

## 23 Estudio de condiciones de validez de un modelo para ensayos de cavitación por ultrasonido

Carlos Alberto Bello; Miguel Ángel Mattolini; Alfredo Amico

**Resumen:** El propósito de este trabajo fue estudiar las condiciones de validez de la norma ASTM-G32/09 para ensayos de cavitación por ultrasonido. Durante la realización de ensayos, se encontró que las probetas de acero inoxidable austenítico presentaban una rotura sistemática aun cumpliendo con la norma. Este trabajo muestra el estudio de esa situación a partir de las teorías de fatiga, lo que permitió determinar una condición límite de resistencia para el material ensayado. Se utilizaron modelos de cálculo clásico y de modelado numérico para detectar las condiciones de falla. Se encontró que la norma no cubría las condiciones necesarias para el material estudiado. En consecuencia, para evitar la rotura de las probetas se cambiaron las condiciones del ensayo. Además, el trabajo cumplió con el objetivo académico de incorporar métodos de modelado, cálculo numérico y simulaciones para transferir esta experiencia a las asignaturas de la carrera.

**Palabras claves:** Ensayo por ultrasonido, sollicitación, probeta normalizada, método numérico, martensita.

La cavitación se define como una nucleación repetida, crecimiento y colapso violento de burbujas en un fluido donde se dan condiciones de presiones fluctuantes por acciones de vibraciones o patrones de flujo en un sistema.

En la Facultad Regional Mendoza se estudia este fenómeno y sus interacciones y modo de respuesta de los materiales en el proyecto 25/J059 por los Grupos LAMA, Metalurgia y DIDEME mediante distintas técnicas de cavitación inducida: a) con una probeta sumergida en el fluido, que se mueve mediante un dispositivo piezoeléctrico estimulado por una fuente de señal alterna; b) algún tipo de ensayo de flujo real sobre una probeta como ser un dispositivo venturi donde las probetas se colocan en la garganta del mismo donde se producen las condiciones de baja presión; c) y en el último tiempo, métodos numéricos que

permiten generar modelos para simular el fenómeno y determinar condiciones del fluido y el componente que lo contiene (rodete de bombas, turbinas, asiento de la válvula, carcasa, difusor).

Este trabajo muestra el estudio de un problema relacionado con los ensayos que utilizan la técnica de ultrasonido, donde se utilizaba la Norma ASTM G-32 "Método Estándar de Ensayo de la Cavitación Erosión usando un dispositivo de Vibración.

Debido a la recuperación del banco de ensayos por ultrasonido que se lleva adelante para su utilización en el proyecto 25/J059, se están desarrollando tareas de adecuación de infraestructura para el montaje del sistema piezoeléctrico que necesita un sistema de posicionamiento preciso y estable, se estudió además la condición que producía roturas de las probetas en el cuello de la rosca haciendo fracasar los ensayos repetidamente durante las actividades de investigación del citado proyecto.

La hipótesis que trata de explicar estas fallas reiteradas en probetas normalizadas es que la masa de la probeta es lo suficientemente grande como para inducir una falla por fatiga de gran número de ciclos.

El objetivo de este estudio, fue determinar la causa de fallas de las probetas durante el ensayo y obtener una justificación teórica que permitiera explicar porque apartarse de la norma que regula estos ensayos.

### **Fallo en probetas bajo norma ASTM G32**

Los ensayos se hicieron en un montaje sobre soporte regulable, que posiciona el transductor piezoeléctrico con la probeta montada en la punta y sumergida el 50 % de la cabeza de la misma en el fluido de ensayo, en este caso agua desmineralizada.

El montaje se esquematiza en la figura Nº 1 donde se muestra el esquema de trabajo y las partes constitutivas del equipamiento.

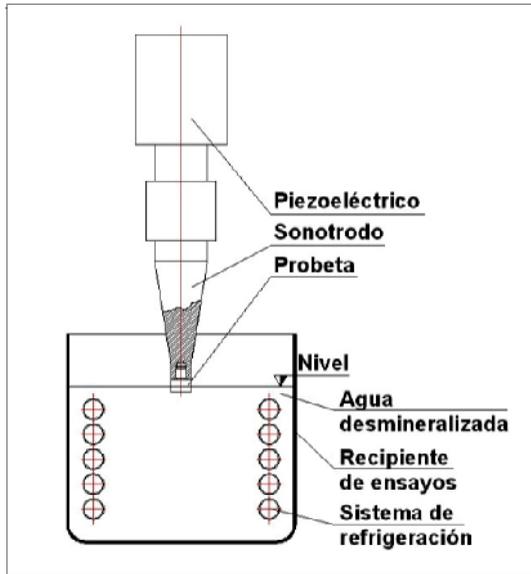


Fig. 1. Montaje de ensayo bajo la norma ASTM G32. El dispositivo de ensayo soporta la probeta en el extremo del sonotrodo y la mantiene dentro del fluido, fuente propia.

El dispositivo piezoeléctrico a través del Sonotrodo fuerza a la probeta en sentido vertical con un movimiento oscilatorio de 20.000 ciclos por segundo, debido al rápido movimiento que el transductor impone a la cara en contacto con el agua, esta se ve imposibilitada inercialmente de seguirla, produciéndose en la capa inmediata a esta cara, la aparición y desaparición de presiones por debajo de la presión de vapor del fluido de ensayo a esa temperatura, como la amplitud de la oscilación es muy pequeña, cada ciclo de oscilación vertical hace aparecer e implotar pequeñas burbujas de vapor en la cercanía del material que se ensaya.

El resultado de ensayos desarrollados, mostró que las probetas fabricadas con las dimensiones que define la norma ASTM G32 (ASTM Standards: 1994) se rompían en un tiempo promedio de 2 minutos de comenzar el ensayo, el dispositivo que produce el movimiento del espécimen es un transductor piezoeléctrico que

opera mediante la excitación de una fuente con onda senoidal alterna. A la frecuencia de trabajo, el tiempo medio encontrado para la rotura de las probetas en el cuello equivale aproximadamente a 2.400.000 ciclos.

Se plantearon dos hipótesis que permiten describir y determinar la condición de falla y posterior reelaboración de condiciones de ensayo:

H1: El tipo de carga a la se somete el cuello de la probeta responde a las condiciones de fatiga.

H2: La falla se está produciendo en condición límite por lo que reducir un pequeño porcentaje de la carga hace desaparecer la condición de falla.

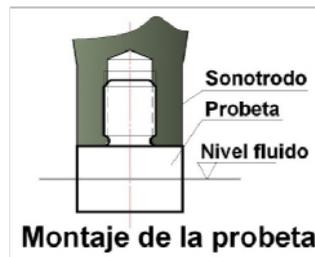
Se analizó la situación mediante tres procesos: a) estudio y cálculo de las solicitaciones considerando las cargas de montaje roscado y la carga inercial; b) cálculo clásico a partir de las teorías de falla por fatiga; c) calculo mediante simulación numérica a través de programa Solid Works y modulo de cálculo Cosmos.

Análisis de la condiciones de carga de fatiga mediante protocolo de ensayo bajo norma ASTM G32.

La norma especifica las dimensiones, las precargas de montaje que mantiene a la probeta sujeta durante el ensayo y la posición en el fluido, esta última condición es para evitar que durante el ensayo no se introduzca fluido en la junta de montaje y produzca el deterioro de las superficies en contacto y la rosca de montaje, en la figura N°2 se muestran estas condiciones.



2a



2b

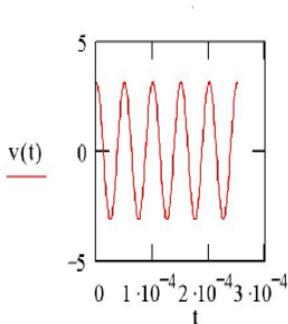
Fig. 2. Dimensiones (2a) y montaje de probetas (2b), fuente norma ASTM G32.

Según el protocolo que especifica la norma para los ensayos, la amplitud de oscilación de la probeta es de  $50\mu\text{m}$ , la posición, velocidad y aceleración de las probetas se puede determinar con el modelo del movimiento mediante la representación de un sistema armónico simple, a continuación se identifican las variables a usar, utilizando el sistema Técnico de unidades y definiendo ciertas unidades de forma conveniente por su uso común:

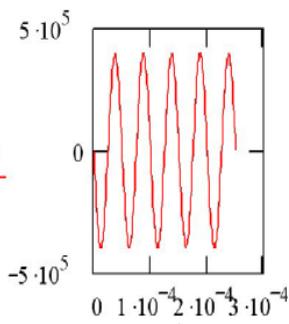
El equipo que excita al piezoeléctrico genera una onda senoidal, por lo que la velocidad y aceleración se obtienen del modelo que describe el movimiento armónico simple y responden a las funciones temporales, que se deduce derivando la función posición, estas funciones (E. Gettys; F. Keller; M. Skove.: 1994) para la aceleración las ecuación (1).

$$a = -w^2 \frac{A}{2} \sin(wt) \quad (1)$$

Para los valores que define la norma, la oscilación tiene una amplitud  $A=0,00005\text{ m}$ ; la frecuencia es  $f=20.000\text{ Hz}$ , tomando un tiempo de ensayo de 2 minutos, el número de ciclos  $n=2.400.000$  ciclos, el movimiento queda caracterizado como muestran los gráficos de la Fig 3a y 3b dando valores máximos para la aceleración de  $a_{\text{max}}= 3,94 \times 10^5\text{ m/s}^2$



3a

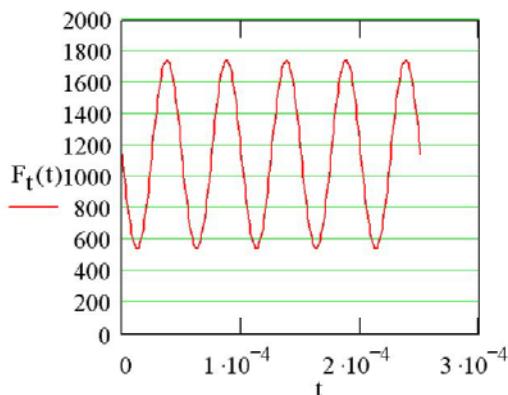


3b

Fig. 3. Diagrama del movimiento de la probeta: a) velocidad en función del tiempo; b) aceleración en función del tiempo, cálculo mediante soft MathCad, fuente propia.

Para un peso de cabeza de probeta de  $P=0,015$  Kgf, la aceleración calculada produce la masa correspondiente, una fuerza inercial  $F_i=599,17$  Kgf que deberá ser soportada por el cuello de la probeta. Además de esta fuerza el cuello debe mantener la presión de ajuste de superficies para evitar que se afloje la unión roscada, la norma define como fuerza de apriete  $F=1147$  Kgf a través del torque de montaje o precarga de  $T=15$  Nm = 1,529 Kgf·m.

Este valor de carga de montaje sumado a la carga inercial somete al cuello de la probeta a cargas variables cíclicas no alternativas, en la figura N°4 se muestra como la condición de carga hace que el material sea solicitado a condiciones de fatiga con carga periódica, variable no alternativa.

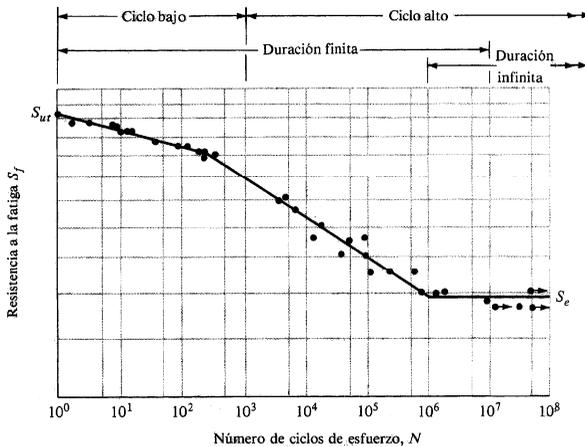


**Fig. 4.** Diagrama cargas a que se somete el cuello de la probeta, la carga total es la precarga de montaje mas la sollicitación inercial que depende de las condiciones del movimiento que es periódico, la fuerza se mide en Kgf.

La tensión estática asociada a la carga máxima, en función de la sección resistente toma un valor  $\sigma_{\max}= 5513$  Kgf/cm<sup>2</sup> siendo su amplitud fluctuante como lo expone Antonio González Arias (González Arias: 1982). El caso está en todo de acuerdo a los

ensayos de fatiga y se puede analizar siguiendo las curvas de Wöhler (Shigley: 2004) donde se grafican las tensiones de falla de un material en función del número de ciclos, ver figura N° 5.

Esta curva muestra que para los aceros con tensiones de trabajo a partir de límite definido por la curva entre los  $10^6$  y  $10^7$  ciclos el material presenta una condición límite, donde no hay una definición clara del punto a partir de donde la vida es infinita, luego de  $10^7$  ciclos el material presenta una condición de vida infinita y se considera que no falla por fatiga. En primera aproximación, puede decirse que el caso estudiado muestra que la falla se está produciendo con un número de ciclos en esta zona del diagrama, en realidad el diagrama está representado en escala logarítmica y muestra un cambio de pendiente a los  $10^6$  ciclos, el cambio no es abrupto, condición por su representación logarítmica, además la variación a partir de ese valor es muy pequeña y no puede ser representada a esta escala.



**Fig. 5.** Diagrama de resistencia a la fatiga para materiales ferrosos, fuente NACA tech. Note 3866, diciembre de 1966.

Lo anterior nos muestra que el material de la probeta está trabajando al límite de la tensión de fatiga en el campo de muy baja variación, esta condición permite deducir que para que no se produzca la falla, solamente es necesario disminuir el valor de

tensión en un porcentaje pequeño y así mantener la tensión por debajo del valor límite de fatiga.

Se efectuó una búsqueda sistemática de los valores de tensión de fatiga para el acero con que fueron construidas las probetas, se detectó que no se muestran registros inclusive en textos clásicos reconocidos internacionalmente como ser el de Virgil Moring Faires (Faires: 1971) e incluso en el ASM Handbook (ASM INTERNATIONAL: 1990).

Para este caso, si se analiza los valores de la carga aplicada, se puede ver que la carga de montaje no se puede reducir sin introducir el riesgo de perder la sujeción de montaje, el valor de la fuerza inercial es grande, por lo que reducir la fuerza inercial de la probeta, es la solución más simple, pero para ello es necesario reducir la masa de la cabeza de la probeta, esto implica reducir las dimensiones definidas por la Norma ASTM G32, esto muestra como la condición estipulada en la norma tiene validez para hacer ensayos con probetas que sean sometidas en su cuello a tensiones de fatiga menores que la límite para el tipo de material con que está construida la probeta, también debe considerarse en el material el comportamiento sensible a la fatiga.

### **Determinación de los parámetros de fallo por fatiga.**

Se hizo un análisis de las condiciones de fatiga presentes en los ensayos, para este estudio se buscaron datos del material en bibliografía específica y se encontró que hay una falta de precisión en los datos para el material de referencia, esto impone la necesidad de determinar cuáles son realmente los valores de tensión a que se somete el material en el cuello de la probeta y sacar conclusiones sobre la condición de falla a partir de este análisis.

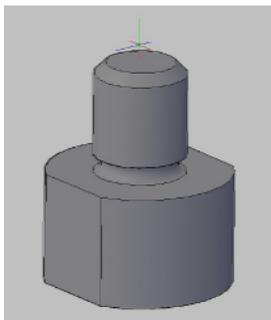
La resistencia de materiales ha obtenido que tres son los factores básicos que se requieren para que se dé una falla por fatiga: a) un esfuerzo de tensión suficientemente grande, b) una variación de esfuerzo de suficiente amplitud y c) un número de ciclos de aplicación de la carga suficientemente elevado.

La rotura por fatiga comienza en las zonas de máxima sollicitación, en general en la superficie, en puntos arbitrarios como ser, deslizamientos en planos de corte de los cristales

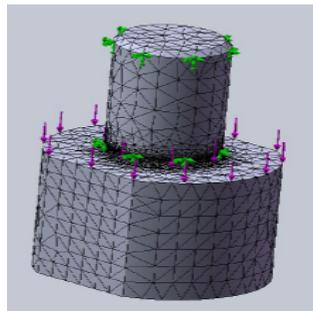
cuando están orientados de manera conveniente, imperfecciones en la red cristalina de la aleación tales como inclusiones, rechupes, microrechupes, corrosión o segregaciones a borde de grano o en puntos triples.

En el caso estudiado la amplitud es constante, se superpone con la precarga de apriete de montaje y es un caso bastante común y muy estudiado (González Arias: 1982). Se hizo también un estudio de modelación numérica utilizando un soft de cálculo mediante FEM (elementos finitos) y determinar los valores de tensión máxima esperada en el lugar de las roturas encontradas.

El estudio se hizo utilizando inicialmente un mallado estándar, posteriormente se utilizaron varias estrategias de mallado hasta lograr la convergencia de los resultados, la misma se obtuvo definiendo un mallado adaptativo utilizando el modelo de restricción del error para la energía de deformación, este está basado en la teoría de la máxima energía de distorsión de Von Mises para la falla en materiales dúctiles (Seely, F.; Smith, J.: 1977).



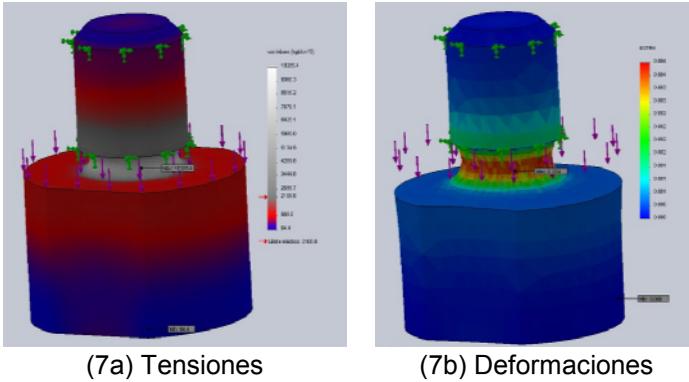
(6a) Modelo



(6b) Mallado de discretización

**Fig. 6.** Modelo sólido (6a) y mallado de discretización (6b) con control de mallado en entalla por cambio de diámetro de probeta normalizada, se pueden observar las restricciones colocadas y la condición de carga, fuente propia.

Los resultados se pueden observar en los gráficos obtenidos en la figura N° 7.



**Fig. 7.** Resultados de simulación mediante modelado numérico “COSMOS”, la tensión máxima se encuentra en el cuello de la probeta y es de 10205 Kg/cm<sup>2</sup>, el límite elástico definido para el material aparece señalado por una flecha roja y está muy por debajo de la tensión definida como máxima en la entalla, fuente propia.

En una pieza de elementos de máquinas el límite de fatiga puede ser muy diferente al de una probeta ensayada del mismo material, hay muchas razones para ésta diferencia; por ejemplo, la pieza de máquina puede que no tenga la superficie pulida, que tenga puntos de concentración de tensiones o puede que opere a altas temperaturas. Para tomar en cuenta dichas diferencias es que el límite de resistencia a la fatiga del material, obtenido en los ensayos  $\sigma'_{fl}$  se modificará por medio de factores que tomarán en cuenta cada uno de los distintos aspectos, con el objeto de que se cuente finalmente con el límite de resistencia a la fatiga real (Shigley: 2004):

$$\sigma_{fl} = K_a K_b K_c K_d K_e K_f \sigma'_{fl} \quad (6)$$

Todos estos factores son empíricos y se obtienen por ensayos. No es posible desarrollar el cálculo mediante este método, no se cuenta con el valor de la tensión de rotura por fatiga para el acero estudiado (Faires: 1971) y se considera una falla por fatiga de gran número de ciclos.

El factor de concentración de tensiones para el tipo de entalla que tiene la probeta, según Peterson (Pilkey, W; Pilkey, A.: 2008) para el caso en estudio, es función de la relación  $r/d$  y  $D/d$  de las dimensiones de la probeta tiene un valor de  $K_t = 2,5$ , que aplicado al valor obtenido los valores de tensión estática en el cuello de la probeta son de  $4741 \text{ Kgf/cm}^2$  y afectados por el coeficiente de concentración de esfuerzo, arroja un valor de  $11854 \text{ Kgf/cm}^2$  valor muy cercano al determinado mediante la simulación numérica.

Utilizando el criterio expuesto por Faies para la determinación de los límites de fatiga en función de la dureza en aceros inoxidables austeníticos. El valor obtenido fue de  $S_u = 25512 \text{ kgf/cm}^2$  que permite hallar un valor de dureza equivalente para este material de 770 HBr, dureza que corresponde con la alcanzada por los aceros templados y se explica solamente con la aparición de estructuras martensíticas (Spencer K., et al. 2004), inducidas por mecanismos de las transformaciones no difusivas.

## **Conclusiones**

Se concluye que la aplicación de la norma ASTM G32, utilizada en ensayos de cavitación por ultrasonido, donde el material ensayado es denso y presenta sensibilidad a la entalla, presenta inconvenientes, este es el caso analizado del acero AISI 304.

Se hace necesario disminuir la carga inercial de la cabeza de la probeta para hacer que el material presente tensiones por debajo del límite de fatiga en el caso estudiado. Para obtener esta reducción de masa debe disminuirse la altura de cabeza de la misma, de hecho esto se efectuó y los ensayos pudieron ser hechos sin que mediara nuevamente la falla.

Los valores hallados de tensión de rotura obtenidos en la caracterización de la falla mediante el cálculo clásico y la simulación, son característicos de los alcanzados por los aceros templados que presentan estructuras martensíticas.

## **Bibliografía**

- ASTM Standards (1994). Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. U.S.A., ASTM edition.
- E. Gettys; F. Keller; M. Skove. Física clásica y moderna. México D.F., editorial Mc Graw Hill; México; 1994.

- González Arias, A. (1982). Laboratorio de ensayos industriales. Buenos Aires, Litenia.
- Shigley, E (2004). Diseño en Ingeniería Mecánica, México, Mc Graw Hill.
- Faires, V. M. (1971). Diseño de elementos de máquinas. Barcelona, Edit Montaner y Simons
- ASM HANDBOOK (1990). Properties and selection: Irons Steels and High-Performance Alloys, Vol.1 10th ed. U.S.A., ASM.
- Seely, F.; Smith, J. (1977). Curso superior de resistencia de materiales. Buenos Aires, Nigar S.R.L.
- Pilkey, W; Pilkey, A. (2008). Peterson'S. Stress Concentration Factors. New York, John Wiley & Sons
- Spencer K., et al. (2004); Strenghtening via the formation of strain-induced martensite in stainless steel. Materials Science and Engineering.

\* \* \*