



Análisis estadístico de la distribución de inclusiones no metálicas en un acero microaleado

Statistical analysis of the distribution of non-metallic inclusions in a micro-alloyed steel

Análise estatística da distribuição de inclusões não metálicas em um aço microligado

Carlos Oswaldo Serrano Aguiar ^I
carlos.serrano@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0653-1115>

Marcelo Esteban Calispa Aguiar ^{II}
marcelo.calispa@esepoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4085-8488>

Christian Giovanni Flores Arévalo ^{III}
christianflores@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0132-8326>

Edwin Rodolfo Pozo Safla ^{IV}
edwinpozo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

Correspondencia: carlos.serrano@esepoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de mayo de 2022 * **Aceptado:** 12 de junio de 2022 * **Publicado:** 29 de julio de 2022

- I. Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería Mecánica con Mención en Materiales y Procesos de Manufactura, Master Universitario en Ingeniería Matemática y Computación, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación & Vinculación AUTOPRO, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico, Master of Philosophy Mechanical and Systems Engineering, Máster Universitario en Ingeniería Matemática y Computación, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación & Vinculación AUTOPRO, Riobamba, Ecuador.
- III. Técnico de Laboratorio, Facultad de Mecánica ESPOCH; Ingeniero Mecánico, ESPOCH; Máster Universitario en Ingeniería Matemática y Computación, UNIR; Asistencia al I Congreso Internacional de Ingeniería, ESPOCH; Aprobación del Curso de programación Phyton, UNIR; Aprobación de curso en Educación continua en Liderazgo, Universidad de Marconi, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

Resumen

Los elementos de máquina, tal como las barras utilizadas en las direcciones de los vehículos, suelen sufrir serias deformaciones, uno de los motivos es el grado de suciedad del material utilizado en la fabricación de estos componentes. El objetivo de este trabajo de investigación es no solo determinar la severidad de las inclusiones dentro del material, sino también analizar la distribución de dichas inclusiones en diferentes regiones de un eje de 20 mm de diámetro, delimitando el análisis en tres regiones marcadas como Región 1, 2 y 3, que va desde el núcleo del eje hasta la superficie del mismo. La hipótesis inicial considera un mayor número de inclusiones en la parte central del eje, esto porque los lingotes (materia prima para laminación y obtención de las barras) tienen una velocidad de enfriamiento menor en el núcleo que en la superficie, dando lugar a la precipitación de impurezas a lugares de mayor vibración atómica. La preparación de la muestra se realizó de acuerdo a la Norma ASTM E3 y la cuantificación de las inclusiones se realizó de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM E45. El software utilizado para contabilizar partículas y para medición de las mismas fue IMAGEJ. El resultado fue la observación de óxidos globulares en el Laboratorio de Materiales de la ESPOCH, mediante el análisis de las fotomicrografías y técnicas estadísticas se ha determinado que efectivamente existe un aumento de más del 190% de impurezas en la parte central del eje, esto comparado con el número de óxidos globulares contabilizados en la superficie del eje.

Palabras Clave: Inclusiones no metálicas; acero microaleado; distribución de inclusiones; análisis estadístico.

Abstract

Machine elements, such as the bars used in the steering of vehicles, often suffer serious deformations, one of the reasons is the degree of dirtiness of the material used in the manufacture of these components. The objective of this research work is not only to determine the severity of the inclusions within the material, but also to analyze the distribution of said inclusions in different regions of a 20 mm diameter axis, delimiting the analysis in three regions marked as Region 1, 2 and 3, which goes from the core of the shaft to its surface. The initial hypothesis considers a greater number of inclusions in the central part of the axis, this is because the ingots (raw material for rolling and obtaining the bars) have a lower cooling rate in the core than on the surface, giving rise

to precipitation. of impurities to places of higher atomic vibration. The preparation of the sample was carried out according to the ASTM E3 Standard and the quantification of the inclusions was carried out according to the recommendations of the ASTM E45 standard. The software used to count particles and to measure them was IMAGEJ. The result was the observation of globular oxides in the Materials Laboratory of the ESPOCH, through the analysis of photomicrographs and statistical techniques it has been determined that there is indeed an increase of more than 190% of impurities in the central part of the axis, this compared with the number of globular oxides counted on the surface of the shaft.

Keywords: non-metallic inclusions; micro-alloyed steel; inclusion distribution; statistic analysis.

Resumo

Elementos de máquinas, como as barras utilizadas na direção de veículos, muitas vezes sofrem graves deformações, um dos motivos é o grau de sujidade do material utilizado na fabricação desses componentes. O objetivo deste trabalho de pesquisa é não só determinar a severidade das inclusões dentro do material, mas também analisar a distribuição dessas inclusões em diferentes regiões de um eixo de 20 mm de diâmetro, delimitando a análise em três regiões marcadas como Região 1 , 2 e 3, que vai do núcleo do eixo até sua superfície. A hipótese inicial considera um maior número de inclusões na parte central do eixo, isso porque os lingotes (matéria-prima para laminação e obtenção das barras) apresentam menor taxa de resfriamento no núcleo do que na superfície, dando origem à precipitação. de impurezas para locais de maior vibração atômica. A preparação da amostra foi realizada de acordo com a norma ASTM E3 e a quantificação das inclusões foi realizada de acordo com as recomendações da norma ASTM E45. O software utilizado para contar as partículas e medi-las foi o IMAGEJ. O resultado foi a observação de óxidos globulares no Laboratório de Materiais da ESPOCH, através da análise de fotomicrografias e técnicas estatísticas foi determinado que existe de fato um aumento de mais de 190% de impurezas na parte central do eixo, isto comparado com o número de óxidos globulares contados na superfície da haste.

Palavras-chave: inclusões não metálicas; aço microligado; distribuição de inclusão; análise estatística.

Introducción

Durante las últimas décadas muchos avances se han hecho referentes a la elaboración del acero, obteniendo cada vez aceros con menor nivel de impurezas. Recientemente, los fabricantes de aceros incluso comercializan aceros “ultras limpios” los cuales presentan propiedades mecánicas mejoradas en comparación a los aceros con mayor grado de impurezas. Usualmente estos aceros tienen niveles muy bajos de contenido de oxígeno y sulfuros lo cual permite que las aplicaciones de estos aceros se incrementen como componentes de transmisión para la industria automotriz [1], construcción de partes sometidas a ambientes corrosivos. Sin embargo, existen desventajas asociadas a estos aceros como mayor dificultad al ser maquinados, reduciendo la vida útil incluso de las herramientas de mecanizado [2].

Se ha demostrado también que estas impurezas o inclusiones y la rugosidad de la superficie son los sitios más susceptibles por donde podría iniciar una fisura debido a la fatiga del material. Algunos autores sugieren que la resistencia a la fatiga puede ser mejorada si se eliminan las imperfecciones en las superficies del material que aparecen en el proceso de producción [3]–[5]. Por otro lado, las inclusiones no metálicas que se forman en el proceso de fabricación también tienen una influencia significativa en las fallas del material debido a fatiga [6], [7]. Por esta razón es importante reducir la presencia de estas inclusiones o reducir al menos el tamaño de estas por debajo de valores críticos. Las inclusiones no metálicas se clasifican en micro y macro inclusiones según sus dimensiones. La mayoría de las inclusiones son submicroscópicas y su tamaño está dentro de un rango de 0,1 a 100 μm [8], [9].

Adicionalmente, la influencia de las inclusiones no metálicas en otras propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción ha sido investigada no solamente en aceros al carbono [10], sino también en aceros inoxidables, de forma experimental y simulación. Estos estudios relacionan una mayor concentración de esfuerzos durante la deformación plástica ante la presencia de inclusiones de mayor tamaño [8].

Por lo tanto, es importante contar con un método que permita evaluar la presencia de estas inclusiones, en tipo y tamaño. Existen muchos modelos matemáticos que tratan de predecir los efectos de las inclusiones no metálicas sobre el límite de fatiga, con sus limitaciones, los cuales tratan de incluir la existencia de pequeñas grietas que no se propagan y la naturaleza estadística del comportamiento de pequeñas grietas y microestructuras [11]–[13].

Por otro lado, para determinar el grado de severidad de la presencia de inclusiones se utiliza la norma ASTM E45, la cual permite evaluar el tamaño de estas inclusiones la cual se detallará dentro

de la sección de metodología de este artículo. Esta norma cubre una serie de procedimientos reconocidos para determinar el contenido de inclusiones no metálicas del acero forjado. Además, se detallan métodos microscópicos y macroscópico para el análisis de las inclusiones, en los métodos microscópicos las inclusiones se asignan a una categoría basada en similitudes en la morfología y no necesariamente en su identidad química. Si bien los métodos están destinados principalmente a calificar inclusiones, los constituyentes como carburos, nitruros, carbo-nitruros, boruros y fases inter metálicas pueden clasificarse utilizando algunos de los métodos microscópicos. La norma también establece que se puede aplicar estos procedimientos en ciertas aleaciones que no se consideran aceros [14].

En este artículo, se evaluará mediante la norma ASTM E45 en un acero microaleado, determinar su grado de severidad en base a las inclusiones no metálicas encontradas y relacionarlas a posible reducción de propiedades mecánicas de dicho acero.

Metodología experimental

Para el desarrollo de la presente investigación se hizo uso del laboratorio de materiales de la FACULTAD DE MECÁNICA DE LA ESPOCH.

MATERIALES Y EQUIPOS

El material utilizado es un acero extraído de una rotula de la dirección de una camioneta Ford Ranger 2013 (Figura 1). La composición química fue determinada mediante un análisis de Espectrometría de emisión por chispa en el equipo BRUKER Q2 ION según la norma ASTM E415, esto a fin de predecir su resistencia a la tracción según la ecuación:

$$Su = 29 + 65(\%C)$$

El corte inicial de la muestra se realizó tal como se indica en la Figura 2. a fin de tener un espécimen homogéneo y sólido.

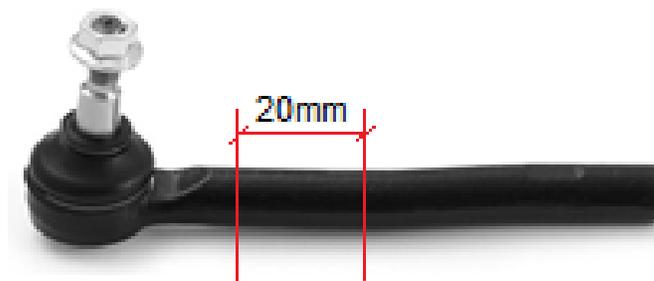
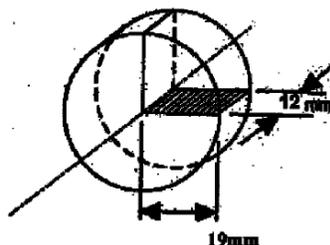


Figura 1. rotula de la dirección

El corte se realizó mediante refrigeración. La Norma ASTM E45 especifica el corte que se debe realizar para caracterizar las inclusiones, según la Figura 2. Dejando medidas de 10 x 16 mm de análisis a fin de cumplir con la normativa del análisis de mínimo 160 mm² de acuerdo a la Figura 2.



NOTE 1—Inch-pound equivalents: 12 mm = 0.47 in.; 19 mm = 0.75 in.
FIG. 3 Specimen from 1½-in. (38.1 mm) Round Section for Microscopic Test

Figura 2. Corte de la muestra

Fuente: ASTM E45

El desbaste de la superficie a analizar se realizó de acuerdo a las recomendaciones de la Norma ASTM E3, con lijas que va desde los 180 a las 2000 partículas por pulgada cuadrada, montadas en lijadoras manuales, a fin de obtener una superficie tipo espejo. El pulido se realizó con alúmina de 1um de tamaño y la limpieza con alcohol para evitar confusión entre impurezas e inclusiones.

El análisis de inclusiones se debe realizar sin ataque químico, en un microscopio metalográfico, el equipo utilizado fue de marca NIKON ECLIPSE E200 con capacidad de aumentos de 100X, 400X Y 1000X respectivamente con los lentes objetivos de 10X, 40X Y 100X.

Métodos

Las fotomicrografías se deben extraer a 100X, la escala se ha determinado con la base de la pantalla de la PC utilizando una regla micrométrica, este valor es de 732um.

El análisis de las inclusiones se realizó en 3 regiones distinto (Figura 3), extrayendo una gran cantidad de fotomicrografías y separando las 5 más densas de inclusiones para su análisis numérico.

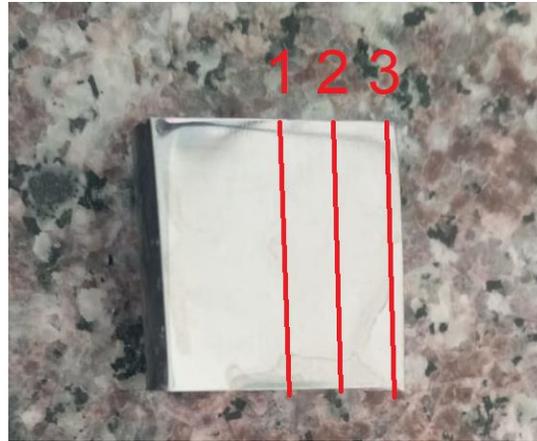


Figura 3. Regiones de análisis

Fuente: PROPIA

Las inclusiones de acuerdo a la norma ASTM E45 pueden ser:

TIPO A: sulfuros y están separadas de las inclusiones tipo B, C y D debido a su escala de grises;

TIPO B: son cadenas discontinuas, esto quiere decir que existen 3 o más inclusiones alargadas en el plano de laminación. Estas inclusiones tienen desfase menor a 15 micras y una separación menor a 40 micras. (óxidos y aluminatos).

TIPO C. Estas inclusiones son cadenas sólidas, esto quiere decir que es una inclusión alargada en el sentido de laminación. (Silicatos)

TIPO D. Son conocidos como óxidos globulares, esto no son alargados y tampoco forman cadenas, están dispersos a lo largo de las muestras.

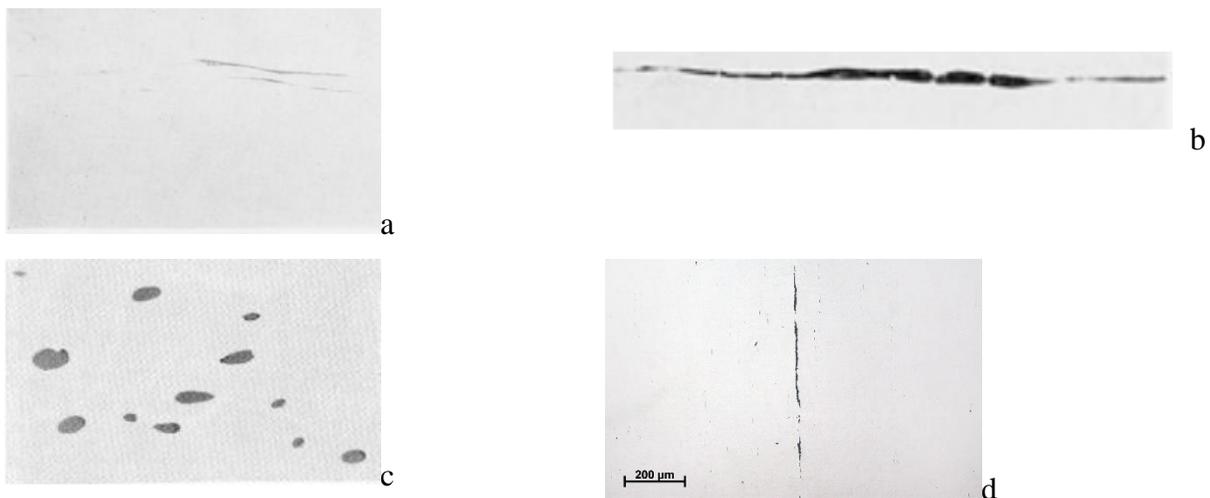


Figura 4. a) TIPO A, b) TIPO B, c) TIPO C, d) TIPO D

Fuente: ASTM E45

Como el objetivo es determinar la distribución de las inclusiones en las tres regiones, hay que enfocarse en las más comunes encontradas en este acero (TIPO D).

El análisis comienza con la escala de las fotomicrografías en el programa IMAGE J, para luego analizar el número de partículas a fin de determinar el grado de severidad de acuerdo a la Tabla 1. dada en la Norma ASTM E45. El número de inclusiones se obtendrá como promedio en cada región.

Tabla 1. Grado de severidad

**TABLE 1 Minimum Values for Severity Level Numbers
(Methods A, D, and E)^{A,B}**

(mm (in.) at 100×, or count)

Severity	A	B	C	D ^C
0.5	3.7(0.15)	1.7(0.07)	1.8(0.07)	1
1.0	12.7(0.50)	7.7(0.30)	7.6(0.30)	4
1.5	26.1(1.03)	18.4(0.72)	17.6(0.69)	9
2.0	43.6(1.72)	34.3(1.35)	32.0(1.26)	16
2.5	64.9(2.56)	55.5(2.19)	51.0(2.01)	25
3.0	89.8(3.54)	82.2(3.24)	74.6(2.94)	36
3.5	118.1(4.65)	114.7(4.52)	102.9(4.05)	49
4.0	149.8(5.90)	153.0(6.02)	135.9(5.35)	64
4.5	189.8(7.47)	197.3(7.77)	173.7(6.84)	81
5.0	223.0(8.78)	247.6(9.75)	216.3(8.52)	100

(µm (in.) at 1×, or count)

Severity	A	B	C	D ^C
0.5	37.0(.002)	17.2(.0007)	17.8(.0007)	1
1.0	127.0(.005)	76.8(.003)	75.6(.003)	4
1.5	261.0(.010)	184.2(.007)	176.0(.007)	9
2.0	436.1(.017)	342.7(.014)	320.5(.013)	16
2.5	649.0(.026)	554.7(.022)	510.3(.020)	25
3.0	898.0(.035)	822.2(.032)	746.1(.029)	36
3.5	1181.0(.047)	1147.0(.045)	1029.0(.041)	49
4.0	1498.0(.059)	1530.0(.060)	1359.0(.054)	64
4.5	1898.0(.075)	1973.0(.078)	1737.0(.068)	81
5.0	2230.0(.088)	2476.0(.098)	2163.0(.085)	100

(mm/mm²(in./in.²), or count/mm²)

Fuente: ASTM E45

La serie de las inclusiones se determina mediante el diámetro promedio de las inclusiones y comparando con la Tabla 2.

Tabla 2. Grado de severidad

Tipo de inclusión	Serie delgada		Serie Gruesa	
	Ancho, min, Micras	Ancho, max, Micras	Ancho, min, Micras	Ancho, max, Micras
A	2	4	>4	12
B	2	9	>9	15
C	2	5	>5	12
D	2	8	>8	13

Tabla II. Parámetros ANCHO Y DIAMETRO de inclusiones (Métodos A y D)^A

Fuente: ASTM E45

Resultados

La detección de la composición del material es un parámetro importante, ya que indicara si es un acero al carbono simple o aleado, según el análisis de espectrometría de emisión atómica, se ha detectado que es un acero microaleado debido a la presencia de cromo, con el principal elemento aleante carbono que le dará la resistencia y dureza a la barra, pequeñas cantidades de silicio, manganeso y aluminio. La composición del acero está dada por la Tabla 3.

Tabla 3. Grado de severidad

ELEM.	C	Si	Mn	Cr	P	S	Al	Fe
%	0,3	0,1	0,4	0,15	<0,003	<0,003	0,1	98,76

Fuente: PROPIA

En base a dicha composición se puede estimar la resistencia a la tracción, según la ecuación:

$$Su = 48,5 \text{ Kg/mm}^2 = 68964 \text{ psi}$$

Este valor indica que tiene una resistencia a la tracción mayor a la de un acero estructural ($S_u = 60000 \text{ psi}$), debido a la presencia de Cr, Mn y Al. Cabe mencionar que la predicción se ha realizado solo en base al porcentaje de carbono, minimizando de cierta manera al valor real.

El tipo de inclusiones observadas en las fotomicrografías son del tipo D, que se traducen en óxidos globulares. Para esquematizar se pone un ejemplo en la Figura 5.

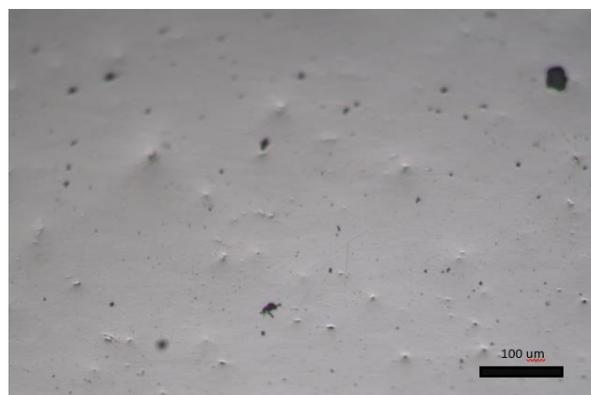


Figura 5. Óxidos globulares

Fuente: ASTM E45

Con el antecedente expuesto se hace un análisis de distribución de los óxidos globulares en las tres regiones establecidas en el marco metodológico. Se establece tomar un promedio del número de

inclusiones en cada región, para con ese valor determinar la severidad según la Tabla 1. El número de inclusiones se determina mediante el programa Image J, con la herramienta analizador de partículas.

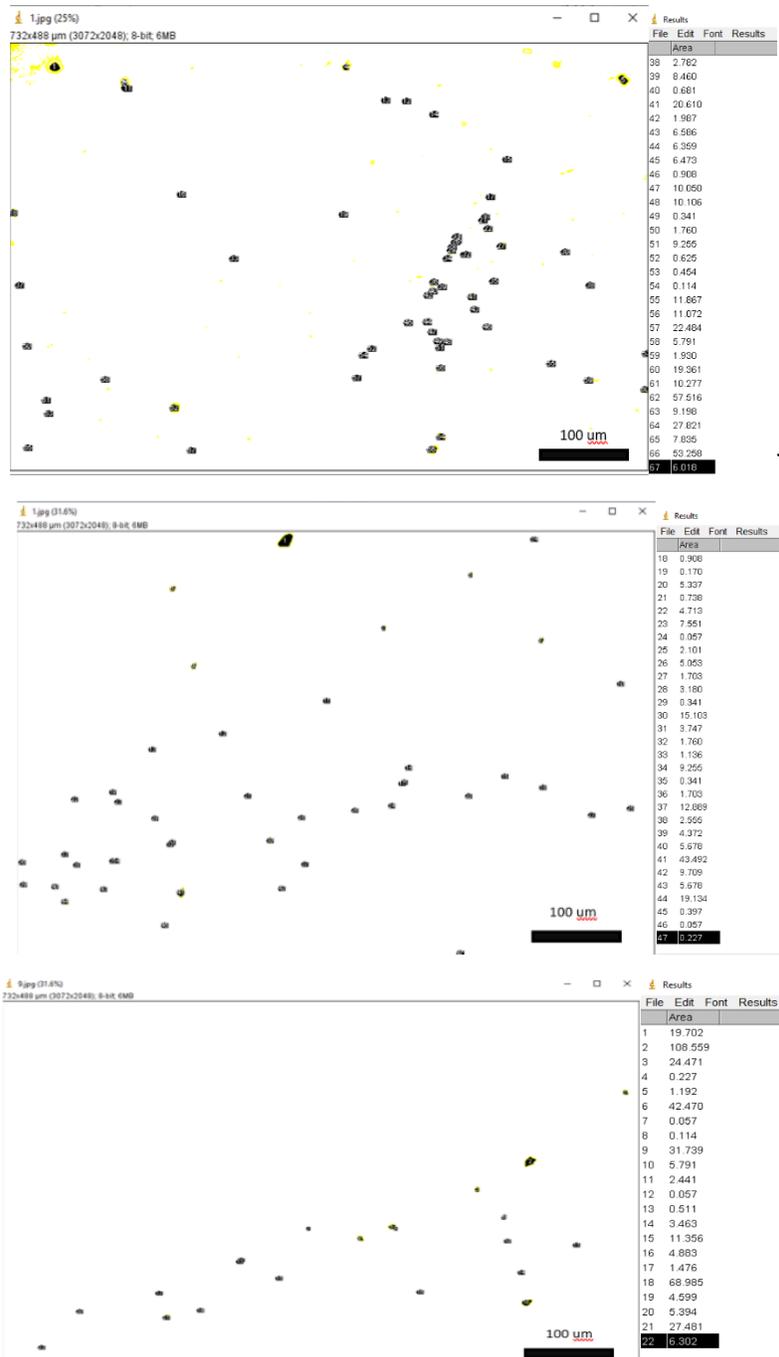


Figura 6. Contabilización de óxidos en la región 1, 2 y 3 respectivamente.

Fuente: PROPIA

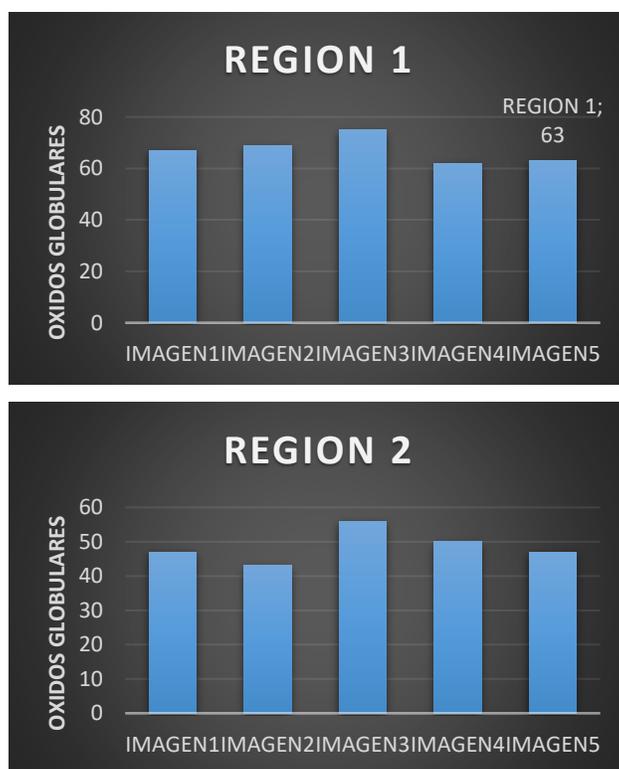
Las imágenes antes mostradas, es un ejemplo de cómo se obtuvo el número de inclusiones en cada región. los resultados exactos y con promedio se evidencian en la Tabla 4.

Tabla 4. Numero de óxidos globulares

Nro. OXID.	REGION1	REGION2	REGION3
IMAGEN1	67	47	22
IMAGEN2	69	43	25
IMAGEN3	75	56	26
IMAGEN4	62	50	26
IMAGEN5	63	47	28
PROMEDIO	67,2	48,6	25,4

Fuente: PROPIA

La distribución de las inclusiones en las tres regiones se puede evidenciar en la Figura 7.



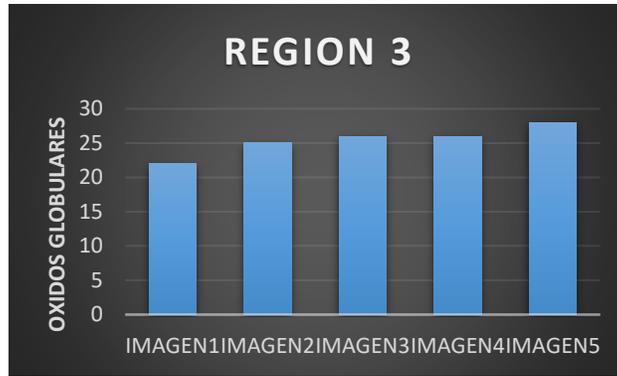


Figura 7. Numero de óxidos en la región 1, 2 y 3 respectivamente.

Fuente: PROPIA

La cantidad máxima de óxidos globulares se encuentra en el centro de la probeta, esto debido a la menor velocidad de enfriamiento en la obtención de los lingotes (materia prima para la laminación en caliente) y por ende mayor vibración de átomos, pudiendo precipitar las inclusiones no metálicas tal como los óxidos a ese lugar. A medida que se llega a la superficie del eje (Región 3), el número de óxidos globulares se reduce, desde 67,2 en el centro (Región 1) a 48,6 entre el centro y la superficie del eje (Región 2) y a 25,4 en la superficie del eje (Región 3).

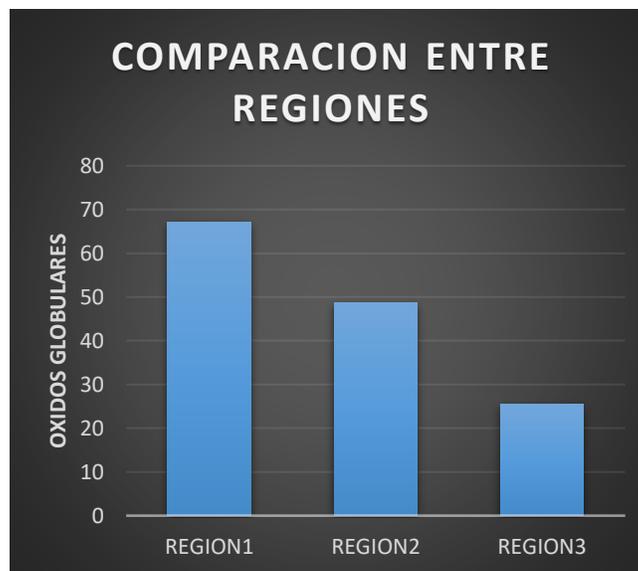


Figura 8. Promedio de óxidos en la región 1, 2 y 3 respectivamente.

Fuente: ASTM E45

Según la Figura 8, se determina que en el centro del eje hay un incremento del 265% de óxidos globulares, y con respecto a la región 2 hay un incremento del 191%.

El grado de severidad medido según la Norma ASTM E45 en la región 1 es de 4, en la región 2 es de 3,5 y en la región 3 es de 2,5. Si bien es cierto la norma menciona que se debe obtener un promedio de todo el barrido de 160 mm², aquí se ha obtenido por separado en tres regiones a fin de determinar de forma estadística la distribución de los óxidos dentro de una misma muestra.

La serie se determina con el promedio del diámetro de los óxidos globulares, existe una diferencia de dimensión en las 3 regiones. Se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Promedio de diámetros de óxidos

	REGION1	REGION2	REGION3
IMAGEN1	12,54	9,87	7,4
IMAGEN2	12,56	9,53	6,8
IMAGEN3	11,98	8,73	6,6
IMAGEN4	11,84	8,81	7,25
IMAGEN5	12,13	9,04	7,16
PROMEDIO	12,21	9,196	7,042

Fuente: PROPIA





Figura 9. Diámetros promedios de óxidos en la región 1, 2 y 3 respectivamente.

Fuente: PROPIA

En la figura 9. Se puede evidenciar que en la región 1 y 2 se tiene una serie gruesa, con un promedio de diámetro de 12,21 µm y 9,196 µm respectivamente, mientras que en la región 3 el diámetro promedio de los óxidos es de 7,042 µm, dando una serie delgada.

Conclusiones

Se ha extraído la muestra de acuerdo a la Norma ASTM E45 y se ha inspeccionado en 160 mm² con la identificación de tres regiones y la separación de las 5 fotomicrografías de las áreas con mayor densidad de inclusiones.

Afortunadamente en el análisis de las fotomicrografías se ha identificado de un solo tipo, los óxidos globulares, que se ha determinado el grado de severidad según el número de inclusiones y la serie de acuerdo al promedio del diámetro de las inclusiones del tipo D.

Se ha identificado, además, que en la región 1 y 2, a más de tener una severidad mayor (Mas número de óxidos globulares) son de mayores diámetros, debido a la precipitación por las bajas velocidades de enfriamiento.

Referencias

- I. Dugic, R. Berndt, S. Josefsson, and M. Hedström, “Non-metallic Inclusion and Their Effect on Fatigue Strength for Case-Hardened Carbon Steel in Gears,” in TMS 2018 147th Annual Meeting {&} Exhibition Supplemental Proceedings, 2018, pp. 123–133.
1. H. Thoors, H. Chandrasekaran, and P. Ölund, “Study of some active wear mechanisms in a titanium-based cermet when machining steels,” *Wear*, vol. 162–164, pp. 1–11, 1993, doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90478-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90478-5).
2. Y. Gao, X. Li, Q. Yang, and M. Yao, “Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel,” *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 2, pp. 466–469, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.04.089>.
3. H. Itoga, K. Tokaji, M. Nakajima, and H.-N. Ko, “Effect of surface roughness on step-wise S–N characteristics in high strength steel,” *Int. J. Fatigue*, vol. 25, no. 5, pp. 379–385, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(02\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00166-4).
4. H. K. Akyildiz and H. Livatyali, “Effects of machining parameters on fatigue behavior of machined threaded test specimens,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 2, pp. 1015–1022, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.039>.
5. Z. G. Yang et al., “On the critical inclusion size of high strength steels under ultra-high cycle fatigue,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 427, no. 1, pp. 167–174, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.068>.
6. [7] Z. G. Yang et al., “The effect of inclusions on the fatigue behavior of fine-grained high strength 42CrMoVNb steel,” *Int. J. Fatigue*, vol. 26, no. 9, pp. 959–966, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.01.009>.
7. P. Ahmadian and M. Taghizadeh, “The effect of non-metallic inclusion size and orientation on tensile properties of stainless steel (simulation and experiment),” *Metall. Mater. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 43–55, 2020.
8. C. Shi, X. Chen, Y. Luo, and H. Guo, “Theory Analysis of Steel Cleanliness Control During Electroslag Remelting,” in *Materials Processing Fundamentals*, L. Zhang, A. Allanore, C. Wang, J. A. Yurko, and J. Crapps, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 31–38. doi: 10.1007/978-3-319-48197-5_3.
9. M. Jamil et al., “Internal Cracks and Non-Metallic Inclusions as Root Causes of Casting Failure in Sugar Mill Roller Shafts,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 15, 2019, doi: 10.3390/ma12152474.

10. Y. Murakami and M. Endo, “Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength,” *Int. J. Fatigue*, vol. 16, no. 3, pp. 163–182, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0142-1123(94)90001-9).
11. J. Nafar Dastgerdi, O. Jaberri, and H. Remes, “Influence of internal and surface defects on the fatigue performance of additively manufactured stainless steel 316L,” *Int. J. Fatigue*, vol. 163, p. 107025, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107025>.
12. B.-W. Xu, S. Ye, M. Li, H.-P. Zhao, and X.-Q. Feng, “Deep learning method for predicting the strengths of microcracked brittle materials,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 271, p. 108600, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108600>.
13. R. F. Allen, “Standard test methods for determining the inclusion content of steel (E45),” *Annu. B. ASTM Stand. Met. Testing; Elev. Low Temp. Tests; Metallogr.*, 1999.
14. Pozo-Safla, E. R., Aquino-Arroba, S. M., & Ordoñez-Viñan, M. A. (2021). Análisis estadístico para validar la simulación por elemento finito en el diseño a deformación de una viga en voladizo. *Polo del Conocimiento*, 6(6), 586-611.

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).