

MODELO METALOGRAFICO PARA EVALUAR LA RESISTENCIA A LA CAVITACIÓN EN ACEROS AUSTENÍTICOS PARA MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Silvana Carrizo^{1*}, Carlos Bello²

1: Secretaría de Ciencia y Tecnología Proyecto Cavitación en Componentes Hidráulicos e Interacción entre Flujos y Estructuras, Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional. Rodriguez 273, Mendoza, Argentina

2: Grupo DIDEME, Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional. Rodriguez 273, Mendoza, Argentina

e-mail: * silvana_carrizo@hotmail.com

RESUMEN

Los procesos de daño por cavitación tienen relevancia en el ámbito de las máquinas hidráulicas ya que su reparación puede ser muy costosa. El propósito de esta investigación fue determinar un nuevo modelo para la evaluación de materiales, que permita conocer su resistencia a la cavitación, que posibilite mejores diseños, más resistentes a este fenómeno. El modelo usado para caracterizar el daño, se basa en teorías de las transformaciones no difusivas en materiales ferrosos. La aplicación de este modelo permite determinar un sistema de identificación y medición apropiado con técnicas metalográficas estándares (banco de cavitación por ultrasonido + equipo para preparación de muestras + observación de muestras mediante microscopía). Los datos experimentales obtenidos corroboran el modelo propuesto. La conclusión más importante de este estudio es que es posible caracterizar la respuesta del material con un modelo metalográfico sencillo y eficaz, que utiliza equipamiento estándar. Se espera que el conocimiento obtenido permita encarar el desarrollo de nuevas aleaciones resistentes al efecto de la cavitación para aplicación a las máquinas hidráulicas.

Palabras Claves: Ensayo por ultrasonido, sollicitación, probeta normalizada, modelo, validez.

METALLOGRAPHIC MODEL TO EVALUATE THE RESISTANCE TO THE CAVITATION IN AUSTENITIC STEELS FOR HYDRAULIC MACHINES

ABSTRACT

The damage processes for cavitation is relevant in the field of the hydraulic machines, since its reparation can be very expensive. The purpose of this investigation was to determine a new model for the evaluation of materials, which allows to know its resistance to the cavitation, so it can be possible to make better designs to improve the resistance to this phenomenon. The model used to characterize the damage is based on theories of non-diffusive transformations in ferrous materials. The application of this model allows to determine an appropriate system of identification and measurement with standard metallographic skills (ultrasonic cavitation test + surface preparation + microstructural analysis). As main conclusion it was found that it is possible to characterize the response of the material with an effective metallographic model, which uses standard equipment. It is expected that the obtained knowledge should allow addressing the development of new cavitation resistant alloys.

Keywords: ultrasonic test, stress, normalized specimen, model, valicity.

1. INTRODUCCIÓN

La cavitación somete a los materiales de los componentes de máquinas y dispositivos hidráulicos a condiciones de sollicitación que producen daño. Los métodos de estudio de los mecanismos que hacen que los materiales resistan estas sollicitaciones se valen de estrategias y equipamiento complejo. En este trabajo se plantea visualizar el problema del daño por cavitación desde otra óptica, utilizando otras técnicas metalográficas, un método más accesible y económico.

El fenómeno de la cavitación es una nucleación repetida, crecimiento y colapso violento de burbujas en un fluido donde hay presiones fluctuantes y acciones de vibraciones o patrones de flujo en el sistema. Existen diversos modos de cavitación en función de las condiciones de flujo como por ejemplo: de flujo re-entrante, shear cavitation (de cizalla, donde aparecen vórtices), de burbuja transitoria, de burbuja estacionaria o laminar

según Callenaire [1] y que interactúan de diversas formas sobre el material del componente donde se produce el fenómeno. Cuando en el flujo de un líquido se producen valores de presión suficientemente bajas, se producen burbujas rellenas de vapor del líquido, el flujo arrastra estas cavidades que encuentran condiciones de presión mayor a la del vapor y colapsan, la fuerza motora es la diferencia entre la presión hidrostática y la presión de vapor del líquido, en la figura 1 se representa esquemáticamente el fenómeno y su interacción con la superficie.

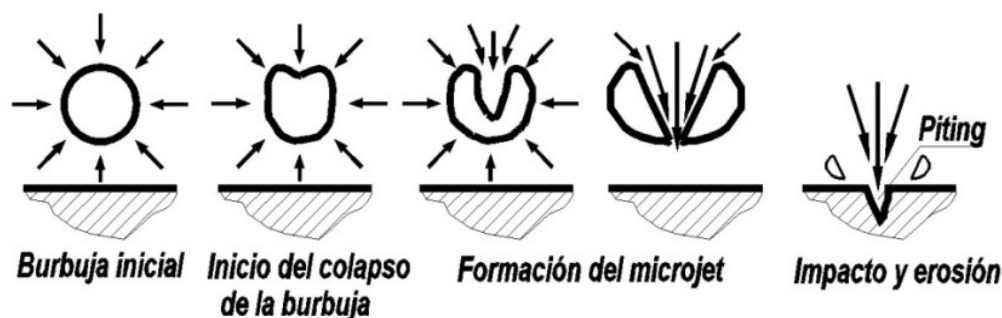


Figura 1. Evolución de una burbuja de vapor, proceso de colapso e interacción con la superficie del componente.

Este fenómeno se manifiesta en las máquinas que utilizan fluidos y produce en el material que está en contacto con el líquido, daños por arranque del material que también asocia procesos de corrosión localizada.

M.Sriraman [2] ha estudiado los efectos que produce la cavitación en aceros AISI 304 y aceros 4140, utilizó técnicas de estudio mediante un banco de ultrasonido, técnicas de pulido electrolítico y medición de espesores mediante micrómetro, asumiendo que la velocidad del pulido electrolítico está asociada a la tensión residual y es uniforme. También utilizó un difractor de rayos X para determinar la transformación Martensítica en la superficie de la probeta. Trató de evaluar el daño mediante el recurso propio de la medición del tiempo de colapso y el radio de las cavidades. Con estas técnicas hizo la caracterización del modo de respuesta de estos materiales y concluyó que el trabajo que produce la cavitación en el material se puede comparar con el proceso de Shot- Peening que se utiliza para introducir tensión residual de compresión sobre la superficie del material y que permite aumentar la capacidad de un material para soportar el daño por fatiga, proceso muy utilizado en resortes de ballesta de aplicación a automóviles.

En la Universidad Tecnológica Nacional Regional Mendoza (UTN FRM) se están llevando a cabo trabajos para tratar de avanzar en la caracterización de la capacidad que tiene el material para resistir las sollicitaciones que produce la cavitación, mediante la medición de la energía por falla de apilamiento. Esta técnica de medición de la energía por falla de apilamiento es indirecta y requiere de equipamiento sofisticado y no ha sido un método confiable de medición. Este trabajo muestra el estudio de una alternativa más simple del modo de caracterizar y hacer evaluaciones de la capacidad del material en estudio para responder a las sollicitaciones a que lo somete la cavitación. En el presente trabajo se presentan las siguientes hipótesis: a) Si el material admite transformaciones no difusivas, es capaz de desarrollar un comportamiento de defensa frente a las sollicitaciones de la cavitación, b) si se puede caracterizar el material mediante su transformación no difusiva frente a las sollicitaciones de la cavitación, se puede hacer una medición inicial de esta capacidad mediante técnicas metalográficas y de microdureza. Estas últimas hipótesis plantean una técnica que permite hacer una evaluación rápida para desarrollar ensayos más exhaustivos posteriormente.

Los objetivos de este trabajo son determinar las correlaciones entre transformaciones no difusivas y mejorar los métodos para analizarlas y medirlas a partir del modelo teórico propuesto. Como objetivos secundarios, se plantea desarrollar nuevos protocolos de ensayos para encarar el diseño de materiales resistentes a la cavitación con base en los aceros inoxidables austeníticos.

El trabajo se basó en estudios de los mecanismos de transformaciones no difusivas, estudios metalográficos de probetas ensayadas en el proyecto de materiales resistentes a la cavitación y su relación con el mecanismo

anterior.

La fase actual del proyecto es la optimización del sistema de ensayos de probetas a la cavitación mediante la técnica del ultrasonido, de acuerdo con las conclusiones obtenidas a partir de este nuevo modelo. Para completar el análisis se pretende buscar correlaciones con ensayos de cavitación a tiempo real en circuito hidráulico con dispositivo de ensayo tipo Venturi, que se encuentra en etapa de construcción. La idea de utilizar datos complementarios extraídos de un banco hidrodinámico se basan en que se cree que los mecanismos que generan la cavitación en este tipo de dispositivos son más cercanos a los observados en turbomáquinas hidráulicas reales.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se ensayaron probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 recubiertas por aporte de soldadura utilizando un electrodo de prueba diseñado por CONARCO en conjunción con la UTN FRM, como parte de proyectos conjuntos para estudiar aleaciones más resistentes al daño por cavitación. En este contexto, un análisis químico mediante espectrometría hecho a una de las probetas estudiadas, sobre la zona de ensayo (recubrimiento por soldadura), dio los siguientes resultados que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Componentes del material de soldadura ensayado en probeta de cavitación. Ensayo mediante espectrómetro, laboratorio de metalurgia, UTN FRM.

COMPOSICION QUIMICA							
Si	Mn	Cr	Ni	Co	Cu	W	Fe
0.31%	1.73%	18.8%	8.13%	0.38%	0.36%	0.76%	69.6%

Este material estudiado es parte del desarrollo hecho para electrodos de reparación de turbinas y tiene aleantes que introducen en la matriz metálica, un aumento de las dislocaciones y defectos de la red cristalográfica y lo hace susceptible de presentar transformaciones no difusivas por trabajo de deformación.

Los datos experimentales que se utilizan en este estudio fueron obtenidos a partir de ensayos de probetas mediante el banco de cavitación inducida por ultrasonido. Los ensayos permitieron evaluar el diseño original del banco y detectar problemas con el sistema de posicionamiento de las probetas por lo que se rediseñó y se efectuó un nuevo montaje y se realizó la adecuación de la norma con que se ensaya (ASTM G32). A partir de esta primera adecuación del banco, se estudió también un nuevo modelo de evaluación y caracterización de la resistencia a la cavitación con la alternativa de usar equipo estándar, este modelo propuesto es el que se discute en este trabajo y tiene el sentido de generar una evaluación inicial y rápida de ciertas características buscadas para luego hacer ensayos más avanzados mediante el banco de ultrasonidos ya optimizado y otros métodos y ensayos a tiempo real (Venturi).



Figura 2. Fotografía de cara de probeta ensayada mediante método de ultrasonido en Laboratorio Metalurgia UTN Regional Mendoza, se observan cavidades de conformación irregular uniformemente distribuidas.

Las probetas ensayadas se fabricaron a partir de una chapa de acero inoxidable tipo 304 de 25mm de espesor, con un recubrimiento por soldadura de aproximadamente 10 mm. La aleación usada (ver Tabla 1) se diseñó para hacer recargues mediante soldadura sobre un sustrato de acero inoxidable del tipo 18-8 con adiciones de cobalto, tungsteno y manganeso, se hicieron los ensayos tomando por tiempo y determinando peso perdido para luego hacer la evaluación metalográfica y de microdureza, en la figura 2 se puede observar la cara de la probeta ensayada luego de 960 minutos en el banco.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El ensayo consta de periodos de 60 minutos de exposición de la probeta a partir de los cuales se efectúa una pesada para evaluación de la pérdida de masa, la tabla 2 muestra los valores obtenidos del ensayo.

Tabla 2. Mediciones de pérdida de masa durante ensayo de cavitación por ultrasonido. Laboratorio Metalurgia de Universidad Tecnológica Nacional Regional Mendoza.

<i>PROBETA Acero Inoxidable Austenítico tipo 18-8</i>		
<i>Tiempo [minutos]</i>	<i>pérdida de peso respecto al peso inicial [gramos]</i>	<i>Diferencia entre pesadas [gramos]</i>
0	0	0
60	0,0003	0,0003
120	0,0058	0,0053
180	0,0121	0,0065
240	0,0198	0,0077
300	0,0275	0,0077
360	0,0342	0,0067
420	0,0415	0,0073
480	0,0487	0,0072
540	0,0563	0,0076
600	0,0635	0,0072
660	0,0709	0,0074
720	0,0784	0,0075
780	0,086	0,0076
840	0,0932	0,0072
900	0,101	0,0078
960	0,108	0,007

La figura 3 muestra la pérdida de peso de la probeta durante todo el ensayo mientras que la figura 4 muestra las pérdidas de peso entre pesadas y permite evaluar cómo se desarrolla el proceso en donde se observa una etapa inicial de donde la probeta no pierde casi material en el primer periodo, etapa de crecimiento y luego de estabilización del proceso de deterioro con pérdidas de peso que se mantiene casi constantes.

El corte transversal de la probeta y posterior inspección metalográfica mostró la estructura austenítica de base y los cambios en la matriz cercana a la superficie, ver fig. 5, a partir del fondo de un cráter se hizo un muestreo de microdureza con dirección hacia la estructura base de la probeta como muestra la figura 6.

Estas probetas tienen un material tipificado como austenítico y no son pasibles de ser templadas, estas circunstancias observadas de formación de una estructura de transformación y las mediciones de microdureza sólo pueden explicarse como producto de un proceso de transformaciones no difusivas, anteriormente

explicadas. El proceso de degradación superficial debido al fenómeno de la cavitación introduce en el material sobre la superficie, solicitaciones de esfuerzos localizados, en este material que se estudia es de esperar que responda con la formación de bandas de deslizamiento y la secuencia de transformación no difusiva cuando se induce a deformación plástica.

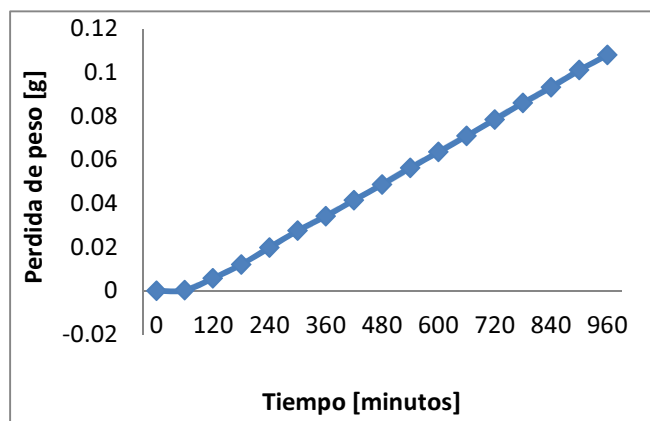


Figura 3. Pérdida de peso durante el ensayo en función del tiempo de ensayo.

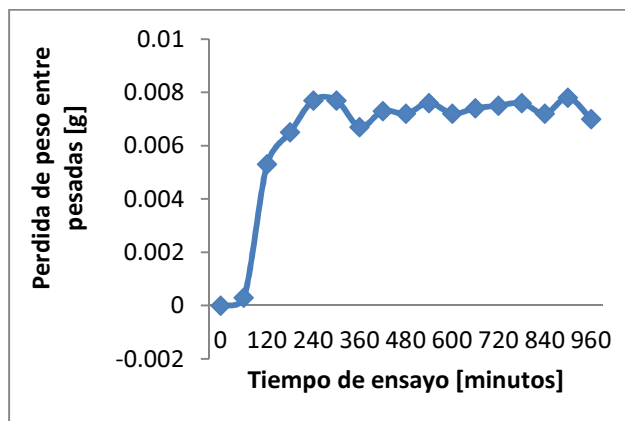


Figura 4. Relación pérdida de peso entre pesadas versus tiempo de ensayo

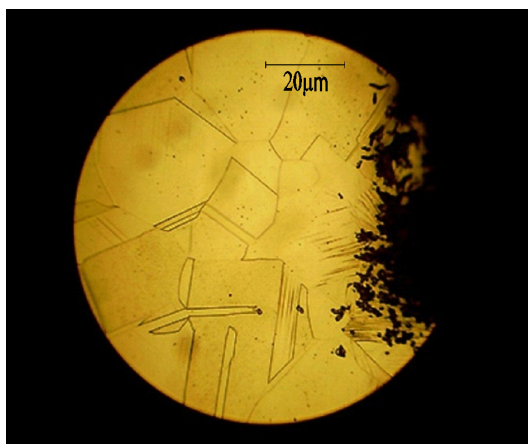


Figura 5. Metalografía de borde en fondo de cavidad de probeta ensayada por la técnica de ultrasonido.

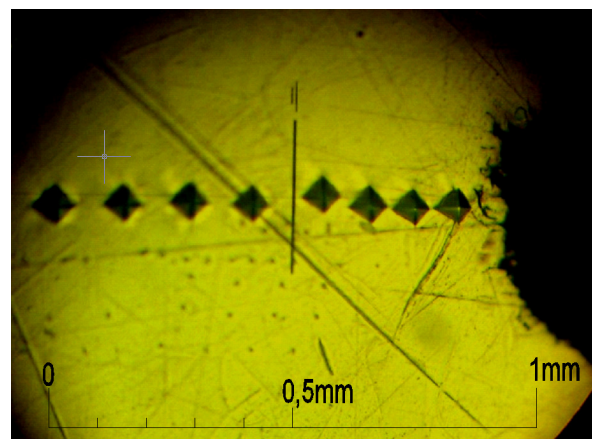


Figura 6. Tomas de micro dureza, Universidad Tecnológica Nacional.

El endurecimiento superficial es producto de los sucesivos impactos producto de las ondas de choque que producen la aparición e implosión de las burbujas de vapor generadas por el proceso de cavitación, lo que favorece la transformación localizada con niveles bajos de esfuerzo general. Para poder evaluar la capa que sufre estas solicitaciones cercana a la superficie se estudió la distribución de micro-dureza, tomándose varios puntos desde la superficie erosionada hacia el interior del material, la distribución más notable se detectó desde el fondo de los cráteres que se muestra en la tabla 3 y se grafica en la figura 7.

Esta dureza se corresponde con la alcanzada por los aceros que han sido sometidos a tratamiento térmico y se explica solamente con la aparición de estructuras martensíticas, en este caso inducidas por el mecanismo de las transformaciones no difusivas.

Las transformaciones difusivas, para los aceros de medio y alto contenido de carbono, son producto de un tratamiento térmico de temple y la estructura resultante es la martensita. El material analizado no puede ser templado porque su estructura a temperatura ambiente es austenítica. Por extensión se denominan transformaciones martensíticas a procesos donde las características de las fases, inicial y final, como los

movimientos atómicos y cambios de simetría que ocurren, son similares a las observadas, de allí que se denominen transformaciones martensítica por deformación, siendo el mecanismo de la deformación en frío el que induce la transformación.

La austenita en los aceros inoxidable metaestables se puede transformar en 2 tipos de martensita, martensita hexagonal compacta (HCP) denominada ε -martensita o en la martensita cúbica centrada en el cuerpo (BCC), denominada α' -martensita.

Spencer y otros han explicado el mecanismo por el cual que la martensita α' nuclea en apilamiento de dislocaciones e intersecciones de bandas de deformación del tipo maclas y bandas de deslizamiento y la secuencia de transformación martensítica cuando se induce a deformación plástica es FCC $\rightarrow$ HCP $\rightarrow$ BCC siendo las fases $\gamma\rightarrow\varepsilon\rightarrow\alpha'$ respectivamente, siendo las intersecciones de fallas de apilamiento o plaquetas de fase ε (hcp), los sitios preferenciales para la nucleación de α' [3].

Tabla 3. Perfil de Dureza Vickers determinada sobre corte transversal de probeta cavitada, Durómetro HMV Shimadzu.

Nº Medición	1	2	3	4	5	6	7	8
Cráter 1 [Vickers]	210	232	286	286	282	286	321	412
Corresponde HBr	199	220	271	271	268	271	304	390
Cráter 2 [Vickers]	148	127	232	210	232	257	286	321
Corresponde HBr	140	121	220	199	220	244	271	304

Durante la deformación plástica, el retículo cristalográfico de la aleación sufre distorsiones que aumentan la energía interna del material, esta suministra la energía interna de nucleación de una nueva fase [4]. Esta transformación no difusiva por deformación produce además una disminución en la propagación de grietas por fatiga. Los sitios preferenciales para la nucleación de la fase martensítica son posiciones internas de deformación elevada, como es el caso de la intersección de dos o más dislocaciones, o la existencia de bordes de bajo ángulo. Al someter a deformación plástica la matriz austenítica, aumenta el tamaño de las deformaciones internas y facilita la nucleación de la fase martensita [5].

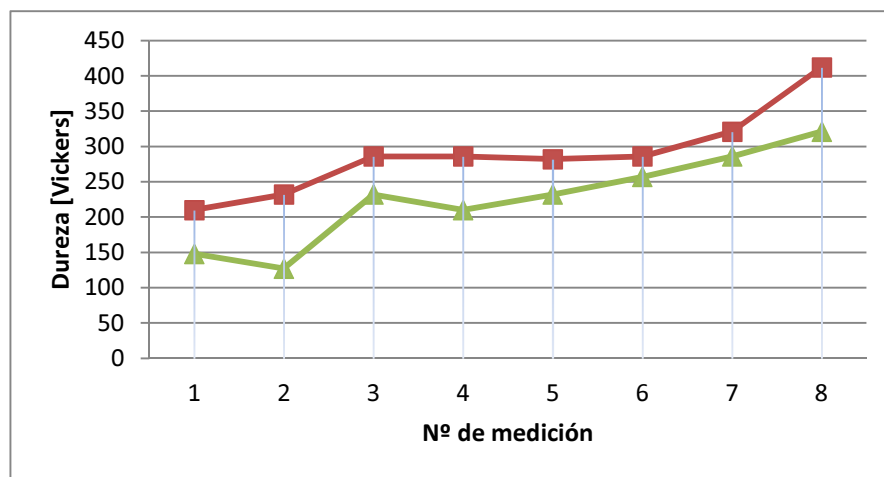


Figura 7. Perfil de micro dureza de dos cráteres de la probeta inspeccionada. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.

La transformación martensítica observada en la capa superficial de la probeta, muestra este mecanismo, donde el proceso erosivo remueve las capas a partir de la fatiga inducida en la superficie, entonces la matriz queda expuesta y se vuelven a producir en ella las transformaciones no difusivas. También la resistencia al desgaste de este material se debe a la presencia del sustrato dúctil por debajo de la capa de martensita, que conserva su capacidad de absorber la energía de deformación plástica y el desgaste solo ocurre por la fractura de la capa superficial que es muy resistente a medida que las burbujas de vapor chocan de manera consecutiva.

Según Donald Askeland [6], este comportamiento del acero de estructura austenítica, que se debe a su capacidad de endurecimiento por deformación plástica en frío mediante una transformación no difusiva en la capa superficial y la presencia de un sustrato dúctil, tiene elevada capacidad de absorber energía por deformación plástica.

La metalografía de la figura permitió visualizar el mecanismo que se discute aquí, que se considera conveniente para trabajar en condiciones de cavitación, pues el material responde con un mecanismo de defensa. Un modo rápido de cuantificar esta respuesta es hacer las determinaciones de microdureza, en este caso con una distancia entre mediciones de 1,1 decimas de milímetro lo que permitió determinar la variación en profundidad de la dureza adquirida, este método es simple y muestra eficientemente la respuesta del material y las propiedades mecánicas alcanzadas. La dureza Vickers (HV) y la Brinell (HBr) se correlacionan con la relación de la ec. (1):

$$HBr = 0,95 \times HV \quad (1)$$

Esta propiedad de los aceros está estrechamente relacionada con el *máximo esfuerzo o resistencia a la tracción del acero* con una relación para los aceros austeníticos que se muestra en la ec. (2) donde la dureza está en grados Brinell, y la tensión de rotura en Kg/cm² [7]

$$\sigma'_{f1} = 351 + 32,7 HBr \quad (2)$$

Al aplicar estas relaciones a los valores hallados se encuentra que a nivel superficial el material presenta valores de σ_f que alcanzan los 13000 Kg/cm² cuando en el núcleo no superan los 6800 Kg/cm², con la característica que la remoción de esta capa resistente induce en la superficie expuesta una nueva capa dura.

4. CONCLUSIONES

La aplicación de este modelo nos permitió presentar un nuevo sistema de identificación y medición apropiado con técnicas metalográficas estándares (banco de cavitación por ultrasonido + equipo para preparación de muestras + observación de muestras mediante microscopía).

Los datos experimentales obtenidos permitieron corroborar el modelo propuesto, ya que las transformaciones martensíticas por deformación plástica detectadas en esta investigación de materiales resistentes a la cavitación, nos determinan el efecto perseguido para resistir las sollicitaciones que la cavitación introduce en los componentes de las máquinas hidráulicas. Así, los estudios metalográficos permitieron detectar la formación de estructuras martensíticas mediante transformaciones no difusivas en las probetas ensayadas y demostraron que la técnica de estudio metalográfico es un método accesible que permite evaluar cualitativamente este mecanismo de defensa del material frente al daño por cavitación. Del mismo modo, la medición y utilización de los perfiles de dureza se mostró eficiente para hacer evaluaciones rápidas del mecanismo de defensa buscado en el material para resistir los efectos de la cavitación. El estudio de la utilización de microaleantes junto al Manganeso y su correlación con el mecanismo de respuesta estudiado, son la base del desarrollo que se hace en este proyecto.

La conclusión más importante de este estudio es que es posible caracterizar la respuesta del material con un modelo metalográfico sencillo y eficaz, que utiliza equipamiento estándar. Se espera que el conocimiento obtenido en este trabajo permita ser comparado con sistemas hidrodinámicos tipo Venturi y con toda la información obtenida, entonces así iniciar el desarrollo de nuevas aleaciones resistentes al efecto de la cavitación para su aplicación a máquinas hidráulicas (turbinas hidroeléctricas).

5. REFERENCIAS

[1]. Callenaere M, Franc JP. J. Fluid Eng-T ASME. J. Fluid Mech. 2001; 126: 223-256.

- [2]. Sriraman M R, Vasudevan R. J. Mater. Sci. 1998; 33 (11).
- [3]. Spencer K, Embury J D, Conlon KT, Véron M, Bréchet Y. Mater. Sci. Eng. 2004; 387-389; 873-881
- [4]. Han H N, Lee C G, Oh C, Lee T, Kim S. Acta Mater. 2004; 52: 5203–5214
- [5]. Olson G B, Cohen M. J Less-Common Met. 1972; 28 (1): 107-118.
- [6]. Askeland D, Phulé P. Ciencia e ingeniería de los materiales, 4ta Ed. (Mexico): International Thomson Editores S.A., 2004.
- [7]. Faires V, Diseño de elementos de máquinas. Barcelona (España), Editorial Montaner y Simon S.A., 1971.