

JIFI2018
JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
ENCUENTRO ACADÉMICO INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA UCV

ESTUDIO DE DAÑO ACUMULADO POR FATIGA EN EL ACERO INOXIDABLE NITRONIC, ENTALLADO

E. A. Ochoa-Pérez^{1*}, Jesús A. Pérez S.¹

¹ *Laboratorio de Ensayos Mecánicos, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.*

[*engelsallende@gmail.com](mailto:engelsallende@gmail.com)

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad realizar el estudio de daño acumulado por fatiga en el acero inoxidable nitronic, ya que dicho material fue propuesto en trabajos anteriores^[1] como material de reemplazo para las mallas desgerminadoras de maíz de empresas Polar, las cuales presentaban fatiga durante su funcionamiento. Los ensayos aplicados fueron: un estudio metalográfico, ensayo de dureza y ensayo de fatiga axial, para la determinación de vida y de daño acumulado en dos bloques. Además se realizó la verificación de algunas teorías en la literatura sobre daño acumulado. Los resultados obtenidos permitieron determinar que el material presenta una matriz austenítica con granos equiaxiales y la posible presencia de nitruros, además en la sección transversal se observaron líneas de fluencia a todo lo largo de la microestructura la cual es una condición característica cuando el material es laminado en frío. Los valores de dureza reportados para la sección longitudinal fue de 288 HK y en la sección transversal 580 HK, luego al realizar el ensayo de fatiga axial con una relación de carga $R=0,1$ y a una frecuencia de 60 Hz a distintos esfuerzos se obtuvo la curva de vida del material y la ecuación de Basquin $S = 4454,6*(N_f)^{-0,078}$. Los ensayos de daño acumulado también se realizaron a diversos esfuerzos y fracciones distintas de vida consumida, se ensayaron 3 probeta de modo ascendente y 3 de modo descendentes. Los resultados se compararon con tres teorías, la teoría de daño lineal de Palmgren-Miner, la teoría no lineal de Marco-Starkey y Teoría de daño de doble línea Manson-Freche-Ensing, los resultados obtenidos mostraron que, la teoría de Palmgren-Miner predice una sobreestimación en los ensayos descendentes y una subestimación en los ascendentes. Mientras que las otras dos teorías las representaciones graficas fueron acorde con la teoría, sin embargo la cantidad de muestras ensayadas no permitieron determinar si efectivamente dichas teorías predicen de manera correcta el comportamiento de daño acumulado por fatiga.

Palabras Clave: Fatiga Axial, Daño Acumulado, Acero Nitronic.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the accumulated damage due to fatigue in nitronic stainless steel, since this material was proposed in previous works^[1] as a replacement material for the corn degermator meshes of Polar companies, which presented fatigue during its operation. The tests were applied: a metallographic study, hardness test and axial fatigue test, for the determination of life and accumulated damage in two blocks. In addition, some theories were verified in the literature on accumulated damage. The results obtained allowed us to determine that the material presents an austenitic matrix with equiaxed grains and the possible presence of nitrides, besides in

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Tel.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

the cross section, creep lines were observed throughout the microstructure which is a characteristic condition when the material is laminated in cold. The hardness values reported for the longitudinal section was 288 HK and in the cross section 580 HK, after performing the axial fatigue test with a load ratio $R = 0,1$ and a frequency of 60 Hz at different stresses the material life curve and the Basquin equation $S = 4454,6 * (N^f)^{-0,078}$. Accumulated damage tests were also carried out at different efforts and different fractions of consumed life, 3 test pieces were tested in ascending mode and 3 in descending mode. The results were compared with three theory, the linear damage theory of Palmgren-Miner, the Marco-Starkey's nonlinear theory and Manson-Freche-Ensing double-line damage theory, the results obtained showed that, the Palmgren-Miner theory predicts an overestimation in the descending trials and an underestimation in the ascenders. While the other two theories graphical representations was consistent with the theory, however the number of samples tested did not allow to determine if indeed these theories correctly predict the behavior of accumulated damage by fatigue.

Keywords: Axial Fatigue, Accumulated Damage, Nitronic Steel.

INTRODUCCIÓN

El acero inoxidable austenítico nitronic es una aleación a base de hierro que contienen cromo, manganeso y además es reforzado con nitrógeno permitiendo que tengan casi el doble del límite elástico respecto a los aceros de la serie 300, se ha estudiado durante años, sobre todo sus propiedades mecánicas. Sin embargo, existen pocos estudios donde se evalúa el daño acumulado en estos materiales. Desde la introducción del concepto de acumulación de daños por Palmgren y la 'regla de daño lineal' de Miner, el tratamiento del daño acumulado por fatiga ha recibido cada vez más atención. Como resultado, se han desarrollado muchos modelos de daños acumulado, sin tener éxito definitivo del alguno que pueda predecir el comportamiento exacto de los materiales. Dicho trabajo surge está inspirado en las recomendaciones realizadas por Ruiz A.^[1] que evaluó las propiedades mecánicas del acero nitronic y otros aceros con la finalidad de sustituir el material con que estaba conformada las mallas desmerginadora SAKATE, determinando que el material adecuado era el acero nitronic, considerando las condiciones de fatiga a las cuales están sometidas estas mallas. Por lo que el objetivo del siguiente trabajo es; evaluar el efecto del daño acumulado por fatiga en muestras planas de acero inoxidable nitronic con una sección reducida tipo entalla como concentrador de esfuerzo, aplicando un modo de carga $R = 0,1$. Utilizando niveles de esfuerzo que permitan realizar el estudio en la etapa de alto ciclaje y verificar la capacidad de algunos modelos existentes en la literatura para predecir la vida remanente del material una vez que este haya sido sometido a daño acumulado previo por fatiga.

METODOLOGÍA

La metodología experimental fue realizada de acuerdo al esquema representado en la figura 1. Iniciando con el mecanizado de las muestras y su mordaza para la sujeción en el equipo de fatiga. Luego se realizó la caracterización microestructural por microscopía óptica y mecánica a través de dureza Knoop, seguida a los ensayos de fatiga se realizó un análisis de la superficie fractura para realizar el análisis y discusión de resultados.

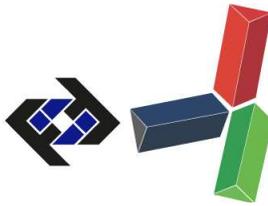


Figura 1. Flujograma del procedimiento experimental

Fabricación de Probetas y Sistema de Sujeción; del material en estudio se obtuvieron 24 probetas de 20 mm de ancho x 43,175 mm de largo y 2 mm de espesor. Las probetas se mecanizaron con 2 orificios de 9,525 mm de diámetro en el eje simétrico vertical a una distancia de 10 mm respecto a los extremos superior e inferior de la probeta y en la parte central a los extremos se mecanizo unos concentradores de esfuerzos tipo circular de 9,525 mm, generando así un cuello de 4 mm. Posteriormente se generó una entalla tipo circular en la superficie del cuello con una profundidad de 0,5 mm. Las mordazas fueron construidas a partir de una barra de un acero 4340 y maquinadas de acuerdo al sistema de sujeción de la máquina fabricada por FATIGUE DYNAMICS modelo DS 2000.

Estudio Metalográfico; La norma ASTM E-3^[2] fue requerida para para la preparación metalográfica del material. Se cortaron 3 secciones transversales y 3 secciones longitudinales de 3 probetas. Dichas secciones se embutieron aplicando una resina termoendurecible (polvo transóptico) con la finalidad de mejorar la sujeción de la muestra y así poder realizar un desbaste adecuado sobre cada superficie, se utilizó papel abrasivo de carburo de silicio con granulometrías de malla 80, 120, 240, 360, 500, 600, 1200 y 1500 respectivamente, para posteriormente obtener un acabado especular en la superficie y para ello se hizo el pulido con los paños de lona blanco, fieltro verde y rojo con alúmina de 1, 0,3 y 0,05 micras, respectivamente. Posteriormente se realizó el ataque químico electrolítico con ácido oxálico al 3 % usando un voltaje de 6 v y el tiempo de exposición de la probeta fue de 40 seg, para revelar la microestructura presente, luego se visualizó en un microscopio óptico para obtener las fotomicrografía.

Ensayos de Dureza; Se utilizó la norma ASTM E 384^[3] para el estudio de dureza en las diferentes direcciones y zonas del material (longitudinal y transversal) a través del ensayo Knoop, para este ensayo se usó una carga de 300 gr por 30 seg, generando una huella la cual se medirá su diagonal mayor. Para este ensayo se realizaran 5 indentaciones a cada muestra y se determinara el promedio de la longitud de la diagonal mayor, para luego a través de la ecuación 3.1, determinar la dureza del material.

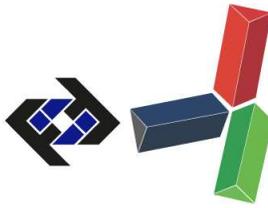
$$HK = 14229 * (P/l^2) \quad (1)$$

HK: Dureza Knoop.

P: Carga usada [gr]

L: Longitud de la diagonal mayor [μm]

Se realizara una conversión de dureza Knoop a Vickers a través de la norma ASTM E 140^[4].



Ensayos de Fatiga Axial; Los ensayos de fatiga fueron realizados en condición axial pura con una frecuencia de 60 Hz y una relación de carga de $R = 0,1$, dichos ensayo se realizaron a diversos esfuerzos, se ensayaron 18 probetas para obtener una data que permitiera elaborar la curva Wöhler del material, para ello se utilizó la máquina de fatiga axial fabricada por Fatigue Dynamics modelo DS-2000.

Estudio Fractográfico; Para dicho estudio se observaron la superficie de fractura de todas las probetas ensayadas con el objetivo de obtener información del crecimiento de grieta. Para ello, se requirió del uso de un microscopio digital portátil modelo 1410204587 el cual presenta una resolución de 200x0003 MP. El equipo fue fabricado por AmScope. Dicho microscopio tiene acoplado una luz estereoscópica para permitir una mejor visualización y además la misma está conectada a un ordenador para capturar las imágenes y diferenciar características inherentes de las superficies de fractura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio Metalográfico; Las fotomicrografías de la microestructura obtenida en la sección transversal y longitudinal (superficial) se muestran en la figura 2, para una muestra representativa del material en estudio. En la sección longitudinal superficial se puede apreciar una matriz austenítica con una estructura de grano equiaxial con diversos tamaños de grano, como también la presencia de maclas. La sección transversal presenta bandas de deformación las cuales al comparar con varios estudios realizados de deformación en frío en aceros inoxidable [5 y 6], las fotomicrografía son similares por los que dichas bandas son generadas por la deformación plástica generando un endurecimiento por deformación en el material.

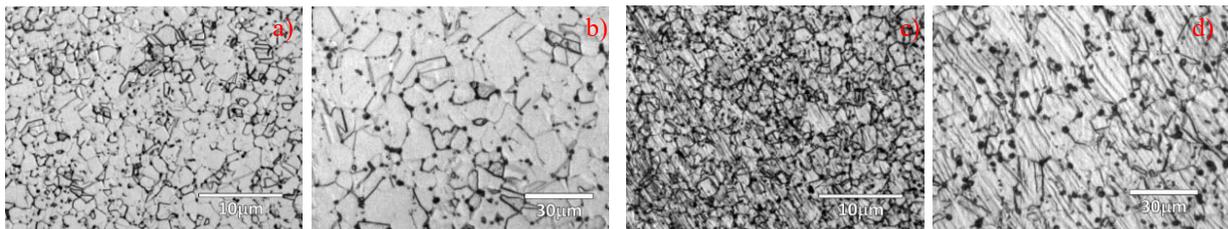


Figura 2 Microestructura del acero inoxidable nitronic. Sección longitudinal superior: a) a 100X y b) a 500X. Sección transversal: c) a 100X y d) a 500X.

Ensayo de Dureza; Los valores de la diagonal mayor generados por cada indentación fueron utilizados de acuerdo a la ecuación 1 para así obtener los valores de dureza, 5 indentaciones por cada muestra, para 5 valores de dureza diferentes y promediados con su respectiva desviación estándar se reportan en la tabla 1. La dureza Knoop de la sección Transversal tuvo una desviación estándar mucho mayor que la longitudinal por lo que la dureza en dicha sección es menos homogénea, esto puede ser consecuencia de que existan zonas las cuales presenta mayor cantidad de dislocaciones y además los deslizamientos generados en la red por la deformación que producen maclas y son más propensas a producirse cuando son altas las tasas de deformación característico de los aceros inoxidables austeníticos según estudios [7]. Los valores de dureza Knoop obtenidos son elevados por lo que el material se considera duro, y esta alta dureza se debe en primera instancia a la estructura cristalina ya que los granos son equiaxiales y de tamaño pequeño por lo que los

límites de granos están cercanos unos a otros generando un aumento a la resistencia para el desplazamiento de las dislocaciones, otro factor es la presencia de partículas cuales son apreciable en las fig.2 las cuales al ser comparadas con otros trabajos [8, 9 y 10] estas partículas son característica de la microestructura pero en ninguna de las investigaciones se la naturaleza de las mismas.

Tabla 1. Valores promedio de la Dureza Knoop en cada sección de las muestras.

N° de Muestra	Dureza Knoop (HK) promedio en sección		Dureza Vickers (HV)	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1	345 ± 54	771 ± 232	334	739
2	330 ± 31	543 ± 120	320	516
3	225 ± 16	591 ± 110	213	559

Ensayo de Fatiga; Los resultados en el ensayo de fatiga se representan en la figura 3 donde se grafican los datos de esfuerzo aplicado contra la vida a fatiga del material, obteniéndose la curva que describe la ecuación de Basquin. es importante destacar que dicha curva obtenida luego de realizar la regresión lineal de los datos se encuentra en alto ciclaje, además la pendiente de la curva es negativa con un valor bajo produciendo que la recta tienda a ser horizontal, es decir a realizar una pequeña variación en el esfuerzo aplicado al material el número de ciclos a falla va a variar considerablemente ya sea aumentado o disminuyendo los ciclos, lo cual es un comportamiento atípico, debido a que por lo general esta curva tiende a ser bien pronunciada, para dar una explicación a dicho comportamiento se realizó una revisión en la literatura^[11] donde este comportamiento puede deberse a la influencia de la resistencia mecánica, dureza y ductilidad del material, ya que si existe una excelente relación entre estas propiedades y a su vez sea elevada producirá no solo un retraso en la nucleación de grietas si no que las misma crezcan a una velocidad menor, por lo que esto aplica efectivamente en dicho material ya que presenta una resistencia a la tracción elevada (2.592 MPa)^[11].

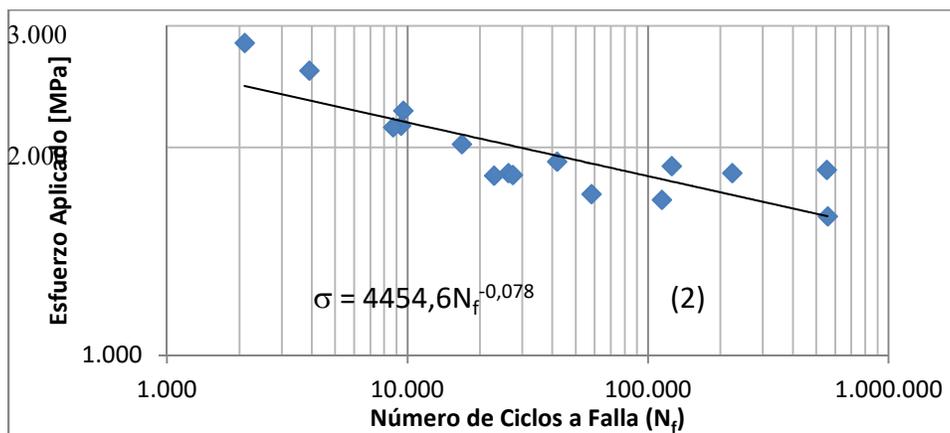


Figura 3. Curva S – N características del material.

Ensayos de daño acumulado; Con los valores obtenidos se procedió a evaluar la teoría de daño acumulado de Palmgren-Miner, a), los resultados son representados en la figura 4, donde se puede

apreciar claramente una desviación de los resultados experimentales con respecto a esta teoría, sin embargo esta desviación es correspondiente con la bibliografía consultada^[12] y en diversas investigaciones^[13] ya que para los ensayos de modo ascendentes dicha teoría subestima los valores y para el modo descendente los sobreestima, y esto se debe a que la secuencia en cómo se apliquen las cargas, las cuales influyen en la vida del material y estas condiciones forman parte de los defectos de la teoría de Palmgren-Miner ya que no lo considera. Para mejorar la comprensión de dicha teoría se realizó una comparación entre los ciclos obtenidos experimentalmente en el segundo bloque, b), respecto a los ciclos predichos según la teoría Palmgren-Miner, donde efectivamente se puede comprender la subestimación y sobreestimación, ya que para los ensayos de modo ascendentes la teoría estableció una cierta cantidad de ciclos pero el material fallo antes por lo que existe una subestimación de los resultados, mientras que para los ensayos descendentes la teoría predice otra cantidad de ciclos a falla y el material fallo a un valor mayor respecto a este, concluyendo que existe una sobreestimación.

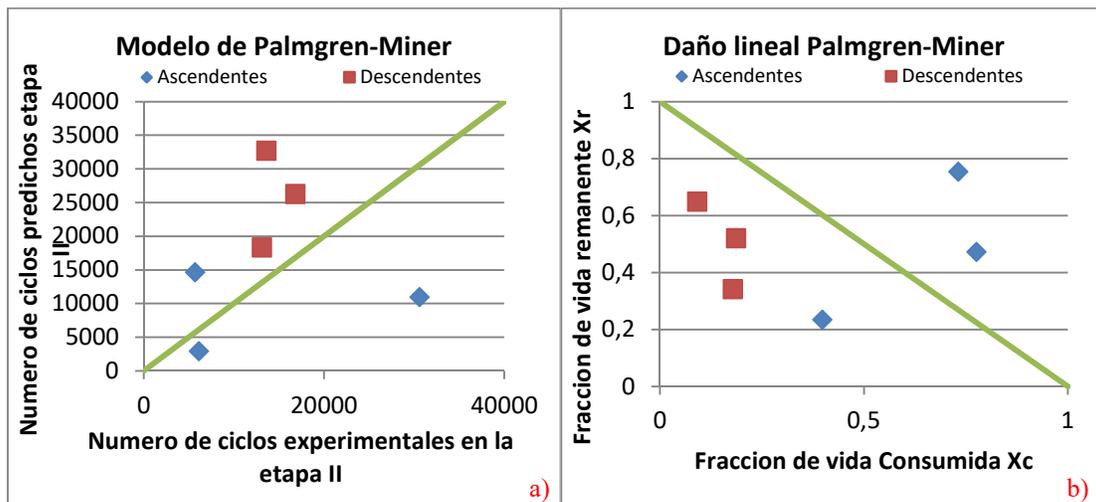


Figura 4. Grafica comparativa de los ciclos predichos por la regla de daño lineal de Palmgren-Miner con respecto a la cantidad de ciclos alcanzados experimentalmente y de la regla de daño lineal de Palmgren-Miner con respecto a las fracciones de vida consumida y remanente obtenidas experimentalmente.

Estudio Fractográfico; Se presentan a continuación las fotomicrografías más representativas de las superficies observadas a través de la lupa estereoscópica. Al analizar la superficie de fractura se puede observar en la figura 5.a) las zonas de inicio de grietas (ZI), la zona de propagación de grieta (ZP) y la zona de fractura (ZD). Los inicios de propagación de grietas principalmente se encuentran en el centro de la entalla, sin embargo en algunas, estos están hacia un lado de la misma, generándose una propagación diagonal y no transversal como en la mayoría de las superficies de fractura. Esto se debe a posibles imperfecciones que funcionan como concentradores de esfuerzo propiciando los inicios en diferentes regiones de la raíz de entalla mecanizada. En la figura 5.b) Se puede observar ciertas líneas en la zona antes de la fracturas, las cuales son producto del desgarre plástico generados por los últimos ciclos de carga aplicados antes de la fractura, es decir en material ya está pronto a fallar porque ya no soporta los esfuerzos cíclicos aplicados por lo que el material

cede de forma inestable y se generan dichos desgarres hasta el momento de que el material no puede soportar más el esfuerzo aplicado y fractura.

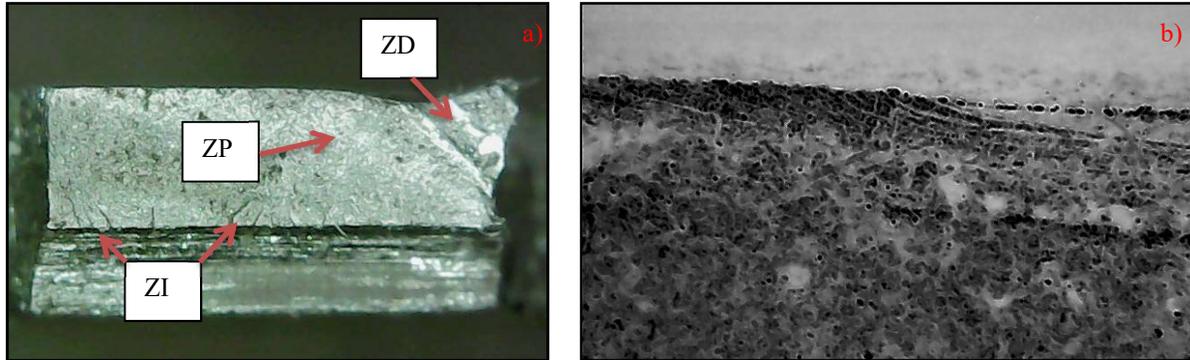


Figura 5. Superficie de fractura de una probeta ensayada; a) donde se señalan: zona de inicio de grieta (ZI), zona de propagación (ZP) y zona de fractura (ZD) y b) donde se aprecian ciclos de desgarre plástico cercano a la fractura.

CONCLUSIONES

El material presenta una matriz austenítica, de granos equiaxiales, maclada y con partículas características de la aleación en estudio con la presunción de que sean nitruros.

En la microestructura de la sección transversal se aprecian bandas de deformación producto del proceso termomecánico de fabricación.

El material es anisotrópico, presentando una dureza en la sección longitudinal superficial mucho menor respecto a la sección transversal.

Existe una mayor homogeneidad en la microestructura en la sección longitudinal que en la sección transversal.

La ecuación de Basquin característica del material obtenida a partir del comportamiento a la fatiga es: $\sigma = 4454,6(N_f)^{-0,078}$.

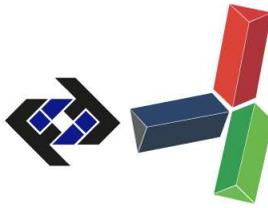
Los datos obtenidos en el ensayo de fatiga axial, presenta una desviación considerable, esto debido a la relación entre las propiedades mecánicas, el tipo de entalla y también la falta de homogeneidad microestructural en la sección transversal.

La teoría lineal de Palmgren-Miner no predice con exactitud la vida del material ya que sobreestima o subestima los valores según se aplique los esfuerzos.

Todas las nucleaciones de grietas de fatiga se generaron en la zona diseñada para que esto sucediese, en la entalla.

REFERENCIAS

- [1] Ruíz A, (2012) “Estudio de factibilidad económica para el uso de láminas de acero diferentes a las utilizadas actualmente en las mallas desgerminadoras del pulidor satake” (Tesis), Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- [2] ASTM E3-11(2017), “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017



- ASTM E384-17, “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017
- [3] ASTM E140-12be1, “Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- [4] Pereira J., Torre M., Amigo V. y Zambrano J. (2012) “Evaluación de la anisotropía de las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 laminado en frío” Revista Ingeniería UC Volumen 19 Pp. 10.
- [5] Jiménez J. (2016) “Efecto de la deformación en frío sobre la microestructura y propiedades de un acero” (Tesis de Grado) Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- [6] Graci V., Torres M., Zurita O. y Puchi E. (2008) “Dureza en aceros AISI 304 laminados en tibio y en caliente” Revista latinoamericana de metalurgia y Materiales Volumen 1 Pp. 237-248
- [7] Medrano J. (2006) “Mejoramiento de las Propiedades mecánicas de las juntas soldadas de aceros inoxidables austeníticos mediante los tratamientos térmicos” (Tesis de Grado) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [8] Jun L., Yixun Y., Yibin R., Jianhui D. y Ke Y. (2017) “effect of cold deformation on corrosion fatigue behavior of nickel-free high nitrogen austenitic stainless Steel for coronary stent application” DOI: 10.1016/j.jmst.2017.10.002
- [9] Vats V, Baskaran T, Arya SB, (2017). “Tribo-corrosion study of nickel-free, highnitrogen and high manganese austenitic stainless steel, Tribology International”. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.11.023.
- [10] ForresG. (1972). “Fatiga de los Metales”. Ediciones Urmo, España.
- [11] A. Fatemi, L. Yang. (1998) “Cumulative Fatigue Damage and life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials”. International Journal of Fatigue. Volume 20.Pp. 9- 34.
- [12] [45] Cabrera G, (2016) “Estudio de daño acumulado por fatiga en el acero inoxidable uns s31673, entallado” (Tesis), Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.