigación se establecen presiones por líneas en el costado lateral derecho opuesto a las restricciones de movimiento ya antes mencionadas, de igual manera se incorpora una presión general, que se evaluara como presiones individuales al estar constituida por la selección de segmentos de línea en este extremo (Fig. 6).

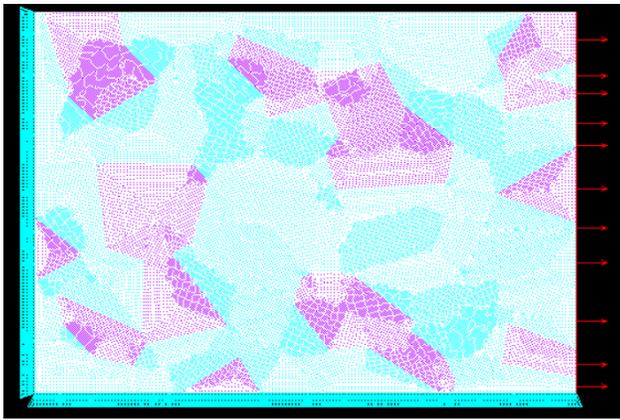


Fig. 6. Presiones por líneas y limitadores en ejes x y.

Posteriormente a esto, se determinó un tamaño de enmallado el cual se estableció como variable determinante en el análisis de los resultados arrojados por el sistema. Se estableció como tamaño mínimo de definición de unidad en la estructura el valor de 10 y a medida que avanzó el estudio fue posible evidenciar que el tamaño de definición máximo era de 0.2. Luego, se ejecuta la solución al sistema eliminando la condición de modificación o deformación local en la estructura, con el fin de que las deformaciones se presentaran dentro de esta y no en su geometría rectangular. Para finalizar este análisis con la representación de esfuerzos y deformaciones presentes en la microestructura artificial Fig. 7 y 8.

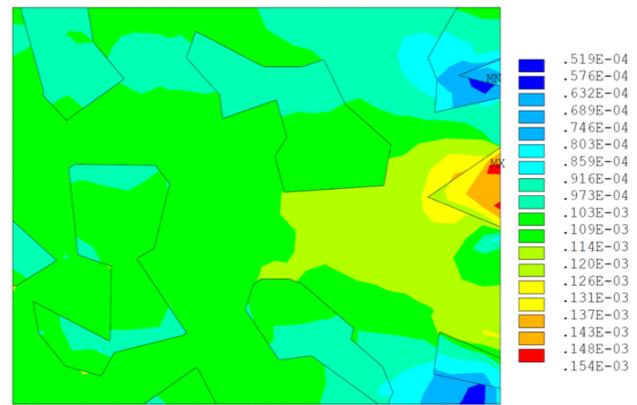


Fig. 7. Valores de esfuerzos en MPa para Voronoi 1.

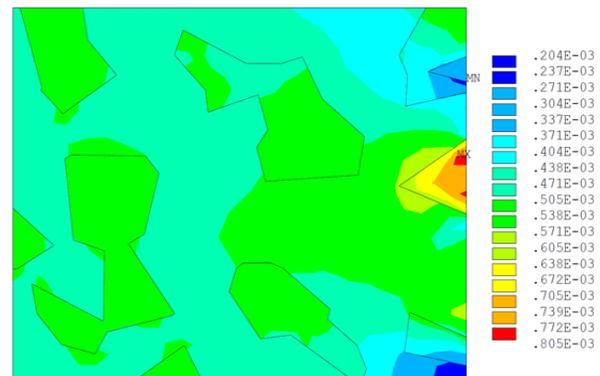


Fig. 8. Valores de deformación para Voronoi 1.

III. RESULTADOS

El producto de esta investigación relaciona variables presentes en una microestructura artificial como lo son: tamaño de región o grano, fracciones volumétricas de microconstituyentes y presiones ejercidas en pruebas de plasticidad. Obteniendo de esta manera 3 estructuras que se comportan como micrográficas reales, incorporado propiedades y valores característicos de estas.

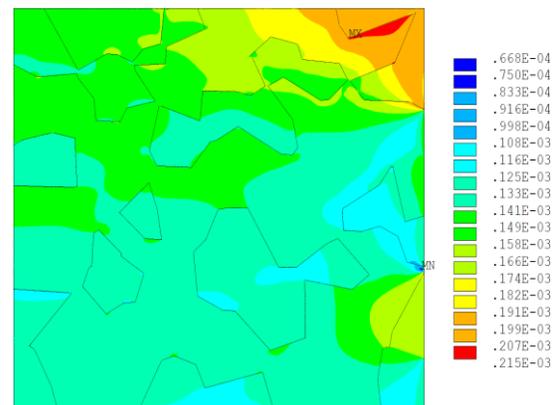


Fig. 9. Valores de esfuerzos en MPa para Voronoi 2.

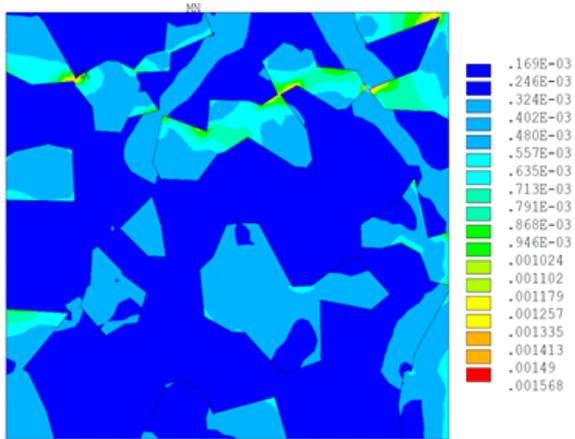


Fig. 10. Valores de deformación para Voronoi 2.

En las Fig. 9 y 10 podemos apreciar la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura llamada Voronoi 2 luego de ejecutar la prueba de plasticidad en el sistema, en estas ilustraciones queda en evidencia el comportamiento que experimenta la estructura de 0.169 mm² de área, con esfuerzos máximos a medida que la sección se acerca al extremo vertical donde fueron ubicadas las presiones, de igual modo, se aprecia en el listado de la parte derecha de la Fig. 9 los valores de esfuerzos y las regiones donde estos se presentan en un rango donde es posible afirmar que el material conserva su estado de elasticidad y no sean producido deformaciones permanentes en la estructura, por lo cual el análisis de distorsiones realizado debía interpretar deformaciones elásticas y no plásticas en la estructura. Obteniendo así, deformaciones máximas en el 82% de las aristas del material 1 establecido como martensita y el material 2 ferrita, lo que corresponde a posibles puntos de generación de grietas o vacíos en la estructura, estas deformaciones serían objeto de estudio a medida que avanza la investigación.

Evalutando los resultados en las primeras pruebas, el estudio determino que para obtener un desempeño total en las pruebas realizadas a las microestructuras era indispensable realizar un refinamiento de malla y determinar características, efectos o patrones que pudieran surgir en cada geometría y de igual manera hacer un seguimiento a estas, a medida que se variaba la unidad de definición y la presión ejercida en el extremo vertical derecho. Los valores de esfuerzo y deformación máxima fueron tabulados en conjunto de la cantidad de nodos y el tamaño de malla, con el objetivo de determinar los tiempos de rendimiento y la varianza de los datos obtenidos (Tabla III, Tabla IV, Tabla V, Tabla VI, Tabla VII y Tabla VIII).

TABLA III
: VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN VORONOI 1 CON PRESIÓN DE 0.0008 PA

Tamaño de malla	# Nodos	Valor esfuerzo [Mpa]	Porcentaje de deformación
10	814	200000	0,001088
9	1606	202000	0,001085
7	2398	204000	0,001082
5	4190	207000	0,001079
3	10385	209000	0,001075
2	22370	211000	0,001074
1,5	38507	212000	0,001073
1	83776	213000	0,001071
0,5	325229	213000	0,001071
0,2	476312	213000	0,001059

TABLA IV
: VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN VORONOI 1 CON PRESIÓN DE 0.002 PA

Tamaño de malla	# Nodos	Valor esfuerzo [Mpa]	Porcentaje de deformación
10	814	1309000	0,174620
9	1606	1433000	0,221631
7	2398	1568000	0,264816
5	4190	1656000	0,323304
3	10385	1815000	0,358838
2	22370	1951000	0,358740
1,5	38507	1977000	0,491181
1	83776	2128000	0,542068
0,5	325229	2655000	0,577122
0,2	476312	3182000	0,612176

TABLA V
: VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN VORONOI 2 CON PRESIÓN DE 0.0008 PA

Tamaño de malla	# Nodos	Valor esfuerzo [Mpa]	Porcentaje de deformación
10	593	153000	0,000806
9	660	154000	0,000806
7	705	154000	0,000805
5	1134	156000	0,000811
3	2713	155000	0,000806
2	5829	155000	0,000808
1,5	9612	158000	0,000823
1	21168	158000	0,000823
0,5	79991	160000	0,000836
0,2	486326	160000	0,000852

TABLA VI
: VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN VORONOI 2 CON PRESIÓN DE 0.002 PA

Tamaño de malla	# Nodos	Valor esfuerzo [Mpa]	Porcentaje de deformación
10	593	375000	0,001676
9	660	384000	0,001911
7	705	386000	0,002172
5	1134	398000	0,002298
3	2713	389000	0,002703
2	5829	409000	0,002820
1,5	9612	424000	0,002966
1	21168	449000	0,003365
0,5	79991	496000	0,004579
0,2	486326	528000	0,004852

TABLA VII
: VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN VORONOI 3 CON PRESIÓN DE 0.0008 PA

Tamaño de malla	# Nodos	Valor esfuerzo [Mpa]	Porcentaje de deformación
10	156	105000	0,020773
9	200	118000	0,023334
7	213	128000	0,026631
5	360	149000	0,027826
3	850	153000	0,030063
2	1828	158000	0,034420
1,5	3060	164000	0,038014
1	6785	168000	0,043742
0,5	26070	170000	0,054861
0,2	35014	170000	0,065980

TABLA VIII
: VALORES MÁXIMOS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN VORONOI 3 CON PRESIÓN DE 0.0008 PA

Tamaño de malla	# Nodos	Valor esfuerzo [Mpa]	Porcentaje de deformación
10	156	3774000	0,382595
9	200	4953000	0,425037
7	213	6076000	0,474228
5	360	7422000	0,503019
3	850	8434000	0,545916
2	1828	9559000	0,601402
1,5	3060	10986000	0,641169
1	6785	11885000	0,698813
0,5	26070	15579000	0,810616
0,2	35014	17410000	0,922419

IV. DISCUSIÓN

Uno de los momentos claves abordados por este proyecto fue identificar con qué porcentaje de fases se debía realizar el modelamiento de cada estructura, en primer lugar, lo que se buscaba era adoptar la geometría exacta de una micrografía de un acero doble fase. Al realizar las primeras pruebas de mapeado en el programa de diseño computacional, la estructura generada a escala mostraba gran simetría con respecto a la micrografía seleccionada, pero al exportar esta estructura generada por este proceso a el programa de elementos finitos para realizar las simulaciones de las pruebas, se producían errores en la selección de áreas o granos. Lo anterior se debe a limitaciones en el proceso de bocetado: al seleccionar alguna representación visual (imagen) esta debe tener una resolución bastante alta en el sentido que el sistema pueda identificar con precisión cada segmento de línea que debe construir. En este caso particular, la geometría construida se elaboraba con segmentos de líneas inexistentes o nodos conectores en el centro de algunas regiones, estas condiciones impedirían la ejecución de este método.

Basados en lo anterior, la propuesta alternativa fue determinar el porcentaje de cada constituyente y geometría de la microestructura implementado la herramienta de filtración de imagen en el programa MATLAB®, la cual es capaz de cuantificar la cantidad de área por componente que podría estar presente en cada micrografía Fig. 11 y 12 y de esta manera, luego seleccionar las regiones que constituirían una porción volumétrica de cada componente e identificar dentro de estas las propiedades características de estos en las microestructuras artificial.

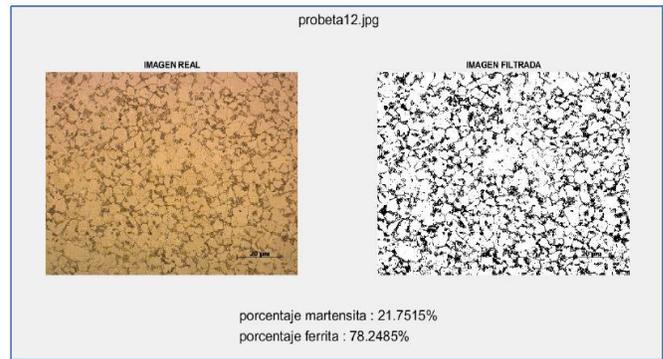


Fig. 11. Micrografía filtrada para determinar porcentaje de fases para Voronoi 2.

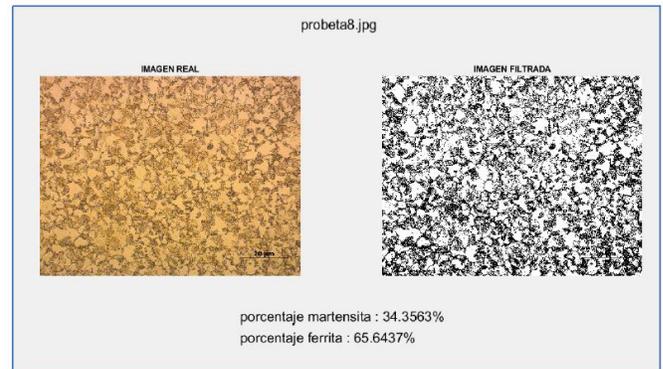


Fig. 12. Micrografía filtrada para determinar porcentaje de fases para Voronoi 3.

Graficando los datos obtenidos por la estructura Voronoi 3 Tabla VII y VIII, Fig. 13 y 14 fue posible determinar de manera visual el comportamiento de esta estructura en un diagrama de esfuerzo y deformación e identificar el porcentaje de desviación de los valores experimentales arrojados por la prueba de plasticidad y cotejarlos con los valores teóricos en la práctica de tensión realizada a probetas en laboratorios de mecánica.

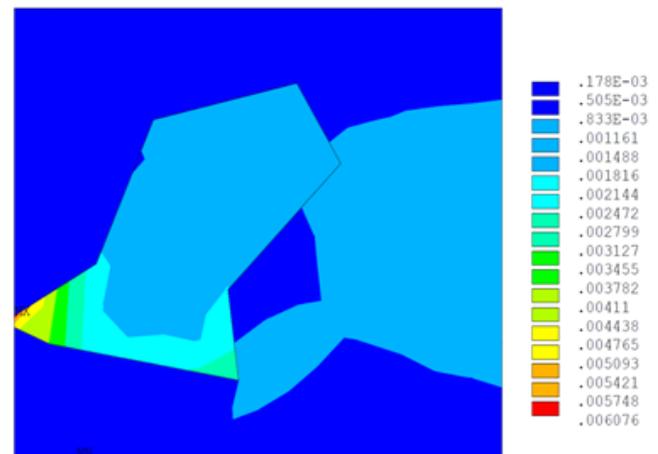


Fig. 13. Valores de esfuerzo para Voronoi 3.

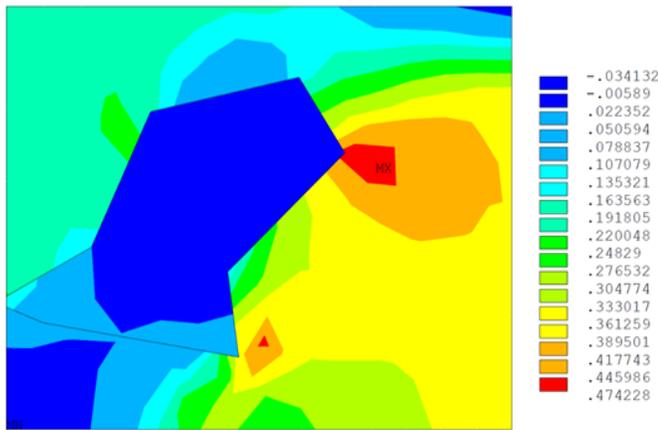


Fig. 14. Valores de deformación para Voronoi 3.

De esta manera se obtiene un diagrama de esfuerzo vs deformación ingenieril realizado a las probetas 7, 8 y 9 en paralelo con el diagrama esfuerzo vs deformación real para la microestructura 3 con características propias de un material bilineal isotrópico: con una primera recta creciente representativa de la zona elástica del material con deformaciones pequeñas a medida que sus valores de esfuerzo incrementan, y seguido de esta una curva con deformaciones que aumentan de manera exponencial en un reducido rango de esfuerzos, representando así la zona de deformaciones plásticas o permanentes en el material (Fig. 15). Estableciendo como porcentaje de desviación entre los valores de esfuerzo en cada practica del 2.5% y deformación con valores de dispersión media que no superan el 11.3%, concluyendo que las microestructuras generadas poseen gran afinidad con respecto del comportamiento que experimentan este tipo de aceros expuestos a una práctica de tensión axial.



Fig. 15. Diagramas esfuerzo vs deformación para modelos artificiales y

V. CONCLUSIONES

La investigación concluye con el modelamiento de tres microestructuras artificiales implementando el método de construcción geométrica de Voronoi para recrear la microestructura presente en una micrografía de un acero doble fase. Con la realización de este estudio se determinaron condiciones de análisis como fracciones volumétricas y parametrización de microconstituyentes, mecanismos de falla formados en la práctica de plasticidad realizada a cada estructura y como estas se comportan al evaluar sus valores de esfuerzos y deformaciones gráficamente.

Por otro lado, el estudio afirma que la generación de mecanismos de falla mencionados en el apartado introductorio de esta investigación, con la generación de vacíos en la interface de los materiales se presentan en las microestructuras artificiales, teniendo en cuenta que el 82% de las representaciones resultantes de los análisis de deformación en estructuras, denotaban distorsiones máximas en las aristas comunes de los componentes (Fig. 10 y 13). Indicando así, como el modelado de este tipo de estructuras basadas en la generación de geometrías por el método de Voronoi y la sinergia entre diferentes programas de cómputo pretende recrear mecánicamente el comportamiento en situaciones determinadas de un material o componente (Fig. 16).

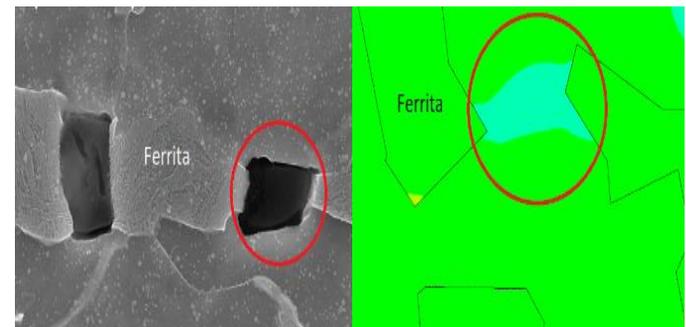


Fig. 16. Comparación comportamiento micrografía y microestructura idealizada generada por diagramas de Voronoi.

Algunos factores que pueden ser medio de estudio en investigaciones futuras son: la variación en el dimensionamiento de las estructuras generadas, en principio el proyecto se encamino en realizar estructuras con áreas diferentes, pero tomando cada geometría artificial creada con una medida de 10 mm de espesor como una constante en la investigación. Por lo cual podemos afirmar, que la modificación en el dimensionamiento se realizó de forma parcial y su a vez podríamos producir resultados diferentes al elaborar una modificación total a las estructuras.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la prueba de plasticidad se ejecutaron bajo un análisis bilineal, con el cual se obtuvieron representaciones visuales del comportamiento mecánico en cada estructura, diagramas de esfuerzo vs deformación y mecanismos de falla como la generación de vacíos en el material, datos y efectos que pueden ser cotejados al realizar este mismo estudio bajo un análisis multilíneal y determinar qué tan afín es el comportamiento de estas estructuras en ambas pruebas o que tanto varían una con

respecto a otra. Así como también, la producción de estructuras en tres dimensiones y el estudio de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y al semillero de investigación SIMEC de Mecánica Computacional que permitieron el uso de sus datos para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] A. Aditya, W. Farshid Sadeghi, "Rolling contact fatigue of case carburized steels ». International journal of fatigue, vol. 95, n° 1, pags. 264-281, Ene. 1995, DOI : 10.1016/j.ijfatigue.2016.11.003.
- [2] D. Shaeffler, G. Coates, M. Kimchi. "Advanced High-Strength Steels Apagslication Guidelines". WorldAutoSteel, vol. 3, n° 1, pags. 127-159, Oct. 2019, DOI : 10.31399/asm.tb.ahssta.9781627082792.
- [3] A. Martín, M. Tellaache, J. Gil-Sevillano, "Un generador aleatorio de microestructuras virtuales 3D". Revista de Metalurgia, vol. 34, n° 1, pags. 314-318, May. 1998, DOI: 10.3989/revmetalm.1998.v34.iExtra.761.
- [4] A. Giraldo Valencia, "El diseño y el modelamiento de materiales". Redalyc, vol. 75, n° 156, pags. 251-269, Nov. 2008.
- [5] E. Rodríguez Tello, "Diagrama de Voronoi" Tamaulipas, México, 2013.
- [6] M. Lotero Flores, "NET.LAB: ¿Algoritmo versus arquitectura? Diagrama de Voronoi como herramienta de diseño". Revista de arquitectura, vol. 13, n° 16, pags. 46-53, Ene. 2007, DOI: 10.5354/0719-5427.2013.28202.
- [7] U. Martínez Rodríguez, "Aplicación de la Geometría Computacional en la Reconstrucción 3D Basada en Diagramas de Voronoi" Puebla, México, 2015.
- [8] R. Valera, H. Díaz, G. Casañas, "Modelación geométrica de microestructuras granulares poliédricas". Scielo, vol. 10, n° 1, pags. 186-194, Oct. 2016.
- [9] MathWorks. Supagsort. (2003, Ene, 11). Diagrama de Voronoi. [Online]. Available : <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/voronoi.html>.
- [10] S. Vásquez Parra, "Modelamiento matemático del crecimiento de grano austenítico y verificación experimental de su influencia en la dureza de un acero 1020" Bogotá D.C. Colombia, 2018.
- [11] D. E. Castillo Gutiérrez, I. I. Angarita Moncaleano, R. Rodríguez Baracaldo, "Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánico". Scielo, vol. 26, n° 3, pags. 230-239, Sep 2017, DOI: 10.4067/S0718-33052018000300430.
- [12] D. G. Rodríguez Ariza, J. S. Álvarez Castillo, "Verificación del diagrama esfuerzo-deformación de un acero AISI 1020 templado a temperaturas intercritis usando la técnica RVE por elementos finitos" Bogotá D.C. Colombia, 2018.
- [13] J. Urbano Luna, "Propiedades de los metales". Revista digital para profesionales de la enseñanza, vol. 16, n° 1, pags. 170-185, Sep. 2011.
- [14] J. Pérez Patiño, "El hierro y el acero en la antigüedad", Tratamientos térmicos de los aceros. 1st ed. México, vol. 1, n o 2 , pags. 19-44, Mar 1996.
- [15] J. Madias, "Avances en la producción y aplicación de aceros bifásicos", ResearchGate, vol. 13, n° 16, pags. 46-54, Feb. 2013, DOI: 10.1016/j.msea.2009.01.056.
- [16] G. Theng, C. Ooi, S. Roy, S. Sundararajan, "Investigating the effect of retained austenite and residual stress on rolling contact fatigue of carburized steel with XFEM and experimental apagsroaches". Materials Science & Engineering, vol. 732, n° 1, pags. 311-319, Ago. 2018, DOI: 10.1016 / j.msea.2018.06.078



Yors Ruiz Cuero. Estudiante de pregrado en Ingeniería Mecánica. Recibió el título de Tecnólogo Mecánico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en 2021. Ponente en el décimo Congreso Internacional de Mecánica y Mecatrónica. Realizó su trabajo de grado en la línea de investigación de Materiales y procesos de manufactura titulado "Micromodelamiento de un acero doble fase empleando una micrografía idealizada generada por el método de Voronoi".

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3563-0646>



Carlos Arturo Bohórquez Ávila. Recibió el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá en 1993 con tesis titulada "Estudio de Soldabilidad de Acero AISI 1035 con Electrodo E-7018 y E-312-16", maestría en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá con la investigación titulada "Nitrocarburation Austenítica de los Aceros AISI 1020 y 8620 Mediante el Empleo de Alcoholes y Nitrurantes Líquidos" y doctorado en de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá en 2008. A partir del 2008 está vinculado al Semillero de investigación de mecánica computacional en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Hace parte de la categoría de Profesor Titular desde el 2008. Actualmente es coordinador del proyecto curricular, Tecnología en mecánica industrial / Ingeniería Mecánica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7479-9933>