

25 Modelo para evaluar la resistencia a la cavitación en aceros austeníticos

Carlos Alberto Bello; Patricia Silvana Carrizo

Resumen: Dentro del Departamento de Electromecánica, FRMUTN existe una línea de I+D referida al estudio de los procesos asociados al daño por cavitación. Esta temática tiene relevancia en el ámbito del diseño y en las pautas de operación de las máquinas hidráulicas ya que las reparaciones debidas a este daño pueden ser muy costosas. El propósito de esta línea de I+D es determinar un nuevo modelo semi-empírico para la evaluación de materiales, que permita conocer su resistencia a la cavitación, dando lugar a mejores diseños de materiales resistentes a este fenómeno. Se denota como de vital importancia realizar transferencia de los conocimientos adquiridos esta investigación en cátedra Ciencia de los Materiales, ya que este trabajo tiene una gran relación con los capítulos de Materiales especialmente aceros y con los procesos de Corrosión que también forman parte de esa asignatura, además de la importancia de realizar investigación y transferencia.

Palabras claves: Acero inoxidable austenítico, transformación no difusiva, estructura cristalográfica, deformación, martensita.

1 Introducción

El fenómeno de cavitación somete a los materiales de los componentes de máquinas y dispositivos hidráulicos a condiciones de sollicitación que producen importantes daños. Los métodos de estudio de los mecanismos que hacen que los materiales resistan estas sollicitaciones se valen de estrategias y equipamiento complejo, el grupo de Metalurgia de la UTN en la Facultad Regional Mendoza, en los años 90 desarrolló estudios de estos mecanismos, utilizando estrategias de análisis que requerían equipamiento complejo y tenían un elevado costo, debido a estos motivos los estudios quedaron inconclusos. Este trabajo se muestra una nueva propuesta para caracterizar y evaluar el daño por cavitación, se propone para esto, otras técnicas metalográficas y 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 cavitación (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 liquido se producen valores de presión suficientemente bajas, menores que la presión de vapor a la temperatura del mismo, se producen burbujas rellenas de vapor del liquido siendo esto acentuado por la presencia de gases disueltos y partículas en suspensión las cuales actúan como zonas de nucleación. El flujo arrastra estas cavidades que encuentran condiciones de presión mayor a la del vapor y se produce el colapso de las mismas, en la figura N°1 se representa esquemáticamente el fenómeno y como el colapso de las burbujas produce una interacción con la superficie cercana.

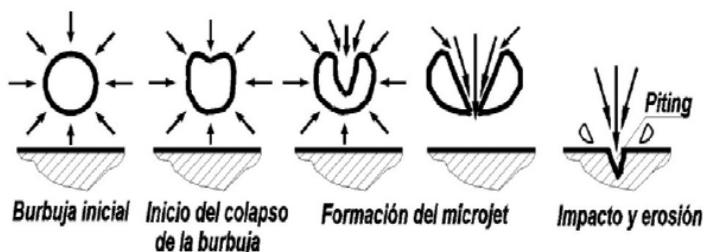


Fig. 1. Etapas de evolución de una burbuja de vapor y su proceso de colapso con la interacción que introduce la superficie del componente. De izquierda a derecha se visualiza una burbuja que inicia su colapso desde su parte superior por los restricciones al movimiento del flujo desde la parte inferior por su cercanía a la superficie, el flujo en movimiento y la implosión de la burbuja acelera el fluido en dirección hacia la superficie generando micro jets que impactan y erosionan.

Este fenómeno se manifiesta en las máquinas que utilizan flujos y produce en el material que está en contacto con el líquido, daños por arranque del material que también asocia procesos de corrosión localizada. Este fenómeno introduce sollicitaciones que deforman al material y lo degradan.

En la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza, durante el desarrollo del proyecto 25/J005 llevado adelante por el grupo de metalurgia, se estudió y trató de caracterizar la capacidad que tienen los materiales para resistir las sollicitaciones que produce la cavitación, se utilizó para hacer la evaluación, mediciones de la energía por falla de apilamiento, estrategia que sigue la misma línea de investigación que Donald Askeland [3] utiliza para el estudio del comportamiento en aceros de estructura austenítica.

Revisando las publicaciones a nivel internacional de estudios realizados sobre este tema, se encuentra que M. Sriraman [2], hizo estudios con aceros inoxidable AISI 304 y aceros 4140 para caracterizar el modo de respuesta de estos materiales y a modo de conclusión sugirió introducir tensión residual de compresión sobre la superficie para aumentarles su resistencia cuando estén expuestos al fenómeno de la cavitación.

Este trabajo se basa en las siguientes hipótesis: a) Si el material admite transformaciones alotrópicas 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 evaluar esta capacidad mediante medición de micro dureza y técnicas metalográficas sencillas.

El nuevo modelo de caracterización y medición propuesto es viable con el equipamiento existente en la Facultad Regional Mendoza y permitiría desarrollar los estudios de diseño de materiales para su utilización en máquinas hidráulicas.

Los objetivos de la investigación son determinar las correlaciones entre las transformaciones no difusivas y los métodos propuestos de evaluación. Como objetivos secundarios se plantea desarrollar protocolos de ensayos mediante estas técnicas para el trabajo de

diseño de materiales resistentes a la cavitación con base en los aceros inoxidables austeníticos.

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

En este artículo se presentan resultados de otras investigaciones y la metalografía de una probeta de acero inoxidable austenítico ensayada mediante la técnica del ultrasonido, donde se observa el modo de respuesta del material.

2. Materiales y Métodos

2.1. Estructura Cristalográfica y Propiedades

El ordenamiento interno de los átomos es la característica esencial del estado cristalino. La simetría externa que presentan algunos cristales no es más que una evidencia de su estructura interna. Las caras externas de un cristal son planos cristalográficos de átomos ordenados. Del mismo modo, las aristas exteriores son líneas de átomos pertenecientes a la red. El tipo de retículo cristalográfico determina muchas de las propiedades físicas y químicas que caracterizan a un metal, como la conductividad, la solubilidad, la resistencia metálica, el coeficiente de dilatación.

A consecuencia de la estructura cristalográfica, los metales presentan distintas propiedades en las diferentes direcciones dentro del cristal. Por este carácter vectorial de las propiedades físicas, se dice que los metales son anisótropos. En cambio los gases, líquidos y sustancias amorfas son isotrópicos. En los cristales que poseen direcciones equivalentes desaparecen las diferencias en las propiedades. Así en el sistema cúbico, la resistividad eléctrica, la conductividad térmica, etc. tienen valores iguales a lo largo de direcciones equivalentes.

El enlace metálico tiene propiedades fundamentales que caracterizan a los metales: la conductividad eléctrica y la plasticidad. De estas propiedades es muy importante la plasticidad; esta propiedad tiene su origen en la equivalencia de

los iones positivos que forman la red y tienen la posibilidad de deslizarse unos sobre otros, cambiando su posición, los planos de átomos de la red pueden deslizarse unos sobre otros y reposicionarse haciendo solamente un cambio de posición con un alejamiento mínimo, sin separarse de la red. El metal se deforma plásticamente como producto del deslizamiento de los planos atómicos dentro de la matriz constituyente.

Las imperfecciones que la red cristalográfica suele presentar tales como hileras incompletas de átomos denominados dislocaciones, vacancias, elementos diferentes, como átomos de un soluto, o elementos intersticiales, son bloqueos al deslizamiento de los planos, muchos de estas irregularidades de la matriz son defectos por falla de apilamiento en la formación de la misma.

Las dislocaciones son defectos de la red, la deformación plástica se realiza por deslizamiento según planos densos gracias al desplazamiento de dislocaciones.

Las dislocaciones son defectos lineales ya que alrededor de la línea de dislocación existe una región de cristal defectuoso en la que la red está distorsionada, el deslizamiento corresponde al desplazamiento paso a paso de las dislocaciones. El deslizamiento entonces depende de la superación de los obstáculos [4].

Como lo expresa Askeland cuando explica la importancia de estos defectos, *“en los materiales, los defectos como las dislocaciones, defectos puntuales y límites de grano sirven como obstáculo a las dislocaciones, Es posible controlar la resistencia metálica controlando la cantidad y el tipo de imperfecciones”*. La propiedad de plasticidad varía, con la estructura cristalográfica. Los metales que cristalizan en el sistema cúbico de caras centradas presentan valores de mayor plasticidad. Cuando se trata de aleaciones de dos o más metales, cuanto más simple y simétrica sea la estructura cristalográfica de la aleación, mayor será la facilidad de deformación plástica. En cambio en estructuras complejas, donde la red cristalográfica es poco simétrica, las propiedades de la aleación se acercan cada vez más a las sustancias amorfas: disminuye la plasticidad, aumenta la resistencia mecánica y la dureza.

2.2. Procesos no difusivos, transformaciones martensíticas por deformación plástica.

Las estructuras cristalográficas de una aleación metálica varían en función de los componentes y la temperatura, un cambio de temperatura produce un cambio de fase por lo que los átomos se reordenan, en la mayor parte de estas transformaciones de fase juegan un papel fundamental los procesos difusivos. Pero, existen transformaciones inducidas por otros mecanismos que se las denomina “transformaciones no difusivas”, en ellas los movimientos atómicos individuales son más cortos que un espaciado atómico, siendo también muy ordenado el movimiento atómico.

Entre las transformaciones difusivas, para los aceros de medio y alto contenido de carbono y como producto de un tratamiento térmico de temple se encuentra la transformación martensítica. Por extensión se denominan transformaciones martensíticas a procesos donde las características de las fases inicial y final, los movimientos atómicos y cambios de simetría que ocurren, son similares a las observadas en la obtención de aceros martensíticos.

Algunos aspectos fundamentales de esta transformación:

- a. sólo son posibles en estado sólido.
- b. puesto que no hay difusión, la composición de la fase producto es igual que la de la de fase inicial.
- c. no se modifica el orden de la fase de partida. Si inicialmente se tiene aleación ordenada, la fase producto estará también ordenada.

Esta transformación involucra el movimiento cooperativo de un número grande de átomos. La transformación comienza espontáneamente a una temperatura a la que la fase inicial deja de ser estable mecánicamente, hay entonces una fuerte influencia de las tensiones mecánicas (deformación) en los procesos martensíticos.

Cuando a temperatura ambiente, se ejerce una sollicitación sobre un material metálico éste sufre deformación, si la intensidad de la carga aplicada es de pequeño valor, una vez que cesa el

esfuerzo, el material recupera su forma primitiva, a este tipo de deformación se la denomina deformación elástica. Con cargas aplicadas de mayor valor, el material no recupera su forma primitiva y se dice que ha sufrido una deformación plástica.

Durante los procesos de deformación plástica, el retículo cristalográfico de la aleación sufre distorsiones que aumentan la energía interna del material, este aumento de energía suministra la energía interna de nucleación de una nueva fase [5]. La transformación martensítica por deformación tiene además influencia en la propagación de grietas por fatiga. El cambio de volumen que se produce en la transformación puede llevar a un efecto de cierre de grieta que disminuye la velocidad de propagación de las mismas 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 [6].

2.3. Aceros inoxidables austeníticos.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen un amplio rango de composiciones químicas. Los principales elementos de aleación son: Cromo (Cr), Níquel (Ni) y Molibdeno (Mo), pero otros elementos contribuyen a diversas propiedades y tienen un porcentaje bajo de carbono ($C < 0,08\%$), el rango del cromo puede oscilar entre el 16 hasta el 28 % y el contenido de níquel de 3,5 a 32 %.

Esta clase de aceros tiene una característica de no aceptar temple y no presentan punto de transformación a temperaturas por encima de la ambiente, o sea, que todos los aceros de esta clase están constituidos por una sola fase y conservan siempre a la temperatura ambiente su estructura austenítica.

Los aceros inoxidables austeníticos metaestables son materiales de ingeniería que debido a su resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas, tienen elevada ductilidad en estado recocido y la característica de endurecerse durante la deformación en frío, alcanzando valores de resistencia a tracción

de 2 GPa. Estas propiedades se atribuyen principalmente a la transformación martensítica inducida por deformación. Tienen una estructura austenítica en estado recocido, pero sufren transformación parcial a fase martensítica durante los procesos de deformación.

2.4. Estudios efectuados y experiencias internacionales.

El Laboratorio de Metalurgia de Facultad Regional Mendoza de la UTN, desarrolló en los años 90´ estudios de daño por cavitación utilizando recargues por soldadura sobre aceros inoxidables austeníticos, se buscaron elementos de aleación que generaran las condiciones endurecimiento por deformación en el material expuesto a la cavitación.

Las probetas se fabricaron a partir de una chapa de acero inoxidable de 25mm de espesor, con un recubrimiento por soldadura de aproximadamente 10 mm, luego se cortaban en sectores de cara cuadrada y mecanizaba hasta obtener la superficie soldada en la cabeza de la probeta para ser estudiada mediante estos ensayos. La aleación usada se diseñó junto con personal de CONARCO para hacer recargues mediante soldadura sobre un sustrato de acero inoxidable 18-8 (18,8 % Cr; 8,13% Ni y 1,75% Mn) con adiciones de cobalto, tungsteno y manganeso.

Los resultados obtenidos en este proyecto fueron parciales, no se lograron terminar los estudios y no se encuentran estudios metalográficos de perfiles de matriz en corte transversal de probetas. Se estudió mediante microscopio electrónico de barrido la superficie y se trataron de hacer mediciones de energía por falla de apilamiento mediante microscopía de transmisión con escasos resultados.

Otros estudios en ese sentido fueron hechos por M. Sriraman, R. Vasudevan, donde tomaron en cuenta el radio de las cavidades formadas en el material sometido a la cavitación mediante el recurso de un parámetro formulado por ellos que es la evaluación del tiempo de colapso, definido proporcional al radio inicial de la cavidad, la densidad del líquido y la presión hidrostática de colapso, mediante la expresión:

$$t = R_0 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (1)$$

Este ha demostrado no ser un método confiable, ya que las cavidades no son todas homogéneas y los tiempos en los que se producen son diferentes, puede verse esta situación en la fig N° 2



Fig. 2. Fotografía de cara de probeta ensayada mediante método de ultrasonido, se observan cavidades de conformación irregular uniformemente distribuidas, borde sin deterioro.

Otros estudios utilizaron el efecto de la deformación plástica de un metal que produce cambios en los perfiles de difracción, ya que aumenta el tamaño de las deformaciones internas, especialmente con lo relacionado a la micro deformación, el aumento de la densidad de dislocaciones, la probabilidad de falla de apilamiento y la energía de falla de apilamiento [7] estudiado mediante la difracción de rayos X.

Es de notar que todos estos estudios referencian la energía por falla de apilamiento relacionada con los las dislocaciones y como esto induce transformaciones no difusivas durante la deformación.

3. Resultados

A partir de un espécimen ensayado a la cavitación por ultrasonido, se realizó el estudio metalográfico en el Laboratorio de Metalurgia de UTNFRM. Se hizo el corte transversal y la inclusión de la probeta en un bloque de resina, se pulió por método clásico hasta lija #1200, el ataque se hizo en solución de ácido oxálico al 10% en baño electrolítico, en la micrografía que se puede observar en la fig N° 3. A la derecha de la imagen se aprecia el daño superficial producido por la cavitación y el crecimiento del deterioro desde la cavidad hacia el interior del material, a la izquierda se aprecia la estructura austenítica de la matriz y cercana a la zona del borde dañado, el crecimiento de agujas de transformación martensítica que ha sido inducida por la deformación plástica producida por la interacción del fluido que cavita con la superficie de la probeta.



Fig. 3. Corte transversal de la probeta sometida a cavitación, luego de ser previamente pulida a espejo e incluida en bloque de resina, en la fotografía esta probeta se encuentra en cubeta donde se le hizo el baño electrolítico. Laboratorio Metalurgia UTNFM.



Fig. 4. Metalografía de borde en probeta ensayada a la cavitación mediante la técnica de ultrasonido. Laboratorio de Metalurgia de UTNFRM, aumento 100X, ataque en baño electrolítico de solución de ácido oxálico al 10%.

Se puede apreciar en la imagen, el efecto que se produce en el material por el efecto de la deformación superficial, hay una capa que ha sufrido una transformación martensítica por deformación y por debajo de esta capa la matriz se mantiene austenita que presenta características de tenacidad.

Un análisis químico mediante espectrometría hecho a la probeta estudiada, dio los siguientes resultados de la tabla N°1

Tabla 1. Componentes del material de soldadura ensayado en probeta de cavitación del proyecto 25/J005 *Materiales para componentes de turbina hidráulicas*. Ensayo mediante espectrómetro de chispa marca Spectrosort que funciona mediante el mecanismo de espectroscopía de difracción óptica, perteneciente al Laboratorio de Metalurgia, UTNFRM.

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 de la probeta estudiada fue realizada mediante aporte de soldadura y responde a un diseño que cumple con lo observado en la revisión de la literatura y publicaciones internacionales. Tiene aleantes como por ejemplo: cromo, cobalto, titanio y manganeso, que producen un aumento de las dislocaciones y defectos en la red cristalográfica y lo hacen

susceptible de presentar transformaciones no difusivas por deformación.

Considerando las condiciones de fatiga que se desarrollan en la superficie expuesta, se hizo un análisis utilizando el criterio expuesto por Faïres [8] para la determinación de los límites de fatiga en función de la dureza en aceros inoxidable austeníticos, se calculó la dureza que presentaba el acero inoxidable austenítico con que están hechas las probetas, estas rompían por fatiga en un defecto asociado a construcción de las mismas, para este análisis se utilizaron valores que se muestran en un artículo complementario a este, con estos datos obtenidos del análisis efectuado se obtuvieron utilizando las ecuaciones que propone Faïres, ec. 2 y 3.

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

$$\sigma'_{fl} = 0,4S_u \quad (3)$$

El valor obtenido fue de $S_u = 25512 \text{ kgf/cm}^2$ que a partir de estas ecuaciones permitió determinar una dureza equivalente para este material de 770 HBr, esta dureza es alta y es atribuible a un acero templado y se explica solamente con la presencia de una estructura martensítica. Como estas probetas tienen un material tipificado como austenítico y no son pasibles de ser templadas, esta circunstancia sólo puede explicarse como producto de un proceso de transformaciones no difusivas, anteriormente explicadas.

4. Discusión

Los antecedentes sobre los procesos de transformaciones no difusivas y los efectos de los aleantes en estos procesos muestran la conveniencia de desarrollar materiales con este comportamiento para hacer frente al proceso de deterioro que induce la cavitación.

Los elementos de aleación utilizados en los aceros como el cromo, el cobalto, el titanio, distorsionan la red cristalográfica y representan un obstáculo al desplazamiento de dislocaciones y de

planos de átomos, por ello aumentan la resistencia a la deformación plástica del material.

La habilidad de los aceros inoxidable de estructura austenítica, de presentar un endurecimiento por deformación a causa de un proceso no difusivo el cual es un comportamiento bastante adecuado para resistir los efectos de la cavitación sobre los componentes de las máquinas hidráulicas.

La transformación martensítica en la capa superficial de la probeta observada, muestra este mecanismo, y de desprenderse la capa endurecida superficial por efecto de las sollicitaciones, la matriz queda expuesta y se vuelven a producir en ella las transformaciones no difusivas y entonces el material se endurece nuevamente por transformación martensítica, en definitiva el material se auto protege de las sucesivas sollicitaciones.

También la resistencia al desgaste de este material se debe a la presencia de un substrato dúctil por debajo de las capas de martensíticas formadas por el mecanismo expuesto, y por ello el acero austenítico conserva su capacidad de absorber la energía de deformación y el desgaste ocurre por la fractura de la capa de martensítica a medida que las burbujas de vapor chocan de manera consecutiva.

Por lo tanto, el mejor comportamiento mostrado por el acero de estructura austenítica, según Donald Askeland [9] se debe a su capacidad de endurecimiento por deformación plástica en frío mediante la transformación de la estructura austenítica en estructura martensítica en la capa superficial y la presencia de un substrato dúctil austenítico capaz de absorber energía por deformación.

La metalografía de la figura permite visualizar el mecanismo que se discute aquí como conveniente para los materiales sometidos a la cavitación, y permite hacer una evaluación cualitativa de su respuesta, y es necesario cuantificar esta respuesta, por lo tanto se propone determinar los espesores de la capa endurecida y las propiedades de las misma, un método posible para determinar estas propiedades es a través de una propiedad fácilmente cuantificable como es la dureza. Esta propiedad de los aceros está estrechamente relacionada con el *máximo esfuerzo* o

resistencia a la tracción del acero con una relación expresada por Faïres [8]

Será necesario determinar perfiles de microdureza de la capa superficial y el sustrato del material ensayado. Para desarrollar esta técnica de evaluación es recomendable desarrollar una ecuación de cuantificación en función de los valores de dureza, de sus distancias a la superficie y su correlación con los tiempos en que se producen un determinado desgaste.

5. Conclusiones

Las transformaciones martensíticas por deformación plástica que producen el comportamiento de los aceros inoxidables austeníticos, son el efecto buscado para resistir las sollicitaciones que este proceso de deformación introduce en los componentes de las máquinas hidráulicas.

El estudio metalográfico del corte transversal de la probeta, realizado en Laboratorio de Metalurgia de FRMUTN, mostró la presencia de transformación martensítica del material en la superficie expuesta. Por debajo de la capa que presenta la transformación no difusiva, el material mantiene su estructura austenítica de características muy tenaces.

El análisis químico de la probeta muestra la presencia de Manganeso como elemento de aleación importante, éste se comporta como estabilizador de la fase austenítica, confiriéndole tenacidad y posibilita el aumento de El manganeso detectado en el análisis explica muy bien la característica de este material para endurecerse por deformación y como su presencia en la aleación actúa como formador de estructura austenítica, garantiza la tenacidad de la matriz.

Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado y forma parte de los estudios del Proyecto de Investigación 25/J062 sobre *Caracterización de la cavitación en componentes hidráulicos y de su influencia durante la interacción entre el flujo y la estructura del componente*. Se agradece al personal del grupo DIDEME por sus aportes y bibliografía en mecánica de materiales, grupo GAM del laboratorio de Materiales, departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Buenos