

## CONSIDERACIONES SOBRE APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE TRANSFORMACIONES DE FASE EN ACEROS

### RESUMEN

Este artículo presenta las principales transformaciones de fase de estado sólido, como: fases proeutectoides, perlita, bainita, martensita y algunos tipos de precipitados ocurridas en los aceros a partir de la descomposición de la austenita o fase madre, ya que estas determinan las características mecánicas y físicas de un material.

Las transformaciones de fase presentadas son obtenidas a través de tratamientos térmicos, formación de precipitados, recubrimientos duros aplicados por soldadura y procesos que involucran la formación de fases activadas con ayuda de calor y presión (nitruración a alta temperatura).

Finalmente son presentadas algunas aplicaciones de los aceros con base en la microestructura presente

**PALABRAS CLAVES:** Transformaciones de fase en aceros, microestructuras, tratamientos térmicos, nitruración gaseosa, recubrimientos duros.

### ABSTRACT

*This article presents the main phase transformations of solid state, like: proeutectoides phases, pearlite, bainite, martensita and some precipitate types, happened in steel from the decomposition of the phase austenite or phase mother, since that phases determinate the mechanical and physical characteristics of a material.*

*The transformations of phase presented, are obtained through processes like heat treatments, formation of, hard facing applied by weld and processes that involves the formation of phases activated with heat as much as of pressure (nitriding to high temperature).*

*Finally some applications of steel with base in the present microstructure are presented.*

**KEYWORDS:** Phase transformation in steels, Microstructures, Heat treating, gas nitriding, hard facing.

## 1. INTRODUCCIÓN

En sistemas materiales como los metales, se sabe que contienen desde una hasta varias fases conformando su microestructura. Siendo que la microestructura puede estar formada por una o varias de fases y por microconstituyentes, (que es una mezcla de fases como la perlita en los aceros), microconstituyente formado por las fases ferrita y cementita. Las fases o microconstituyentes pueden ser obtenidas a través de transformaciones de fase ocurridas durante el enfriamiento del metal desde su estado de colada o por transformaciones de fase de estado sólido. Siendo que las últimas son la base de esta discusión.

Una fase se puede definir como una parte homogénea de un sistema totalmente diferenciable de otras partes, en cuanto a composición química, forma y propiedades. [1,2,3].

La manipulación de la microestructura es una de las principales actividades de metalurgistas e ingenieros de materiales que practican para controlar las propiedades de los metales. Esta manipulación es comúnmente hacer se con ayuda de tratamientos térmicos (TT), a través de los cuales es posible obtener la microestructura apropiada y con esta las propiedades que debe tener un componente mecánico para cumplir su función, donde la correcta

**DAIRO HERNAN MESA GRAJALES**  
Ingeniero Mecánico, MSc en Ing  
Metalúrgica y materiales  
Profesor Asistente T.C  
Universidad Tecnológica de Pereira  
dhmesa@utp.edu.co

**ALBERTO ZAPATA MENESES**  
Ingeniero Mecánico, Especialista.  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
azapata@utp.edu.co

selección del material y de la forma en que este se procesa conforman el corazón de la metalurgia de los metales y otras ramas de la ciencia e ingeniería de materiales hoy en día. [4].

Por otra parte, transformaciones de fase en materiales no metálicos como los cerámicos y polímeros y aleaciones no férricas, están siendo muy estudiadas, en virtud de que es posible obtener propiedades para propósitos especiales de ingeniería.

En los últimos cincuenta años, la comprensión de los mecanismos a través de los cuales ocurren las transformaciones de fase de estado sólido, han aumentado enormemente. La teoría en este campo ha llegado a tal nivel, que se están utilizando estos mecanismos como herramienta precisa para estimar el valor de las propiedades con las que debe quedar la pieza al final de las transformaciones ocurridas. Además, con la llegada de los computadores de gran capacidad, y los esfuerzos internacionales concertados de años recientes para la recolección de datos cinéticos y termodinámicos, han permitido hacer uso de la teoría de transformaciones de fase un asunto casi rutinario en problemas prácticos de la metalurgia. Esto se hace evidente con la aparición de software como el Thermocalc® y el MT-DATA, usados a partir de datos simples del material estudiado, como la composición química, para modelar transformaciones de fase y así predecir los diagramas temperatura, tiempo, transformación (TTT), además de obtener las fases en equilibrio en el diagrama de fase respectivo.

Transformaciones de fase para formar precipitados a partir de una solución sólida sobresaturada y formación de capas duras de martensita en aceros nitrurados a alta temperatura ( $>1000^\circ$ ), son procesos que se están trabajando hoy en día con excelentes resultados a nivel ingenieril. [5,6,7].

También, transformaciones de fase desarrolladas a partir de recubrimientos duros aplicados por soldadura de piezas desgastadas, han permitido obtener microestructuras apropiadas, utilizando procesos, condiciones de calor y materiales de aporte adecuados, siendo posible intervenir problemas industriales, aumentando con esto la vida de los componentes, al incrementar su resistencia al desgaste.

## 2. DISCUSIÓN

### 2.1. Principales transformaciones de fase en aceros

El conocimiento detallado de la cinética de la descomposición de la austenita en aceros, tiene un carácter crítico para el diseño y la optimización de

procesos industriales que buscan producir piezas de alta calidad.

La descomposición de la austenita muestra generalmente un patrón secuencial de transformación, el cual puede incluir la formación de fases proeutectoides (ferrita o cementita, dependiendo del acero), seguida por otras transformaciones que incluyen la formación de perlita, bainita, martensita y algunos tipos de precipitados (conocidos como compuestos químicos). Las diferentes transformaciones de fase ocurridas en los aceros son discutidas a continuación.

#### 2.1.1. Formación de fases proeutectoides (ferrita y cementita)

Ocurre en aceros que no presentan composición eutectoide (0.77%C), donde la transformación austenita a ferrita ha recibido más atención por los investigadores, puesto que la mayoría de aceros son hipoeutectoides (%C<0.77).

##### Ferrita proeutectoide

La ferrita proeutectoide (o simplemente ferrita), es una solución sólida intersticial de carbono en hierro BCC, clasificándose dentro de un número pequeño de morfologías distintivas, en dependencia del crecimiento a partir de los límites de grano de la austenita y la forma de los cristales [8,9]. La ferrita conocida como alotriomorfa, crece preferencial a lo largo a partir de los límites de grano de la austenita madre (figura. 1(a)) y la ferrita de Widmanstätten, que son cristales en forma de placas o agujas que se desarrollan tanto en los límites de grano de la austenita, como a partir de núcleos dentro de los granos, (figura. 1(b)).

##### Cementita Proeutectoide

La cementita ( $Fe_3C$ ), es un compuesto intermetálico ortorrómbico frágil, con estequiometría  $M_3C$ , donde  $M=Fe$  y/u otros elementos de aleación sustitucionales tales como Mn, Ni, etc. [10]. La cementita proeutectoide se forma a partir de la fase austenítica arriba de la temperatura eutectoide, en el campo de dos fases de ferrita y austenita del diagrama Fe-C. La cementita proeutectoide (fig. 1(c)), se forma típicamente en aceros con contenidos de carbono mayores a la composición eutectoide (aceros hipereutectoides %C > 0.77%).

Aceros de bajo carbono, con contenidos de 0.5% de manganeso y 0.25% silicio, se comportan como si tuvieran composiciones de carbono mayores de 0.77% en peso, de tal manera que la formación de cementita es en ellos posible.

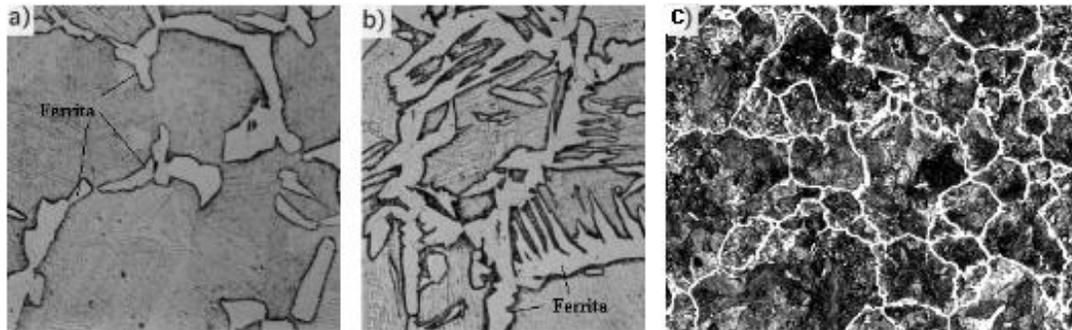


Figura 1. Microestructuras proeutectoides a) ferrita, alotriomorfa, b) ferrita Widmanstätten. y c). Microestructura de la cementita (zonas blancas), formada en un acero hipereutectoide. [4]

**2.1.2. Transformación perlítica**

Descubierta por Sorby hace más de 100 años, es quizá la transformación más simple en los aceros. Puede ser obtenida por enfriamiento isotérmico de la austenita, o por enfriamiento continuo lento desde temperatura de austenización.

La perlita consta de colonias de láminas paralelas y alternadas de ferrita y cementita que crecen cooperativamente a partir de los límites de grano de la austenita, tal como se observa en la figura 2a). A menor espaciado interlaminar de las placas de ferrita y cementita, mejores son las propiedades de tenacidad y resistencia en los aceros perlíticos. En esta figura se aprecian parámetros asociados con el modelado de crecimiento de la perlita, incluyendo la velocidad de crecimiento V, El espaciamiento interlaminar S y el espesor de láminas δ. Microestructuras de la perlita observadas al microscopio óptico y electrónico son mostradas en la figura 2 b) y c). [11].

**2.1.3. Transformación martensítica**

El término martensita se debe al investigador Adolfo Martens, quien fue uno de los primeros en estudiar las estructuras de los aceros después del temple.

La transformación martensítica en los aceros comienza cuando el metal es enfriado suficientemente rápido desde el campo austenítico, no dando tiempo para que exista una transformación difusional. Aquí, el tiempo es insuficiente para permitir que los átomos de carbono entren en solución sólida por difusión. La martensita es una solución sólida supersaturada de átomos de carbono con una estructura tetragonal de cuerpo centrado (TCC). En esta estructura, dos dimensiones de la celda unitaria son iguales, y la tercera es un poco mayor por el aprisionamiento del carbono. La relación c/a aumenta a contenido de carbono, hasta una variación máxima de c/a de 1.08. La tetragonalidad es medida por el cociente c/a entre las aristas, esta relación aumenta con el contenido de carbono, así:

$$\frac{c}{a} = 1 + 0.045\%C$$

El efecto del carbono en el parámetro de red de la austenita y en los parámetros c y a de la martensita puede ser visto en la figura 3 a) y su morfología aparece microscópicamente como agujas blancas o estructura acicular, que vista al microscopio óptico, es como se presenta en la figura 3 b).

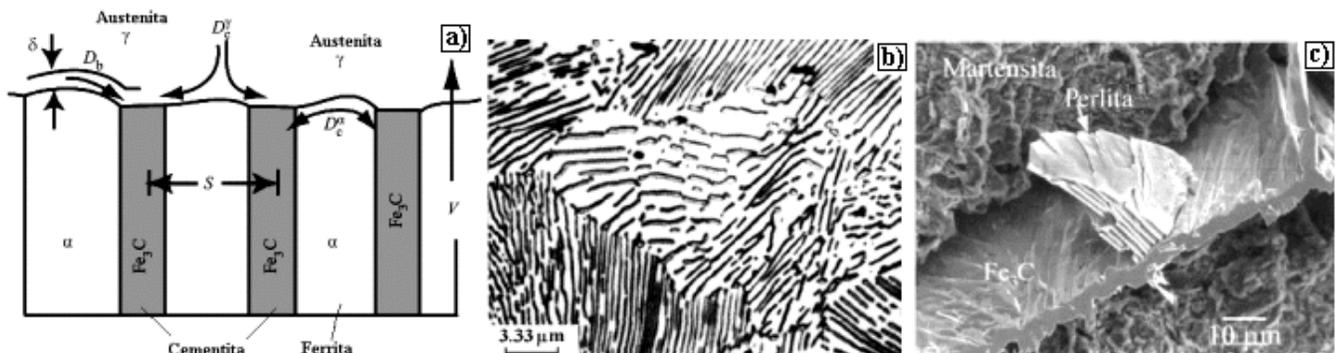


Figura 2. a) Diagrama esquemático del crecimiento de una colonia de perlita a partir de la austenita madre, b) Colonias de perlita vista en microscopio óptico y c) microscopio electrónico. [11].

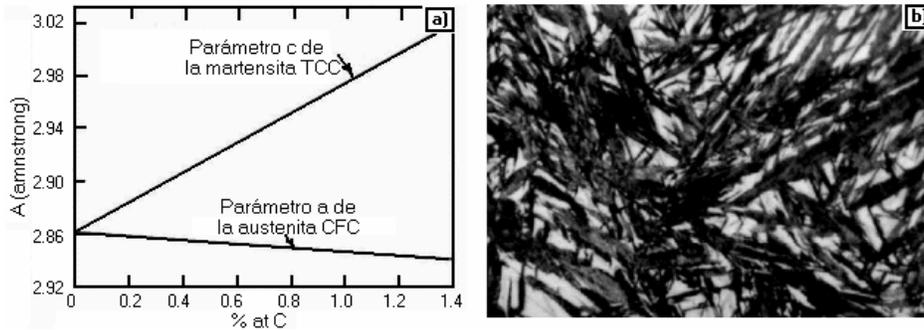


Figura 3. a) Efecto del carbono en los parámetros de red de la austenita y la martensita. y b). Microestructura martensítica presentando forma de agujas. [12]

La reacción martensítica comienza a una temperatura conocida como  $M_s$  (start martensite), la cual presenta desde valores tan altos como  $500^\circ\text{C}$ , hasta valores por debajo de la temperatura ambiente y termina cuando el acero alcanza una temperatura denominada  $M_f$  (finish martensite). A esta temperatura, toda la austenita podría estar transformada en martensita, pero en la práctica, una pequeña cantidad de austenita no se transforma (conocida como austenita retenida), zonas blancas en la figura 2b). Cuando  $M_f$  es muy baja, la cantidad de austenita retenida puede llegar a tener valores considerables.

La dureza y fragilidad de la martensita hace necesario revenirla para disminuir tensiones internas y ganar tenacidad, ductilidad y maquinabilidad sin afectar mucho la dureza (en caso que el revenido se haga a bajas temperaturas). Para temperaturas de revenido más altas ( $>300^\circ\text{C}$ ), la microestructura obtenida se hace cada vez más blanda, pero con mayor tenacidad.

**2.1.4. Transformación bainítica**

La bainita es un producto microestructural de la descomposición del eutectoide. La bainita se forma cuando la austenita se descompone en dos fases diferentes al enfriarse. Es de morfología y propiedades diferentes a la perlita, (otro producto de la descomposición del eutectoide). La bainita es una mezcla no laminar de dos fases derivadas la austenita, cuando estas fases crecen a diferentes tasas (a diferencia de la perlita, que es una mezcla laminar que se forma cuando las fases del producto crecen de forma cooperativa).

La bainita se forma por enfriamiento isotérmico, cuando el acero de composición apropiada, se enfría rápidamente y se mantiene en un baño de sal aproximadamente en el intervalo entre  $450$  y  $580^\circ\text{C}$ . Micrografías de la bainita son mostradas en la figuras 4.

Dos tipos de bainita son observados, la bainita superior o de alta temperatura y la bainita inferior o de baja temperatura. En esta última, presenta menos y más finas partículas de cementita que precipitan entre las placas de ferrita, si las comparamos con las de la bainita superior. Como consecuencia de esto, la bainita inferior tiende a ser más tenaz que la bainita superior.

**2.1.5. Transformaciones de fase a partir de soluciones sólidas sobresaturadas**

Apropiadas en aceros aleados como los inoxidables y aceros para herramientas, donde se busca obtener microestructuras apropiadas que hacen que el material cumpla de forma eficiente su función. Con la precipitación se forman partículas duras, de gran diversidad de tamaños, cantidad y formas, mediante procesos como: enfriamientos controlados desde temperatura de fusión (donde se forman precipitados primarios), por tratamiento de envejecimiento, donde se forman los precipitados secundarios. Los precipitados en los aceros pueden ser carburos, nitruros o carbonitruros, en dependencia de su composición. Ejemplo de estos carburos son mostrados en la figura 5.



Figura 4. Microestructuras bainíticas. [1].

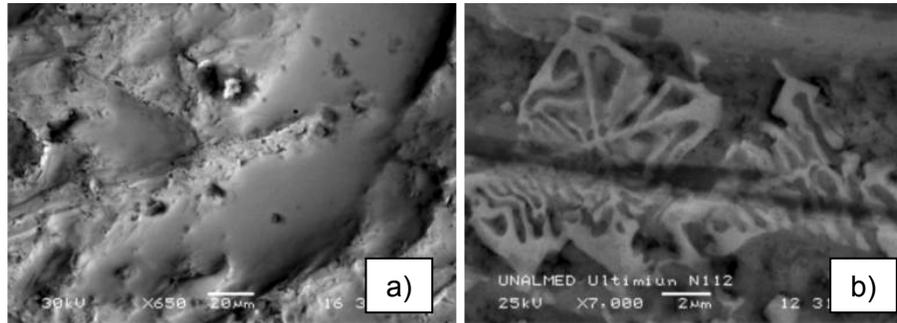


Figura 5. Carburos de cromo y de tungsteno sometidos a partículas abrasivas; a) Carburos de Cromo; y b) Carburos de Tungsteno. [13]

### 3. APLICACIONES DE LOS ACEROS DE ACUERDO A SU MICROESTRUCTURA.

#### 3.1. Aplicaciones tecnológicas de aceros con fases proeutecoides

Las fases proeutecoides presentan propiedades importantes entre las que se destacan su elevada ductilidad y maquinabilidad. El acero en estado de entrega presenta este tipo de microestructuras, para conservar el filo de las herramientas y evitar el desgaste durante el conformado de las piezas.

#### 3.2 Aplicaciones tecnológicas de aceros con fase perlítica

Desde el siglo XIX, los ferrocarriles han explotado la excelente resistencia al desgaste de los aceros eutectoides y cercanos al eutectoide en la construcción de rieles. Los rieles estándar presentan un valor de dureza medio entre 300 HB y 330 HB, esa dureza y resistencia se alcanza por transformación perlítica durante el enfriamiento. Un porcentaje pequeño de rieles con dureza superior  $350 \pm 400$  HB es producido aleando el acero con elementos tales como cromo, molibdeno y vanadio.

Alambres para instrumentos musicales son otra aplicación importante de los aceros perlíticos, los cuales presentan una resistencia a la tracción muy alta, del orden de 3.3Gpa, siendo hoy en día uno de los materiales más fuertes comercialmente disponibles. Estas características se desarrollan a partir de barras (o de alambres), en aceros eutectoides o acero cercanos al eutectoide (0.40 o 0.95%C), que tienen un espaciado interlaminar muy fino.

Debido a su alto límite elástico, límite de fatiga y esfuerzo de tracción, los aceros perlíticos se utilizan en muchos tipos de resortes y alambres de amarre. Otras aplicaciones incluyen cuchillería y varias herramientas de mano como cinceles, martillos, etc.

#### 3.3. Aplicaciones tecnológicas de aceros con fase martensítica

Originalmente, la transformación martensítica era usada exclusivamente para endurecer el acero, pero desarrollos recientes utilizan esta transformación para otras

finalidades. Ejemplos los aceros TRIP (Transformation induced plasticity), donde la transformación martensítica se obtiene por deformación plástica, permitiendo una plasticidad mucho mayor. Aleaciones con memoria de forma, es otra opción de la transformación martensítica en aleaciones de Ni y Ti. Estos materiales están siendo usados en componentes de la industria aeroespacial y militar.

En la industria del automóvil, los aceros martensíticos están siendo usados en refuerzos estructurales, después de laminados y en para choques. Por otra parte, aceros de fase dual austenita - martensita se utilizan en resortes que son elementos que requieren esfuerzos más altos.

En el caso de aceros inoxidable martensíticos, estos encuentran gran variedad de aplicaciones tecnológicas en cuchillería, álabes de turbinas, tijeras, tornillos, partes de micrómetros, radios de bicicletas, etc.

#### 3.4. Aplicaciones tecnológicas de aceros con fase bainítica

La microestructura Bainítica tiene un gran valor comercial, ya que puede ser producida económicamente a partir de un proceso simple (austemperado), y proveen a algunos aceros aleados y hierros fundidos una combinación atractiva de características mecánicas.

Hay un considerable interés en aceros bainíticos aleados con cobre, por su aplicación en la ingeniería pesada. El revenido en estos aceros induce la formación de partículas finas de cobre, las cuales contribuyen a aumentar la resistencia en el material sin poner en peligro la tenacidad.

Los progresos recientes en los tratamientos térmicos de los aceros para rodamientos y otras piezas resistentes al desgaste, han dejado ver las características interesantes asociadas a las estructuras bainíticas y bainítico-martensíticas. De esta forma, los aceros bainíticos están siendo considerados para el servicio en la generación de energía a temperaturas elevadas o para ser aplicados en componentes cargados a fatiga o en componentes mecánicos sometidos a condiciones severas de servicio.

### 3.5. Aplicaciones tecnológicas de fases con presencia de precipitados duros

Recubrimientos duros aplicados por soldadura, se encuentran dentro de las mejores soluciones para combatir problemas de desgaste abrasivo. Estos recubrimientos pueden ser obtenidos en un sinnúmero de aplicaciones industriales, entre las que se destacan: la industrias agrícola (rejas de arado, surcadores, discos de arado, cuchillos picadores de caña de azúcar), instalaciones para el lavado de grava, zapatas de oruga, etc. Estos y muchos otros elementos pueden ser recuperados con la obtención de la microestructura adecuada, a partir de la precipitación de partículas duras o formación de fases resistentes al desgaste. [13].

### 3.6. Aplicaciones tecnológicas de transformaciones de fase recientemente estudiadas

Algunos investigadores encontraron que el nitrógeno en los aceros inoxidable martensíticos puede estar en solución sólida, como elemento intersticial, o en la forma de precipitados como nitruros o carbonitruros. La nitruración a alta temperatura en aceros inoxidable martensíticos es realizada entre 1000°C y 1200°C, valiéndose del aumento de la solubilidad de nitrógeno en la austenita. [5,6,7],

Después de la nitruración y de las transformaciones de fase respectivas, la microestructura de la capa nitrurada consta de austenita retenida y martensita, con o sin presencia de nitruros de Cr del tipo CrN y/o Cr<sub>2</sub>N, dependiendo de la composición química del material, de la temperatura y presión del gas utilizadas. Estos aceros encuentran aplicaciones en componentes de equipos de exploración de petróleo en plataformas submarinas, cuchillería, impellers de bombas, entre otras.

También aceros inoxidable austeníticos pueden ser nitrurados, encontrando aplicación en implantes quirúrgicos, ya que presentan buena biocompatibilidad y excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y elongación, resistencia a la fatiga y fatiga/corrosión). [14,15]

## 4. CONCLUSIONES

Las microestructuras en los aceros pueden ser manipuladas a través de transformaciones de fase con el fin de obtener las propiedades deseadas para un uso particular.

Entre los procesos más importantes que existen para obtener la microestructura deseada en los aceros están: los tratamientos térmicos y la soldadura de recuperación.

Son muchas las aplicaciones que presentan los aceros y esto gracias a que es posible producir en ellos las fases o microestructuras apropiadas por muy diversos métodos.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SCHAEFFER, SAXENA, ANTOLOVICK, SANDERS, WARNER. Ciencia y diseño de materiales de ingeniería, Ed. CECSA, México, 2000.
- [2] PORTER, D.A., EASTERLING, K.E. "Phase Transformations in Metals and Alloys", 2ª ed., Chapman&Hall, London, 1992.
- [3] CHRISTIAN, J. W. The theory of transformations in metals and alloys. Elsevier Science, 2002.
- [4] GALE, F. William, The Fundamentals of Phase Transformations. 2003, Disponible en: [http://www.eng.auburn.edu/~wfgale/intro\\_metals/section\\_2.htm](http://www.eng.auburn.edu/~wfgale/intro_metals/section_2.htm)
- [5] GARZON, C. M, "Caracterización Microestructural de Aceros Inoxidáveis Martensíticos de Alto Teor de Nitrogênio" Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2001.
- [6] MESA G. Dairo. Propriedades mecánicas e de superfície de aços inoxidáveis martensíticos de alto teor de nitrogênio., Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2001.
- [7] GAVRILJUK, V. G.; BERNS, H, "High Nitrogen Steels: Structure, Properties, Manufacture, Applications" Springer-Verlag, Berlin, 1999. 377p.
- [8] DUBE, C. A., AARONSON H I, MEHL R F La formation de la ferrite proeutectoide dans les aciers au carbone. Re.. Metall. 55, 1958
- [9] AARONSON H I. The proeutectoid ferrite and the proeutectoid cementite reactions. In: Zackay V F, Aaronson H I (eds.) Decomposition of Austenite by Diffusional Processes. Interscience, New Cork, 1962
- [10] HENDRICKS S B. The Crystal Structure of Cementite. Zeitschrift fur Kristallographie 74, 1930.
- [11] SHIFLET G. J. Pearlite. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Copyright 2001 Elsevier Science Ltd.
- [12] HONEYCOMBE, R.W.K.. Aceros, microestructura e propiedades. Fundación Calouste. Lisboa. 1982. 348p.
- [13] GUTIÉRREZ, J. C., LEÓN, M. L., MESA D. H., TORO A. Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicaciones en la industria minera, Scietia et Technica No 25, Revista UTP, 2004.
- [14] DA SILVA JR., W.C.; AIDAR, C.H.; PANONI, F.; TSCHIPTSCHIN, A.P. A New High Nitrogen Stainless Steel for Surgical Implants. Stainless Steel World 1999 Conference – The Hague, Nederland, Conference papers, Book 2 – p. 763-770, nov. 1999.
- [15] TSCHIPTSCHIN, A.P.; AIDAR, C.H.; NETO, F.B.; ALONSO-FALLEIROS, N. Nitrogen Bearing Austenitic Stainless Steels for Surgical Implants. HNS 98 Materials Science Forum, v. 318-320, p. 569-576. 1999.