

MODELADO DE PROBETAS ESTANDARIZADAS PARA ENSAYO DE FATIGA EN ALTAS FRECUENCIAS

Cristian E. Carrizo, Carlos A. Bello y Cristian Giner

*Grupo DIDEME, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 273,
5502 Ciudad Mendoza, Argentina, cab@frm.utn.edu.ar*

Palabras Clave: Simulación numérica, ensayo de fatiga, caracterización de materiales, elementos finitos, ultrasonido, probeta.

Resumen. El objetivo del presente trabajo fue determinar mediante herramientas de simulación numérica el diseño óptimo de una serie de probetas, que permita reutilizar un banco de ensayo de cavitación bajo norma. Este banco utiliza un transductor que somete a las probetas a un movimiento oscilatorio mediante una excitación de alta frecuencia para producir cavitación en un fluido. El movimiento que el sonotrodo impone a la probeta genera fuerzas inerciales importantes y permite ser utilizado para solicitar axialmente a una sección de probeta diseñada a tal fin, con condiciones de carga oscilante, creando así la posibilidad de ensayar la condición de fatiga de alto número de ciclos en tiempos cortos. La validación inicial de los modelos numéricos utilizados se hizo contra modelos teóricos clásicos para falla por fatiga producida por cargas axiales cíclicas, utilizando curvas de fatiga de materiales de caracterización conocida experimentalmente. Una vez finalizado el trabajo de validación utilizando materiales ya caracterizados, se hará una validación experimental mediante el equipamiento existente de modo de verificar la correlación de modelos y ensayos. Logrado esto mediante las probetas diseñadas y los protocolos de ensayo desarrollados se aplicará el método de caracterización para materiales y aleaciones que aún no han sido estudiados. Este trabajo permite también desarrollar estrategias de modelización y criterios de utilización de simulaciones mediante elementos finitos en miembros del grupo de trabajo, útiles en el contexto de un proyecto educativo, denominado Potenciación del uso de herramientas numéricas en el área de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fue estudiar y determinar mediante herramientas de simulación numérica el diseño óptimo de una serie de probetas, que permita reutilizar un banco de ensayo de cavitación bajo norma. El equipamiento existente consta de:

- Equipo Generador de onda con frecuencia de 20Khz Marca Branson 900BC modelo 910 BC con Transductor Piezoeléctrico con Sonotrodo amplificador de onda.
- Banco de ensayo con mecanismo de posición de altura.
- Equipamiento de refrigeración por aire del transductor

Este equipamiento que fue utilizado en un proyecto de caracterización de fallas de material por cavitación. A partir de problemas de ensayo por roturas reiteradas de probetas en dicho proyecto se planteó la sospecha de que esas roturas se debían a condiciones de fatiga, .

1.1. ANTECEDENTES

Durante un proceso de estudio de materiales donde se encararon los citados ensayos normalizados bajo ASTM G32 (ver Figura 1) apareció una condición de falla no esperada en probetas normalizadas.

Los estudios e hipótesis que se hicieron, mostraron que la falla era producto de una carga inercial producida por la masa de la cabeza de la probeta que sometía al cuello a condiciones de fatiga produciendo la rotura a los 2 minutos de iniciado el ensayo, este tiempo de ensayo implicaba 2400000 ciclos aproximadamente. (ver Figuras 2a, b).

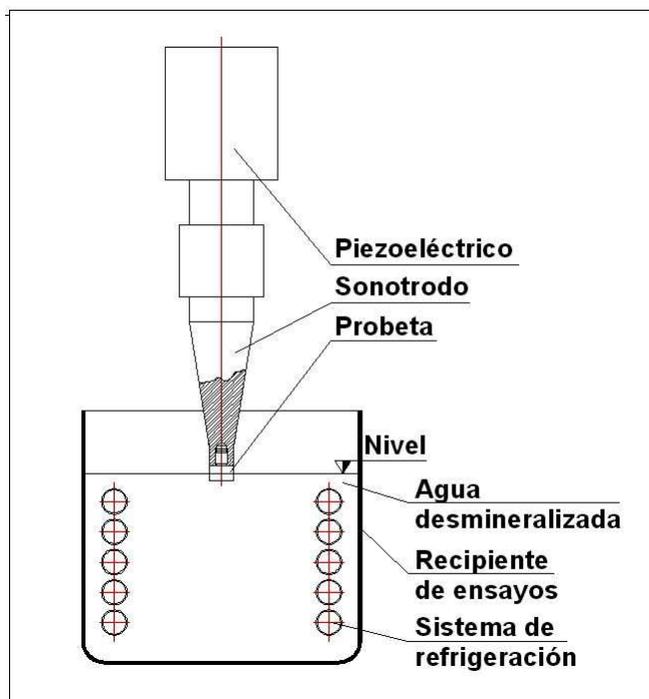
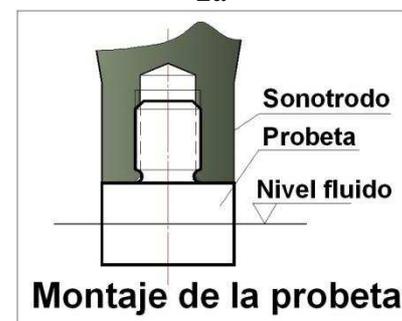


Figura 1: Montaje de ensayo bajo la norma ASTM G32. Fuente propia



2a



2b

Figuras 2: Dimensiones (2a) y montaje (2b) de probetas normalizadas según norma ASTM G32. Fuente propia

Los parámetros de dicho ensayo

Material = Acero AISI 304

Masa de la cabeza = 15 gr.

Precarga de Montaje = 15 Nm

Tiempo de Colapso = 120 s. (N = 2.400.000 ciclos)

Frecuencia de Oscilación axial forzada del Sonotrodo = 20 kHz

Amplitud de Oscilación de ciclo completo invertido = 50 μm

Aceleración por Oscilación armónica simple = 394.000 m/s^2

La velocidad y aceleración aplicadas por el ensayo 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 son las ecuaciones (1) a (4) que se muestran a continuación.

$$h = \frac{A}{2} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

$$v = \omega \frac{A}{2} \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$a = -\omega^2 \frac{A}{2} \sin(\omega t) \quad (4)$$

Para el valor de amplitud de la oscilación de $A=0,00005$ m; la frecuencia de $f=20.000$ Hz, el movimiento queda caracterizado como muestran los gráficos de la Fig 3a y 3b dando valores máximos para la aceleración de $a_{\text{max}}= 3,94 \times 10^5$ m/s^2

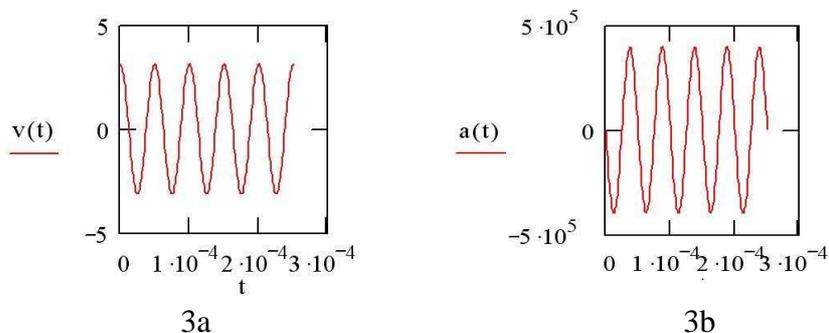


Fig. 3. Diagrama del movimiento de la probeta: a) velocidad en función del tiempo; b) aceleración en función del tiempo, cálculo mediante soft MathCad.

Del ensayo referenciado se concluyó que el peso de la cabeza de la probeta era suficiente para que la acción de la aceleración por oscilación simple generara tensiones equivalentes de fatiga concentradas en la entalla natural producida por el inicio del filete de la rosca de montaje, en la probeta. Esto provocaba la falla al alcanzarse una vida de 2.4×10^5 ciclos, lo que corresponde a la zona de transición de vida infinita del diagrama S-N.

Debido a esta determinación, se pudo identificar la condición de fatiga de alto número de ciclos en la zona límite de la curva característica del material (zona donde comienza a hacerse asintótica la curva). Esto permitió tomar la decisión de disminuir el peso de la cabeza de la probeta disminuyendo la altura de la misma y con esto se logró estar por debajo de la tensión límite de fatiga y así las probetas no volvieron a presentar fallas por este motivo.

Estas condiciones plantearon el incumplimiento de las dimensiones normalizadas y la incapacidad de la norma para trabajar con materiales de alta densidad. Esto fue tratado en una publicación: “Condiciones de validez de la norma ASTM-G32_Análisis crítico para aleaciones de alto níquel” (Bello, 2012) dentro de las actividades de transferencia del proyecto 25/J059 “Caracterización de la cavitación en componentes hidráulicos y su influencia durante la interacción del flujo y la estructura del componente”

La condición detectada permitió dos cosas: a) sospechar posibilidad de tipificar materiales que no tiene sus características en las bibliotecas de los códigos comerciales para estudios de la mecánica del sólido; b) la reutilización del banco de ensayo en desuso que permitiría hacer estos ensayo en tiempos muy cortos.

Los ensayos acelerados de fatiga mediante ultrasonido han sido utilizados mediante probetas de sección circular y planas con montaje por ambos extremos solicitado en uno de ellos mediante el transductor (Wells, J. M, Buck O., Roth L. D., Tien J. K., 1982), esta condición está tipificada y tratada en el volumen 8 de ASM Handbook (ASM, 2000). Estos ensayos se realizaron utilizando frecuencias de 50Hz a 20000 Hz. La frecuencia de trabajo del equipamiento disponible es de 20000Hz y se considera como muy conveniente por estar esta fuera del rango de lo audible, lo que permite hacer ensayos en mejores condiciones de seguridad para las personas.

La utilización de probetas empotradas y con sollicitación de tracción requiere potencias importantes a desarrollar en el transductor piezoeléctrico, esto es una limitación para el equipamiento existente. A partir de estas condiciones de equipamiento y guiados por la experiencia de la sollicitación de fátiga observada en los ensayos de cavitación, la estrategia pensada sugiere la utilización de la condición de sollicitaciones inerciales cíclicas.

1.2. OBJETIVOS

Objetivo principal: diseño de probetas que permita tipificar materiales por fatiga axial.

Objetivos secundarios: aportar casos; desarrollar estrategias de modelización, capacitar docentes y becarios dentro del proyecto Potenciación del uso de herramientas numéricas en el área de ingeniería electromecánica, con código UTI3543TC de la UTN.

Se busca en futuros trabajos, la adaptación física del banco de pruebas existente de la Norma mencionada, la validación experimental y ajuste final del estudio numérico, en pos de la caracterización de otros materiales de propiedades y comportamientos desconocidos bajo este tipo de sollicitaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Estrategias y consideraciones de partida

Debido al análisis del ensayo de referencia surge la idea de diseñar una probeta mediante simulación numérica (FEA) que tenga una vida a la fatiga específica y controlada. En los códigos con que se simularon las probetas diseñadas, se utilizó un material conocido con sus características de fatiga conocidas (de biblioteca en los códigos), de dimensiones, forma de entallas y concentradores de tensión variables, configuradas para producir fallas por fatiga programadas para cada probeta y permitir determinar una nube de puntos para la obtención de datos de la curva (S-N). Se buscó de esta manera parametrizar un conjunto progresivo de modelos de probeta que permita luego ser validado en un ensayo.

Estos datos serían contrastados con los datos (S-N) de un material conocido del que se posea información y que a la vez esté disponible en la galería de materiales del software

utilizado bajo la misma normativa, ver figura N° 3.

Por lo anterior, podemos resumir el método en: utilización de excitación fija, dominada por el banco de prueba vs. condición de carga autónoma de la probeta, dominada por su peso propio y geometría específica.

El hecho de que la geometría específica de cada probeta para una misma condición de excitación provoque distintos resultados de vida a la fatiga, permitirá analizar líneas de tendencia de concentración de tensiones y sensibilidad de forma, lo que brinda un segundo orden de contrastación respecto a los estudios existentes de coeficientes de concentración de tensiones utilizados en las teorías clásicas de cálculo de elementos de máquinas.

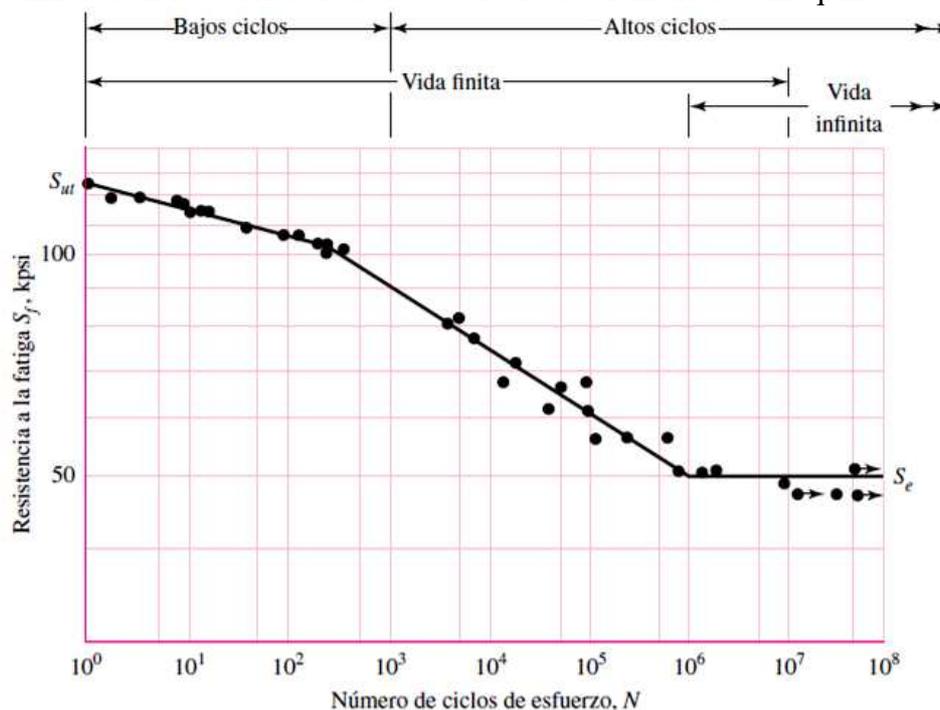


Figura 3: Diagrama de resistencia a la fatiga para materiales ferrosos (NACA-tech, 1996)

2.2. Modelo de primera aproximación

Diseño de probeta: Se desarrolló la geometría de la probeta considerando una cabeza de masa definida unida mediante un cuello de dimensiones controladas al cuerpo que se monta en el sonotrodo mediante unión roscada por esparrago ASTM A354 BD (Shigley, 2008). Este diseño plantea la condición de fatiga alternativa mediante solicitaciones axiales producidas inercialmente cuando se fuerza a la probeta a oscilar en la dirección del eje de simetría.

Las dimensiones del cuello de la probeta se plantean en función de las condiciones de fabricación, una entalla controlada y una sección que puede definirse eficientemente. Las variaciones del diámetro del cuello, como también las variaciones de las dimensiones de la cabeza de probeta, permiten modificar las condiciones de sollicitación a la sección del cuello. El otro parámetro que puede variarse depende del equipo generador de frecuencia existente que produce una oscilación con control de amplitud.

Se partió de un modelo que contempla la cabeza de la probeta del estudio de referencia mencionado con un orificio roscado para tomarse de la pieza de montaje (perno roscado) descrito anteriormente, (ver Figuras 4 y 5). Como ya se mencionó en este caso también se toma la simplificación de la rosca del orificio como una superficie cilíndrica.

equivalente al diámetro mayor de la rosca (ver punto 3.3.c).

Los criterios generales de metodología de ensayos de fatiga utilizando ultrasonido se definen en ASM Handbooks (ASM, 2000), y permiten utilizar diversos equipamientos según la disponibilidad de ultrasonidos de alta potencia comercial, transductores y fuentes de alimentación. También se plantea en la misma fuente que las frecuencias altas son deseables desde un punto de vista de seguridad de las personas que trabajan con ellas, por estar por encima del rango de la audición humana normal. El equipamiento existente trabaja a 20 kHz lo que lo hace utilizable.

La bibliografía citada muestra distintos tipos de probetas, todas ellas empotradas en un extremo y solicitadas axialmente desde el opuesto mediante el transductor (Kromp W., Kromp K., Bitt H., Langer H., Weiss B., 1973), este montaje, utiliza una potencia importante en el transductor. El equipamiento existente, tiene limitaciones para desarrollar altas potencias, por lo que se propuso hacer la sollicitación en forma inercial, para lo cual el diseño de probeta utiliza una masa de referencia en el extremo libre que sollicita a una sección definida por un entalla controlada.

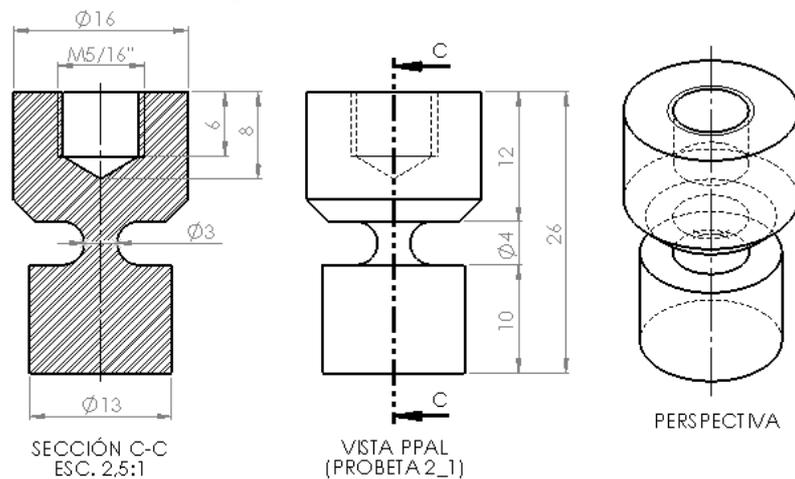


Figura 4: Dimensiones de probeta inicial

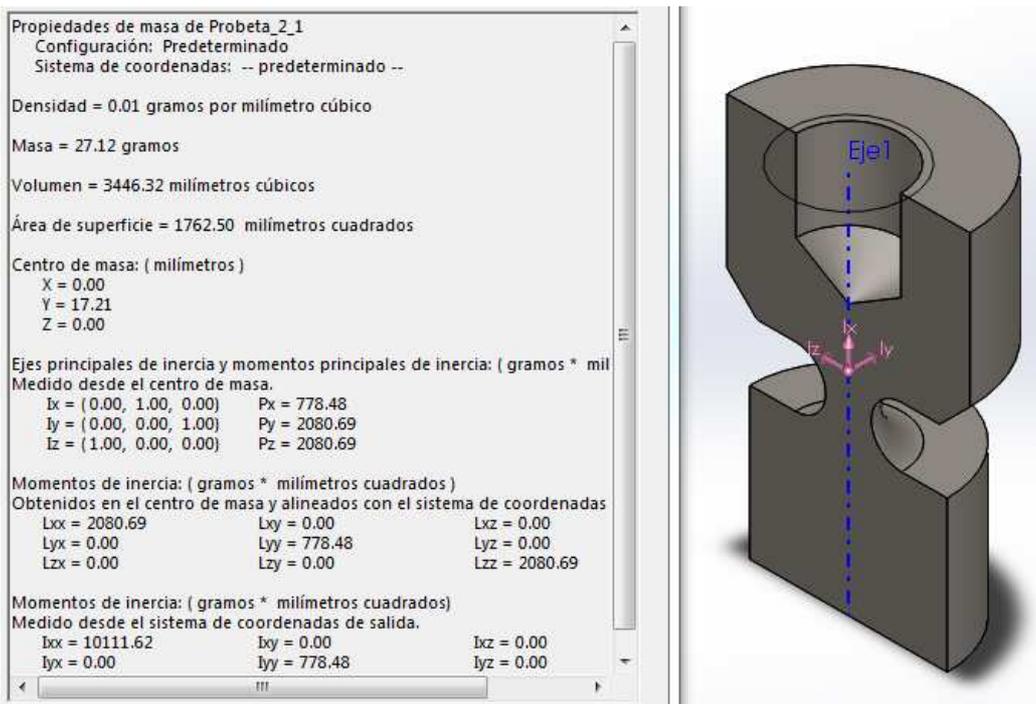


Figura 5: Modelo de probeta inicial – Corte. Propiedades físicas

Se utilizó como generador de la sollicitación la masa de la cabeza de la probeta, la variación de las dimensiones de la cabeza, permiten definir los valores de las sollicitaciones, que necesariamente darán determinaciones de ciclos de vida de la probeta (ver Figura 6).

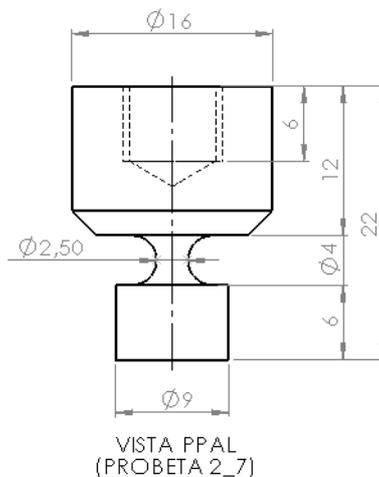


Figura 6: Modelo de probeta inicial ajustado– Dimensiones

2.3. Hipótesis de cálculo para la simulación de primera aproximación

- a) Se consideró la excitación aplicada solo a la probeta, dejando fuera de estudio los

- efectos de masa y comportamientos que pudieran surgir en el Sonotrodo.
- b) Se tomó como condición de carga la oscilación simple de ciclo totalmente invertido; teniendo en cuenta como valor de “input” una aceleración de 390.000 m/s². que surge del valor de la amplitud utilizada de 50 μ m y la frecuencia de excitación forzada.
 - c) Se consideró la sujeción de las probetas sobre una superficie cilíndrica equivalente al diámetro mayor de la rosca macho de montaje (5/16” = 7,93 mm), desestimando la posible falla en la rosca, debido a que se decide dividir la probeta en dos partes fundamentales; un perno o rosca de montaje de un material de alta resistencia ASTM A354 BD, una segunda parte donde se concentra el diseño de la probeta.
 - d) Se consideró a la probeta un cuerpo libre de rugosidad (rectificado ideal) de material homogéneo; sin existencia de impurezas, rebabas, cantos vivos discontinuos, y ninguna otra irregularidad física macro y microscópica, hipótesis de homogeneidad.
 - e) Se consideró una probeta perfectamente simétrica respecto al eje de acción del Sonotrodo (eje axial), sin componentes ni vibraciones en sentido radial.
 - f) Se consideró que la probeta no se encuentra en zona de resonancia en ninguno de los casos. Esto luego se verificó para las geometrías propuestas.
 - g) Se consideró que los datos y curvas de vida a la fatiga del material “Estructural Steel S-N” cargados en el software de simulación bajo noma son correctos y aplican a este tipo de estudios.
 - h) Se consideró que la desertización con controles de mallado exigente y gran cantidad de elementos, utilizando los criterios e indicadores recomendados por el soporte técnico del software, es suficiente y por esto no se realizó un estudio de sensibilidad de malla.
 - i) El análisis de tensiones a los que se somete el material está siempre dentro de la elasticidad, por lo que el estudio es lineal.

2.4. Condiciones de contorno del modelo de primera aproximación

- a) Restricciones: Sujeción de vínculo fijo en los seis grados de libertad aplicada a la superficie cilíndrica equivalente del agujero roscado: traslación y rotación Constante de elasticidad de la sujeción igual a 0 (cero).
- b) Cargas aplicadas: Son las debidas a la aceleración de excitación por oscilación simple invertida igual a 390.000 m/s² aplicada a la masa de la probeta. Esta aceleración permite desprestigiar acciones por cargas gravitatoria.
- c) Se utilizaron para la simulación elementos sólidos tetraédricos de primer orden. Se considera suficiente esta elección por tratarse de un estudio de primera aproximación para luego hacer un rediseño.

2.5. Simulación

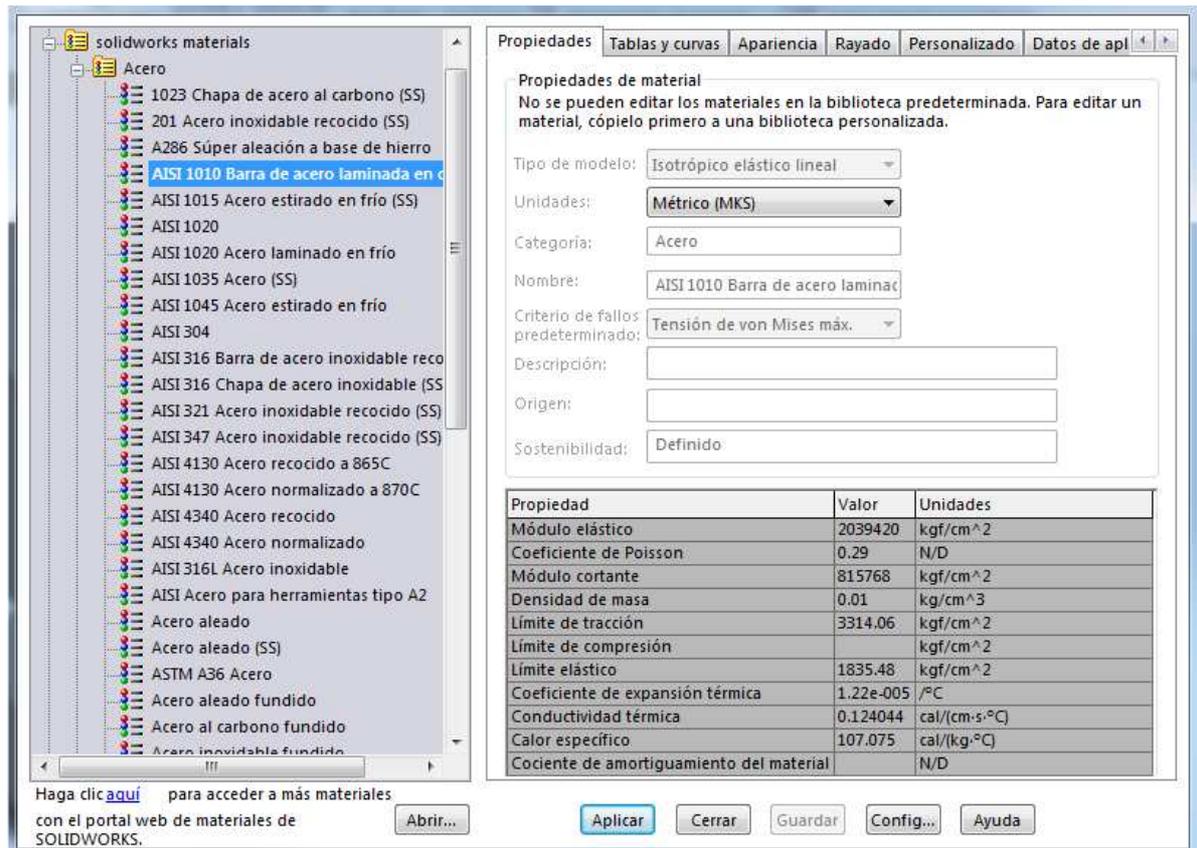
El proceso de simulación se realiza en dos etapas:

- a) Simulación de primera aproximación, utilizando el módulo de “Solid Works Simulation”. Esto solo a los efectos de un sondeo inicial que permita detectar problemas de diseño de probeta, dimensiones probables y modo de montaje.
- b) Simulación de rigor, utilizando el módulo “ANSYS Mechanical-Static Structural”. , que permite aplicar mejor biblioteca de propiedades de materiales (curvas de vida a fatiga), controles de mallado y mayor potencia de cálculo. Esto último demanda mayores recursos informáticos, mayor experticia técnica y mayores tiempos de cómputo, por lo que se utiliza para el cálculo detallado de un modelo que ya ha sido aproximado por un solver más dinámico.

2.6. Etapa a) Diseños de primera aproximación

Sobre este modelo de partida (ver Figura 6) se busca mediante iteraciones realizar entallas y formas profesas para lograr la falla y analizar de vidas resultantes. A continuación se muestran algunas de las opciones propuestas en el proceso de primeras aproximaciones y análisis de comportamiento (ver Figuras 8, 9, 10 y 11).

Para estos cálculos utilizamos de la galería de materiales del software un acero dúctil de bajo carbono AISI 1010 laminado con características estándar (ver Figura 7).



Propiedades de material

No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal

Unidades: Métrico (MKS)

Categoría: Acero

Nombre: AISI 1010 Barra de acero laminada en frío

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad: Definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2039420	kgf/cm ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante	815768	kgf/cm ²
Densidad de masa	0.01	kg/cm ³
Límite de tracción	3314.06	kgf/cm ²
Límite de compresión		kgf/cm ²
Límite elástico	1835.48	kgf/cm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.22e-005	/°C
Conductividad térmica	0.124044	cal/(cm·s·°C)
Calor específico	107.075	cal/(kg·°C)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Haga clic [aquí](#) para acceder a más materiales con el portal web de materiales de SOLIDWORKS.

Abrir... Aplicar Cerrar Guardar Config... Ayuda

Figura 7: Datos del Material

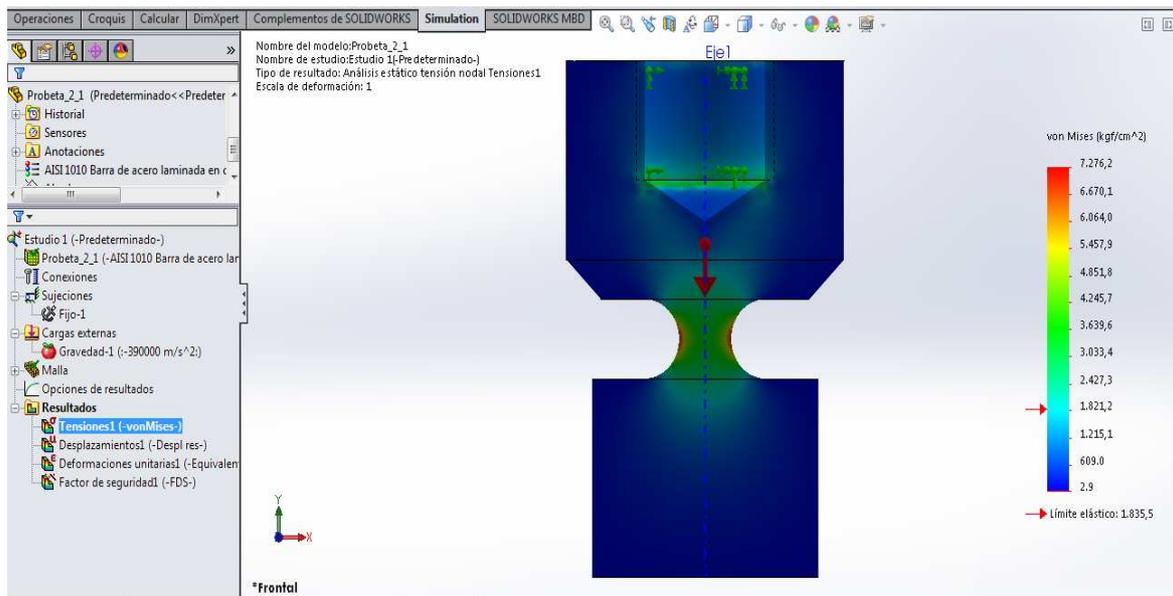


Figura 8: Probeta inicial. Distribución de Tensiones

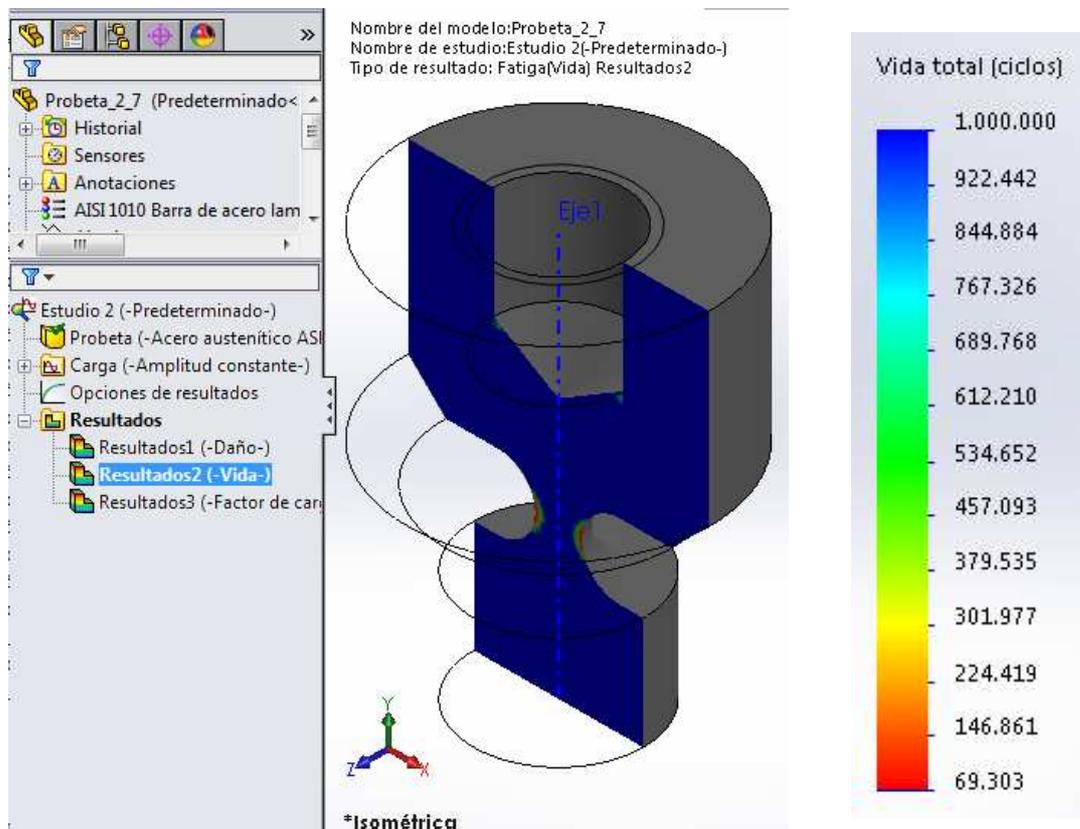
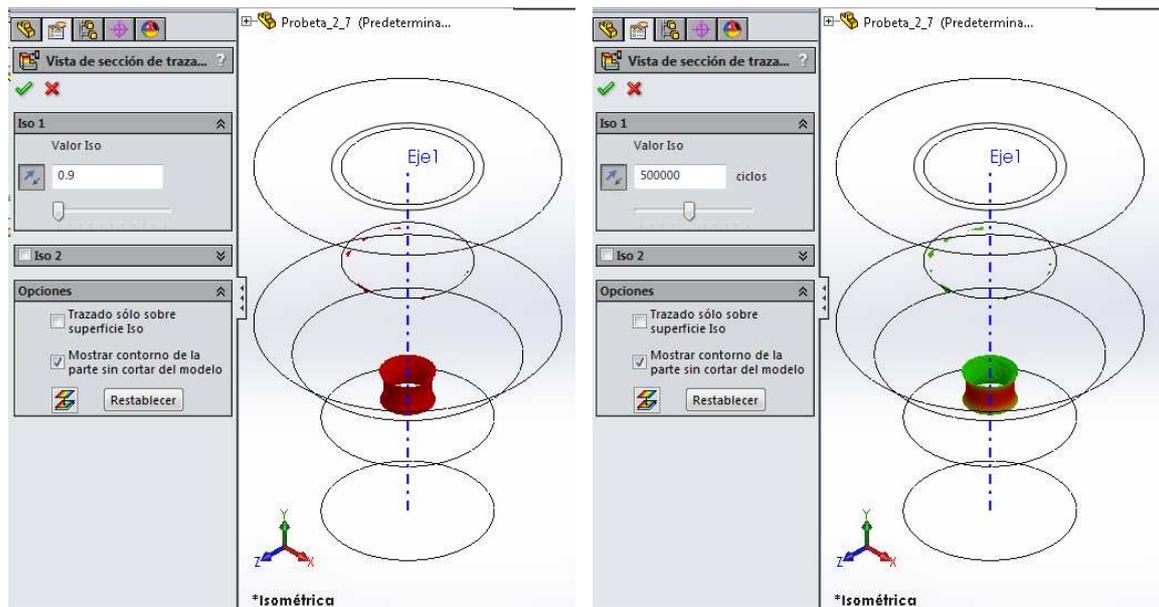


Figura 9: Probeta inicial ajustada. Vida en ciclos.



Factor de Carga = 0,9

Vida = 500.000 ciclos

Figura 10: Probeta inicial ajustada. Análisis de zona de falla.

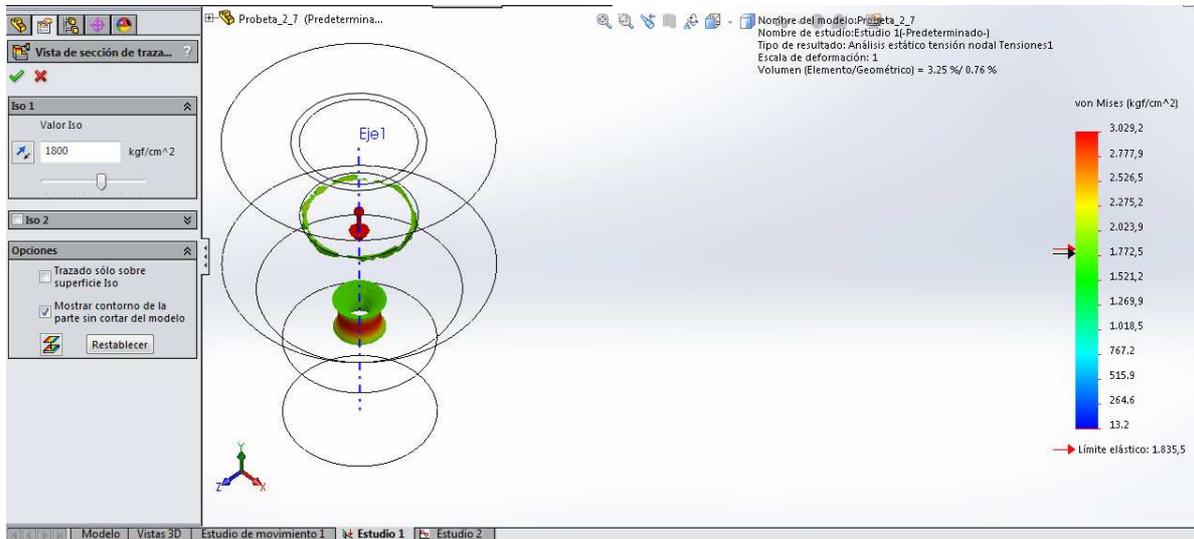


Figura 11: Tensión promedio en la zona de falla = 1800 Kg/cm2

2.7. Iteraciones mediante variación de parámetros

Se realizó una variación progresiva de parámetros de las probetas, para variar la masa, tanto variando el diámetro (relación de segunda potencia), como la variación de la altura (relación lineal). Por último se varió la entalla que afecta a la sección resistente). Esta variación de masa define los valores de solicitación y permite obtener datos de ciclos de vida para conservar equivalencias entre probetas (ver Figuras 12, 13, 14 y 15).

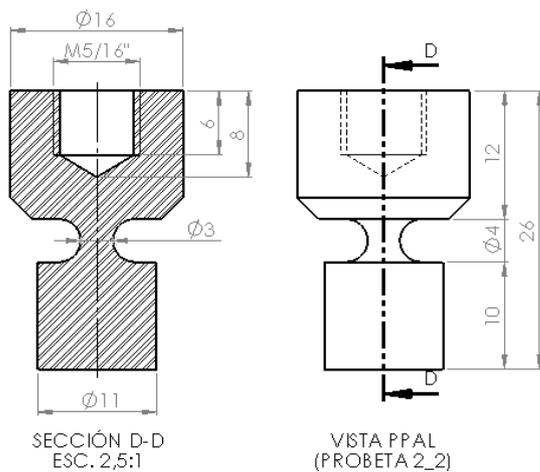


Figura 12: Probetas 2 – Dimensiones (mm)

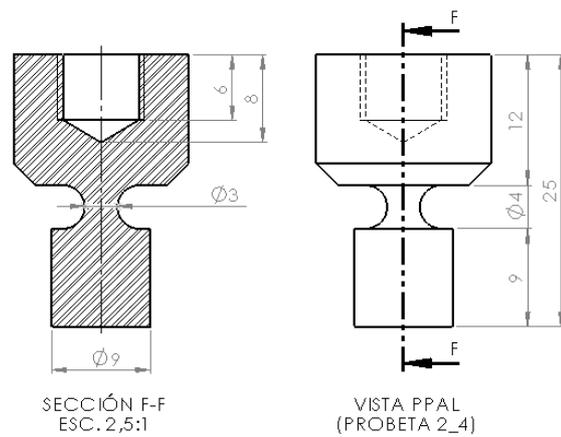


Figura 13: Probetas 4 – Dimensiones (mm)

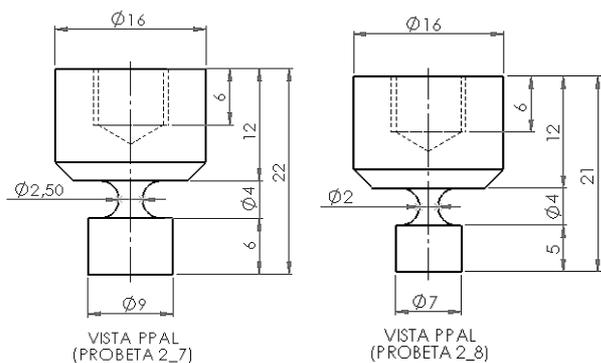


Figura 14: Probetas 7, 8 y 9

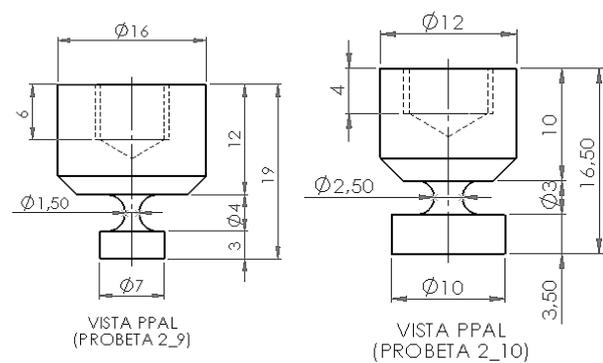
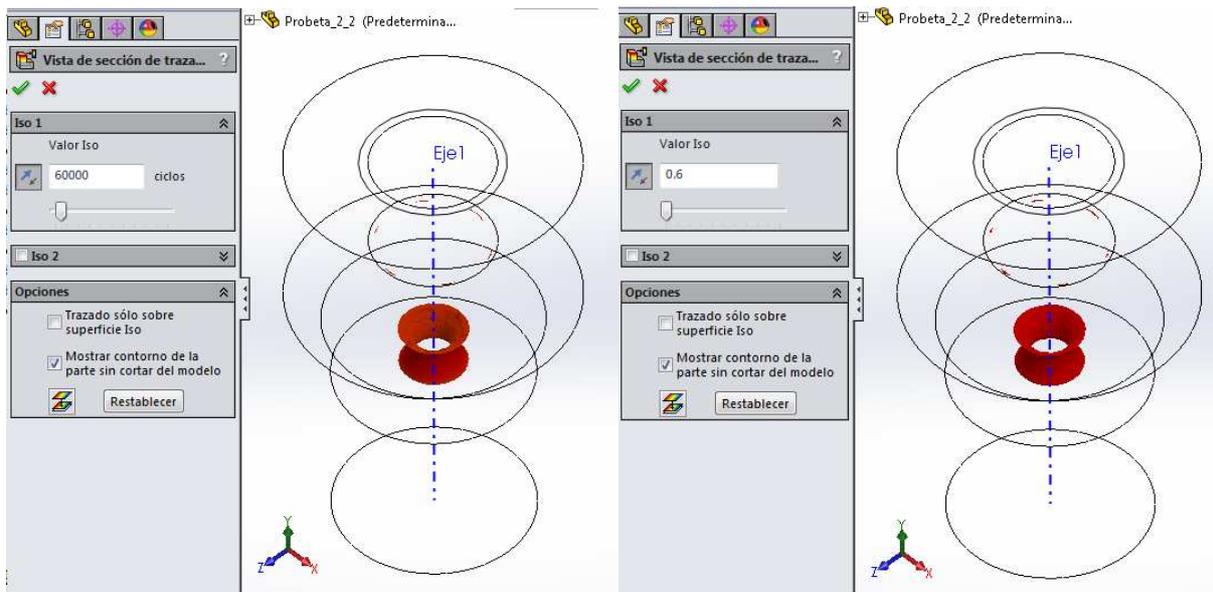


Figura 15: Probetas 10

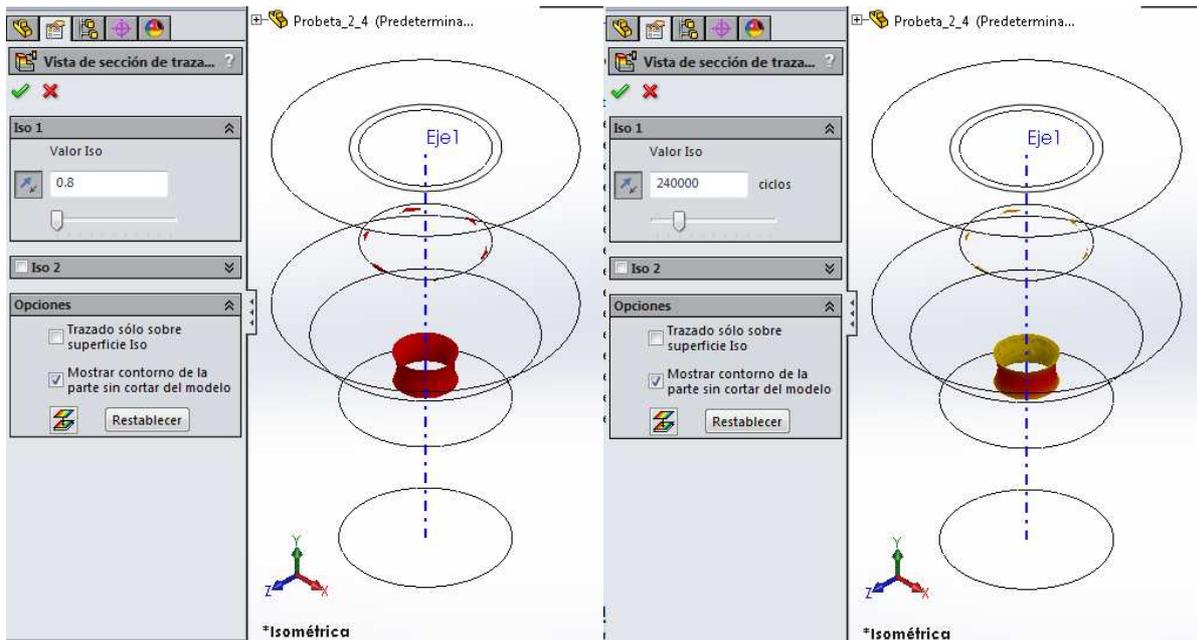
2.8. Primeros resultados y análisis del modelo de primera aproximación

Este apartado muestra un resumen de los primeros resultados, las figuras 16, 17, 18, 19 y 20, muestran el volumen de material que falla por debajo de 10^6 ciclos definido por el criterio de factor de carga de Solid Works, este criterio permite identificar la zona que entra en falla con un factor de seguridad sobre la vida esperada. Este factor es una fracción decimal que responde al porcentaje de las tensiones de Von Mises halladas en la zona estudiada, respecto a la tensión de falla por fatiga del material.

Con los resultados obtenidos se realiza una tabla de valores y se grafica la curva correspondiente (ver Figuras 21 y 22).

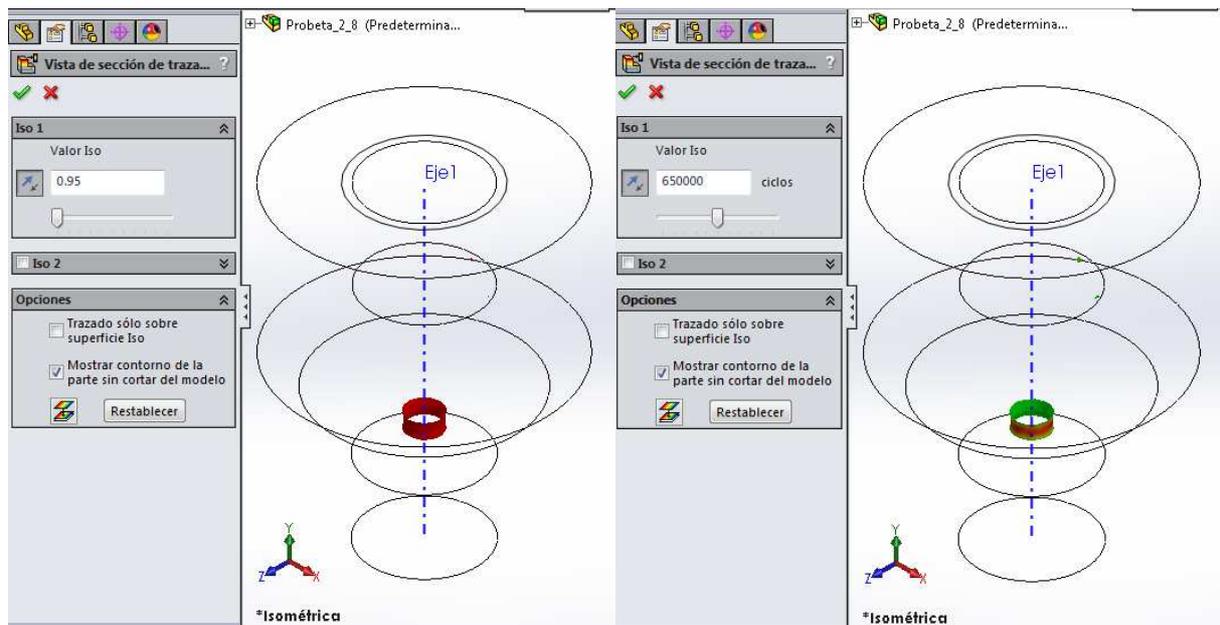


Factor de Carga = 0,6 → Vida esperada en la entalla= 60.000 ciclos
 Figura 16: Probetas 2 – Resultados



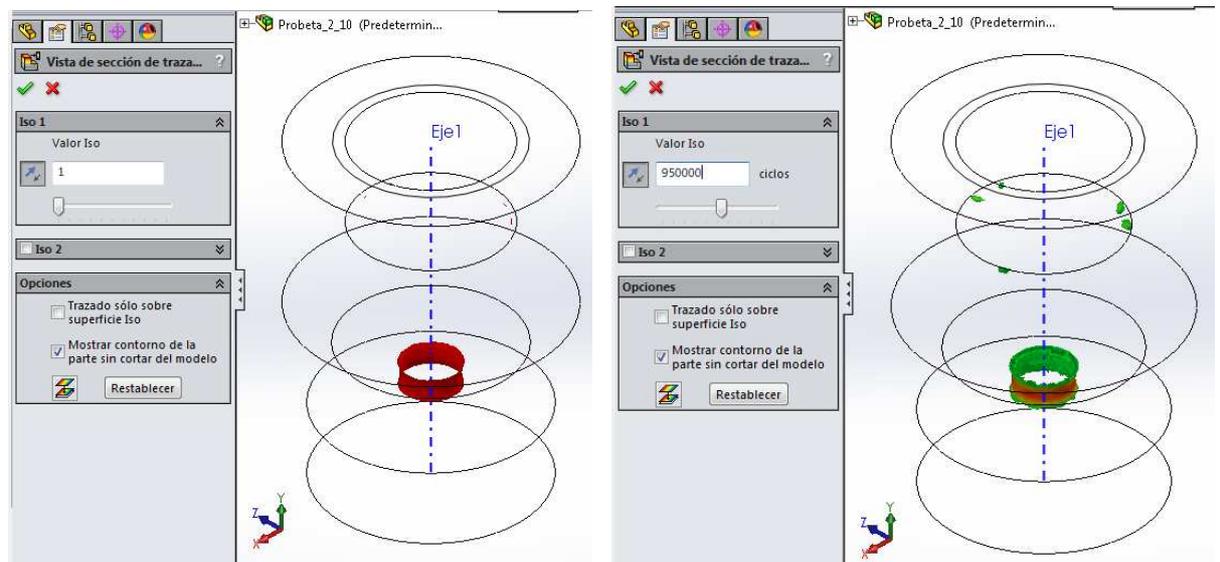
Factor de Carga = 0,8 → Vida esperada en la entalla= 240.000 ciclos

Figura 17: Probetas 4 – Resultados



Factor de Carga = 0,95 → Vida esperada en la entalla= 650.000 ciclos

Figura 18: Probetas 8 – Resultados



Factor de Carga = 1,00 → Vida esperada en la entalla= 950.000 ciclos

Figura 19: Probetas 10 – Resultados

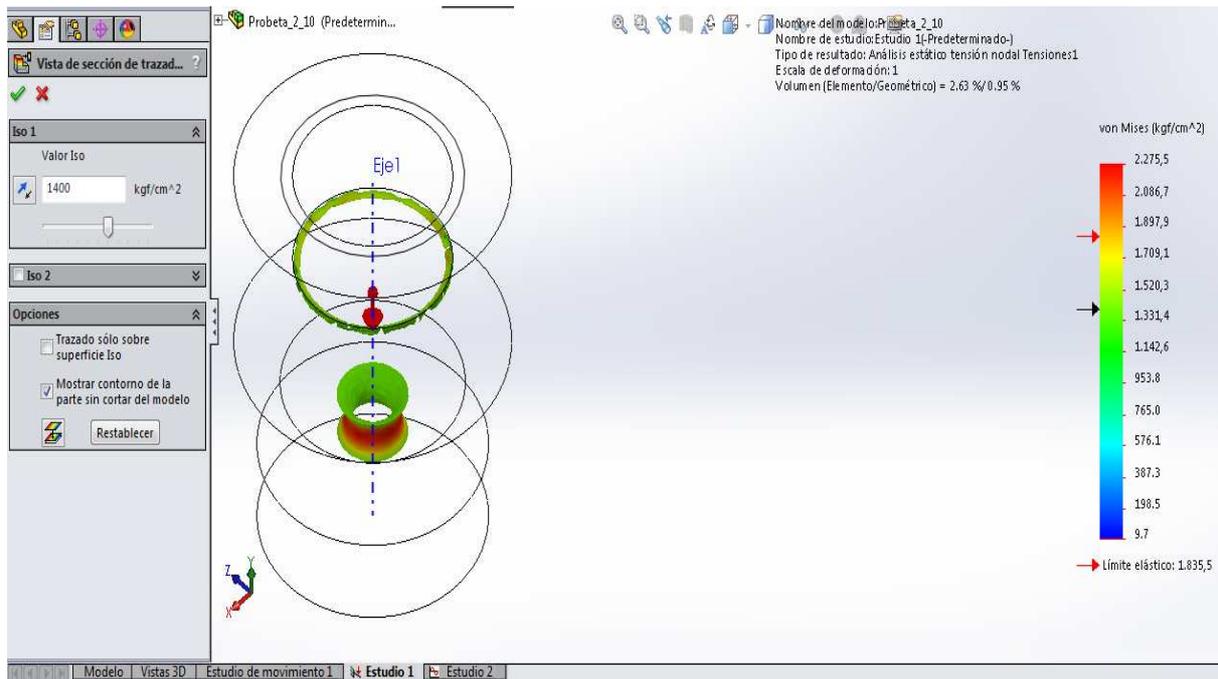


Figura 20: Probetas 10 – Resultados
 Tensión Promedio de la Zona de Falla = 1400 Kg/cm²

SERIE DE PROBETAS_ FATIGA_OSCILACION SIMPLE INVERTIDA					f [Hz]	20.000	$\Delta\delta$ [μm]	50
Probeta N°	Factor de Carga	Vida en (Ciclos)	Vida en (Segundos)	Tensión Máx. (Kg/cm ²) *	Masa Probeta (gramos)	\varnothing _entalla (mm)	\varnothing _cabeza (mm)	h_cabeza (mm)
2_1	0,5	20.000	1	4.000	27,12	3	13	10
2_2	0,6	60.000	3	3.000	24,16	3	11	10
2_3	0,7	120.000	6	2.500	21,8	3	9	10
2_4	0,8	240.000	12	2.200	-	3	9	9
2_5	0,8	320.000	16	2.000	-	3	9	8
2_6	0,85	400.000	20	1.800	-	3	9	7
2_7	0,9	500.000	25	1.800	19,5	2,5	9	6
2_8	0,95	650.000	32,5	1.600	-	2	7	5
2_9	0,95	750.000	37,5	1.500	-	1,5	7	3
2_10	1	950.000	47,5	1.400	9,34	2,5	10	3,5

Figura 21: Tabla de Resultados

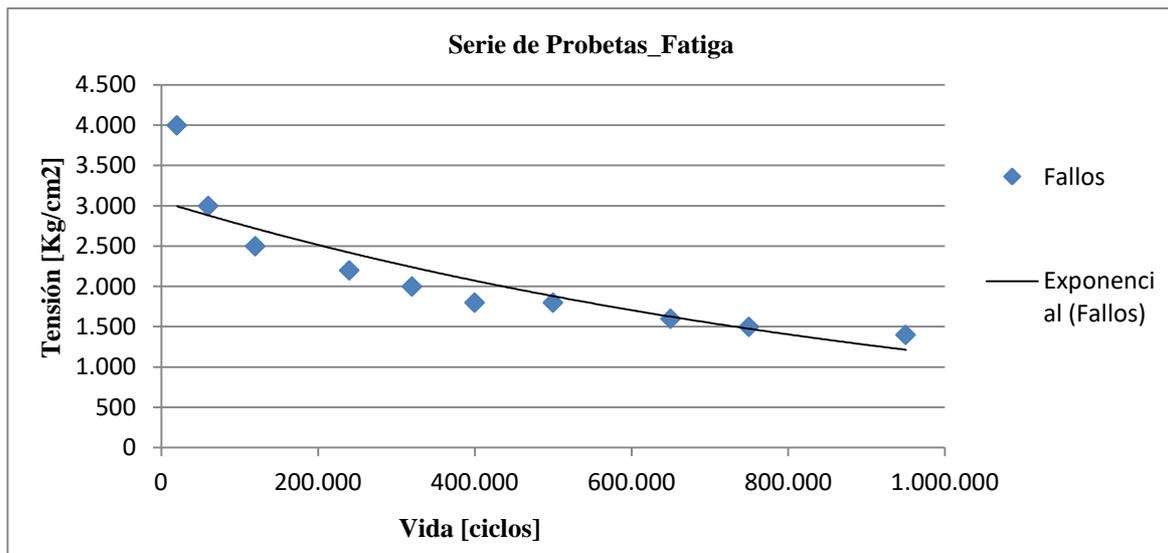


Figura 22: Gráfico de Resultados
(Vida en ciclos, escala lineal)

Los valores obtenidos llegan hasta el número de ciclos 10^6 , donde se ve una pérdida de sensibilidad del diseño. El módulo de cálculo utilizado para este análisis primario tiene este límite de números de ciclo dentro de los datos con los que cuenta la galería del material.

2.9. Etapa b) Ajustes de diseño e iteraciones, resultados del primer ajuste.

Partiendo de los resultados preliminares se tomó la probeta 2-7 con una vida resultante de 500.000 ciclos como referencia. La misma se verificó con el software de análisis final para ajustar y constatar parámetros de configuración del solver. A continuación se muestran los resultados de Vida a la Fatiga, Factor de Carga (factor de seguridad) y Tensiones equivalentes de Von Mises en la entalla, evaluando solo el volumen de interés en la zona de falla (ver Figuras 23, 24 y 25). Se simplifica $10 \times \text{MPa} = \text{Kg/cm}^2$.

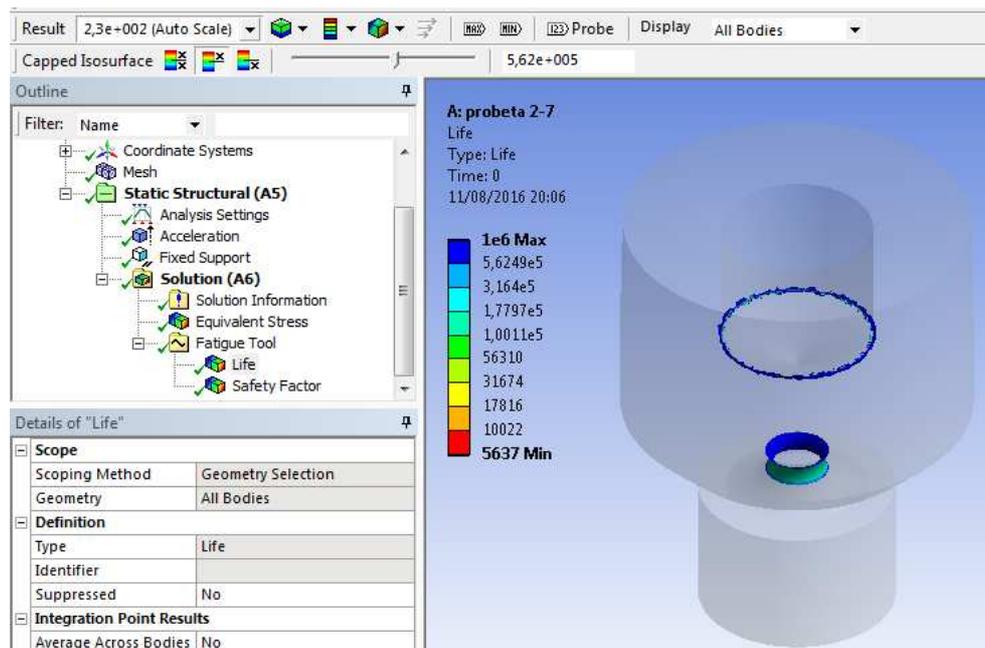


Figura 23: Gráfico de Resultados
(Vida = 562.000 ciclos)

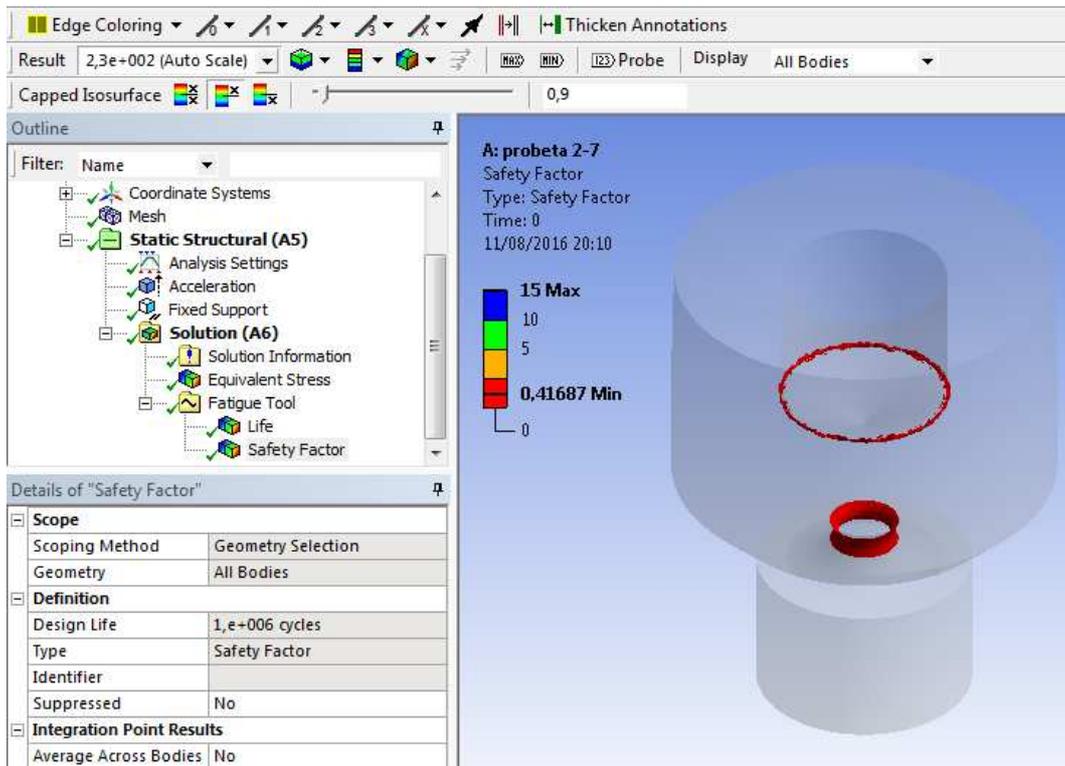


Figura 24: Gráfico de Resultados
(Factor de Carga = 0,9)

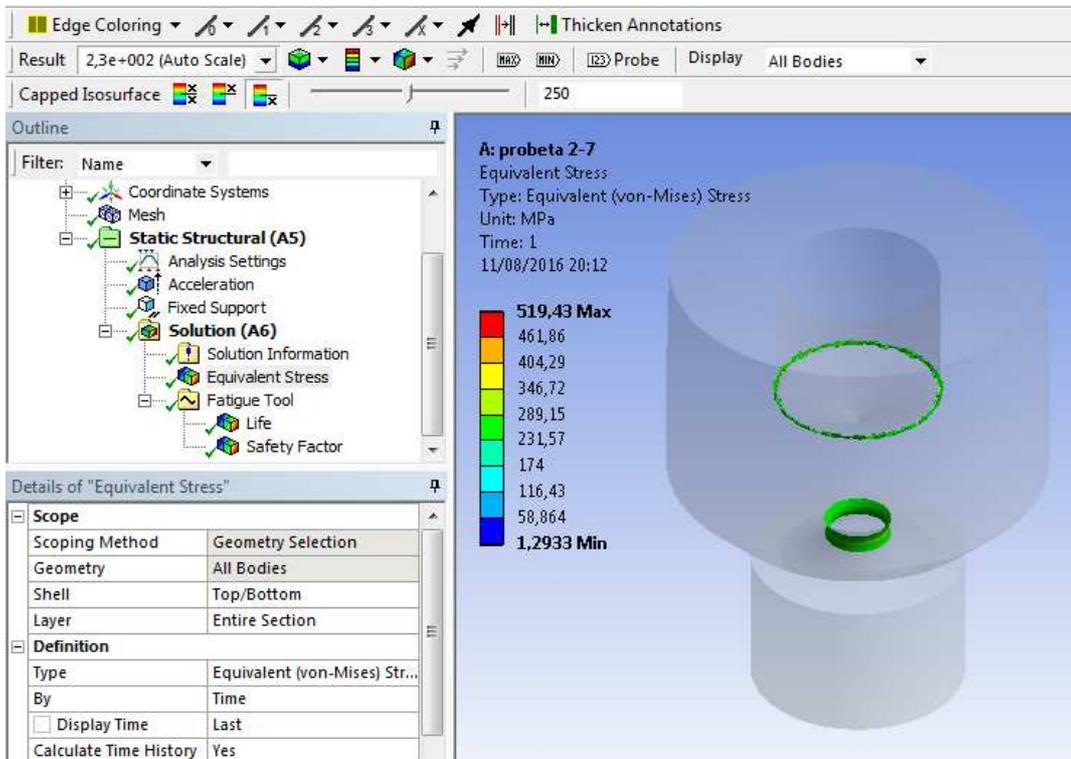


Figura 25: Gráfico de Resultados
(Tensión equivalente = 2.500 kg/cm²)

Se observó que los resultados a priori son del mismo orden de magnitud que los encontrados en la simulación de primera aproximación, utilizando el solver de Solid Works. Salvo para el caso de la tensión de referencia donde en el método preliminar era $1.800 \text{ Kg/cm}^2 > 2.500 \text{ Kg/cm}^2$.

El análisis de la tendencia de comportamiento de la serie de probetas muestra que este diseño presenta las siguientes características:

- El volumen de material en la parte de la probeta que contiene la rosca de montaje, alcanza valores cercanos a la condición de falla, esto dificulta asegurar la incidencia de la falla en la zona de la entalla, que es el lugar definido para la misma.
- Para ciclos de vida altos, aparece una pérdida de sensibilidad a la falla por fatiga, cuando se varían las dimensiones de la cabeza, si esta variación se hace manteniendo el radio de acuerdo y diámetro de la entalla constante. Esta condición hace menos comparable los resultados con distintas probetas donde la sensibilidad de falla es mayor, aun para las mismas condiciones de factor de carga y volumen de material afectado.
- El efecto de concentración de tensiones, en la entalla no genera una rápida variación de vida a la fatiga para pequeñas variaciones de la masa de la cabeza. Esto hace que el diseño no se considere eficiente para la obtención de la curva de caracterización paramétrica buscada. Esto se observa cuando se analiza la secuencia de variación de dimensiones en las probetas resultantes de las iteraciones del punto 2.7, descritas en las [Figuras \(12, 13, 14 y 15\)](#).
- El montaje mediante perno roscado es crítico y no permite asegurar la aparición prematura de falla en el cuello de la probeta. Esto se ve claramente al evaluar las [Figuras \(23, 24 y 25\)](#), donde en la zona superior de las imágenes se ve la aparición de efectos de sollicitaciones en el final de la rosca. Estos efectos son de orden de magnitud cercanos a los que se presentan en la entalla (cuello de la probeta).

2.10. Rediseño de probetas

Por los motivos expuestos se decidió buscar un nuevo diseño de probetas dividido en dos piezas; una de material tratado térmicamente, acero SAE-AISI 4140 que corresponda a una pieza de montaje y vinculación entre la rosca del Sonotrodo y la segunda parte de la probeta del tipo galga de fino mecanizado encastrable en la primer pieza mediante un sistema de ranura ([ver Figuras 26, 27 y 28](#)). Esto último permite ampliar la libertad de diseño y variedad de materiales de la galga de falla en una misma pieza de montaje intermedio preparada para vida infinita.

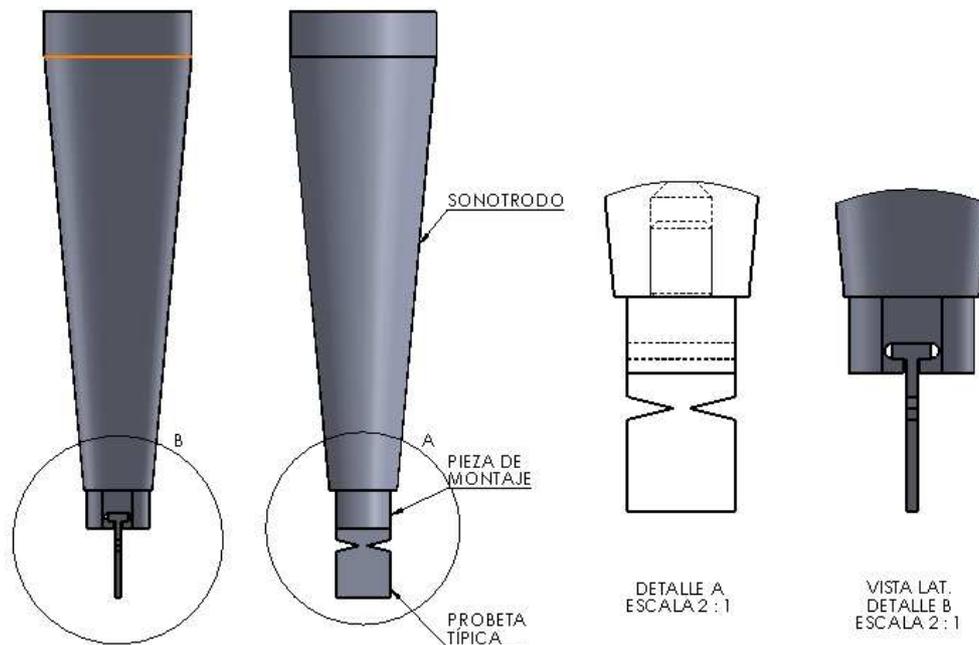


Figura 26: Montaje de probeta

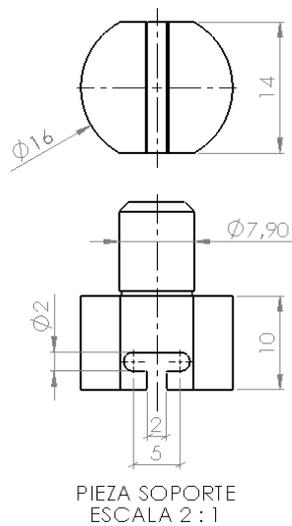


Figura 27: Encastre

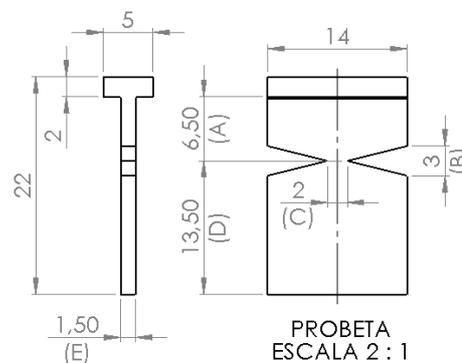


Figura 28: Probeta típica

2.11. Parámetros de cálculo

Configuración del solver (ver Figuras 29 y 30), fueron variados los parámetros de la probeta típica (ver Figura 30), para la obtención de las distintas piezas de la serie.

En la (Figura 31) se muestran las curvas de vida a la fatiga de la galería del software, en esta imagen se observa: la curva de comportamiento plástico, que es válida para ciclos bajos (ciclos menores a 10^3) y la curva de comportamiento elástico, que es válida para ciclos altos (ciclos mayores a 10^5).

También se muestra la curva suma total de ambos comportamientos, esta última es la curva que utiliza el solver para evaluar los resultados de vida a la fatiga del modelo, contemplando ambos comportamientos en el análisis.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
16	Strain-Life Parameters			
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Figura 29: Propiedades del material

Details of "Fatigue Tool"	
Materials	
Fatigue Strength Factor (Kf)	1,
Loading	
Type	Ratio
Loading Ratio	-1,
<input type="checkbox"/> Scale Factor	1,
Definition	
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
Options	
Analysis Type	Strain Life
Mean Stress Theory	None
Stress Component	Equivalent (Von Mises)
Infinite Life	1,e+009 cycles
Life Units	
Units Name	cycles
1 cycle is equal to	1, cycles

Figura 30: Condiciones de excitación

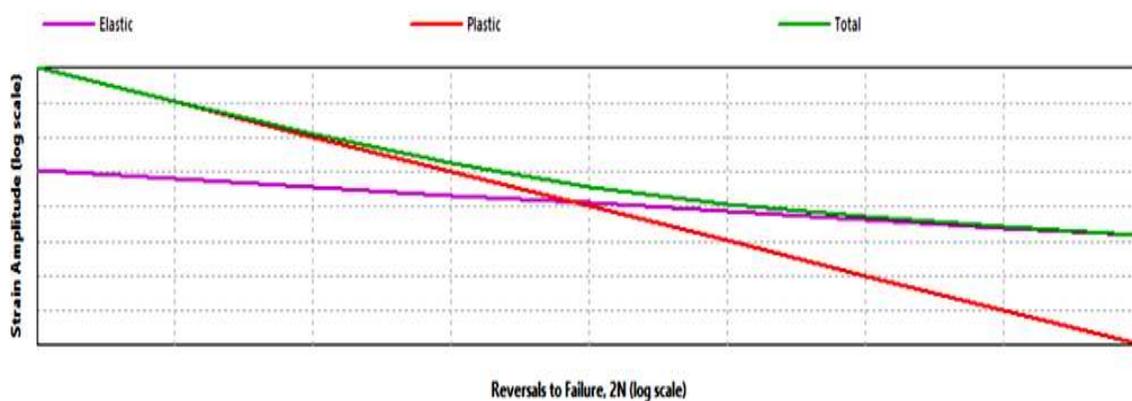


Figura 31: Curvas de fatiga del material

2.12. Discretización, simulación y resultados del nuevo diseño.

La discretización se realizó usando un mallado compuesto de elementos tetraédricos basados en curvatura, además se utilizó un control de mallado en la zona de la entalla (ver Figuras 32, 33, 34 y 35). La calidad de malla se considera buena debido a la gran cantidad de elementos y al grado de crecimiento controlado de los mismos entre la zona de refinamiento y el resto del sólido.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	100
[-] Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	Default (60,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (6,0492e-006 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (6,0492e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (1,2098e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,10)
Minimum Edge Length	2,e-003 m

Figura 32: Parámetros de mallado

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	8 Edges
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1,e-004 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Bias Type	No Bias
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (6,0492e-006 m)

Figura 33: Control de mallado

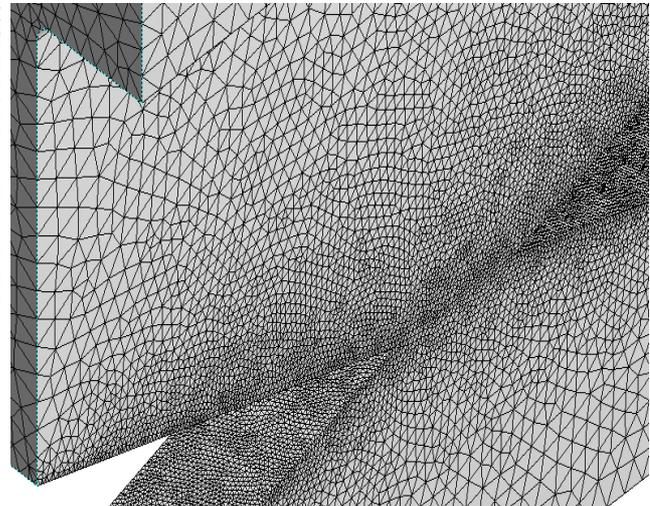
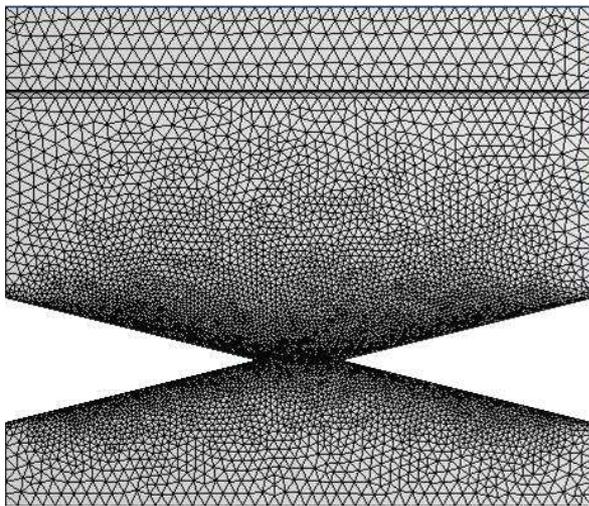


Figura 34 y 35: Visualización de refinamiento del mallado

2.13. Etapa b) Estudios y verificaciones.

A continuación se muestran algunos de los resultados analizados en la serie de probetas, se evaluaron tensiones de Von Mises en el volumen y en la zona de entalla (mayor concentración) donde se presenta la vida a la mínima fatiga en ciclos alrededor de la zona afectada. Para controlar el filtro de pos proceso que permite visualizar solo la zona de falla, se tomó como criterio general, el incluir en la zona más de cinco elementos involucrados y todos aquellos que estén por encima del límite de fluencia del material. (ver Figuras 36, 37, 38, 39, 40 y 41).

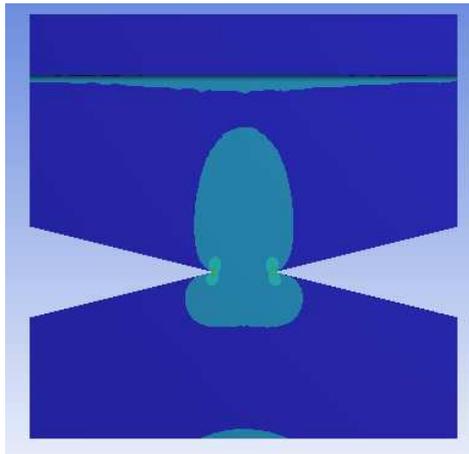


Figura 36: Tensión = 2.898
Kg/cm²

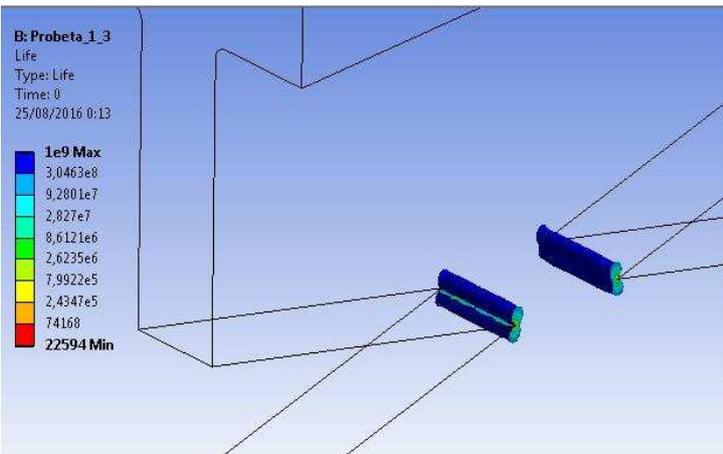


Figura 37: Vida = 22.000 ciclos

En el modelado no se tuvo en cuenta un radio de acuerdo en la entalla, el cálculo se focalizó en la búsqueda de la falla brusca que será inducida por la entalla de arista aguda. La obtención de dimensiones geométricas de las probetas mediante esta condición permite hacer un diseño de primera aproximación, haciendo consideración en su fabricación para los futuros ensayos de validación utilizando el equipamiento disponible.

Luego en las futuras etapas de diseño, cuando se tenga seleccionado el método de fabricación más adecuado se corregirán y contemplarán radios de acuerdos típicos y terminaciones.

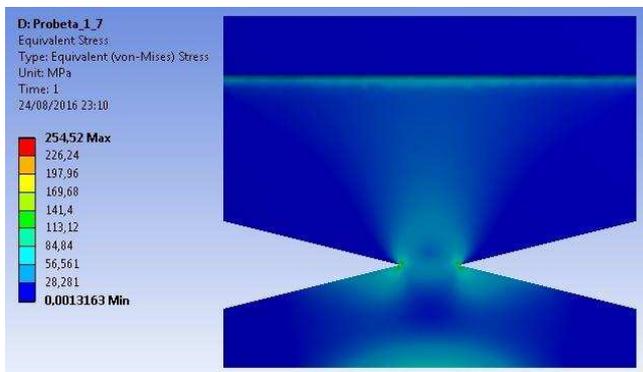


Figura 38: Tensión = 1.869 Kg/cm²

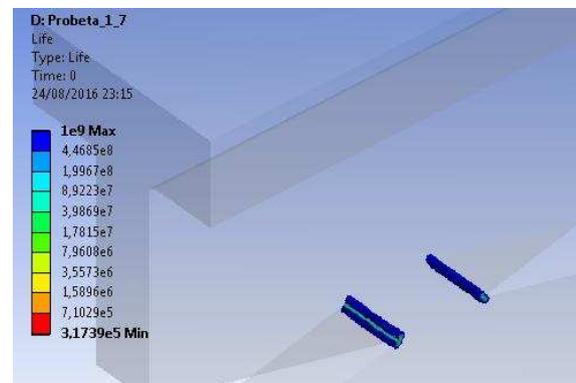


Figura 39: Vida = 300.000 ciclos

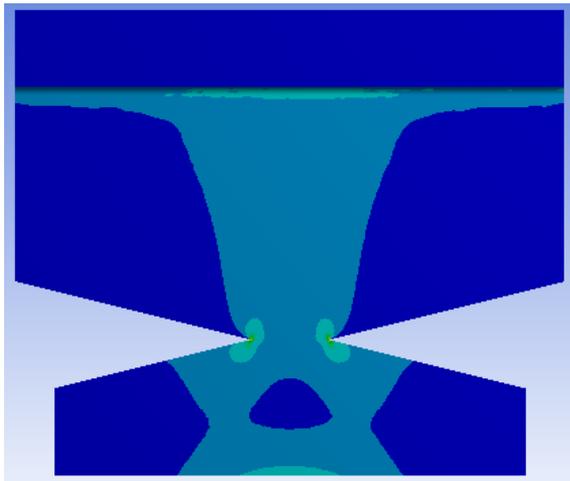
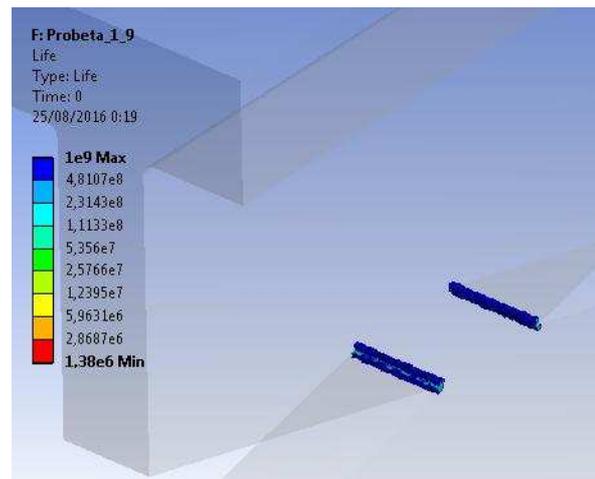
Figura 40: Tensión = 1.470 Kg/cm²

Figura 41: Vida = 1.380.000 ciclos

3. Discusión.

Se compararon las tensiones equivalentes máximas encontradas en cada probeta con la tensión de referencia de ensayo del material estudiado para el mismo valor de vida que se obtiene de la (Figura 3) (NACA-tech, 1996) de esta publicación. De aquí surgió un factor de corrección directo que ajusta en primera instancia el resultado de la tensión límite de fatiga en cada probeta correspondientemente. Este valor engloba todos los efectos de tensión equivalente de fatiga y concentración de tensiones dentro de un marco de una serie de probetas con la misma entalla, forma genérica y poca variación de tamaño (ver Tabla 1), (ver Figuras 42 y 43).

El estudio de las simulaciones de las probetas de sección circular se adapta bien a los criterios que plantea ASM para los ensayos de fatiga mediante ultrasonido (ASM, 2000), el problema que plantea este diseño pasa por la problemática que implica el montaje mediante la unión roscada. La masa de la probeta requerida para obtener las condiciones de ensayo genera en la unión sonotrodo-probeta, valores de tensión importantes, debe hacerse un análisis más detallado de esta unión roscada y optimizar el diseño. Debido a que el sonotrodo ya cuenta con una rosca típica y modificarla implica cambiar las propiedades del mismo.

La pérdida de sensibilidad detectada en la simulación para número de ciclos 10^6 , no representaría un gran problema, se observa que este número de ciclos está en la zona de transición de los diagramas de respuesta a la fatiga. A partir de este valor las características observadas tienden a hacerse asintóticos a una recta de valor constante que está definido como tensión de fatiga. La transición desde este valor hasta aproximadamente los 2.400.00 ciclos, se hace en forma suave y no representa problema alguno con el equipamiento existente, este valor de ciclos e incluso mas, se puede alcanzar muy fácilmente por la frecuencia usada en tiempos de ensayo cortos.

La pérdida de sensibilidad detectada, no tiene que ver con la naturaleza del comportamiento a la fatiga, en pequeñas masas de la cabeza, los esfuerzos debido al efecto de la entalla y la relación de esta a las dimensiones de la cabeza de probeta, genera menor efecto de concentración de esfuerzos. Por la naturaleza del ensayo, se limita la reducción de dimensiones y diseños posibles, esto implica la pérdida de sensibilidad por condiciones de diseño, no por las limitaciones físicas del modelo ni por el comportamiento del material a la fatiga.

Probeta Nº	Vida estudio (Ciclos)	Vida en (Segundos)	Tensión Máx. Probeta (Kg/cm ²)	Tensión de Referencia Sf. (Kg/cm ²)	Factor de Corrección
1_2	2.000	0,1	4.599	5976	1,30
1_3	22.000	1,1	2.898	4780	1,65
1_8	82.000	4,1	2.300	4218	1,83
1_7	300.000	15	1.869	3866	2,07
1_10	520.000	26	1.733	3726	2,15
1_9	1.380.000	69	1.470	3515	2,39

Tabla 1: Resumen de resultados
Serie de Probetas ajustadas para distintos ciclajes

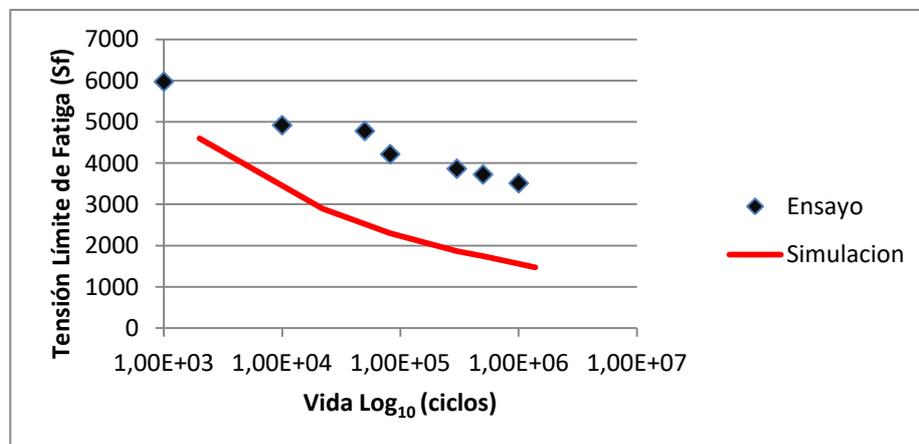


Gráfico 42: Contratación de resultados
Simulación vs. Ensayos destructivos del material de referencia.

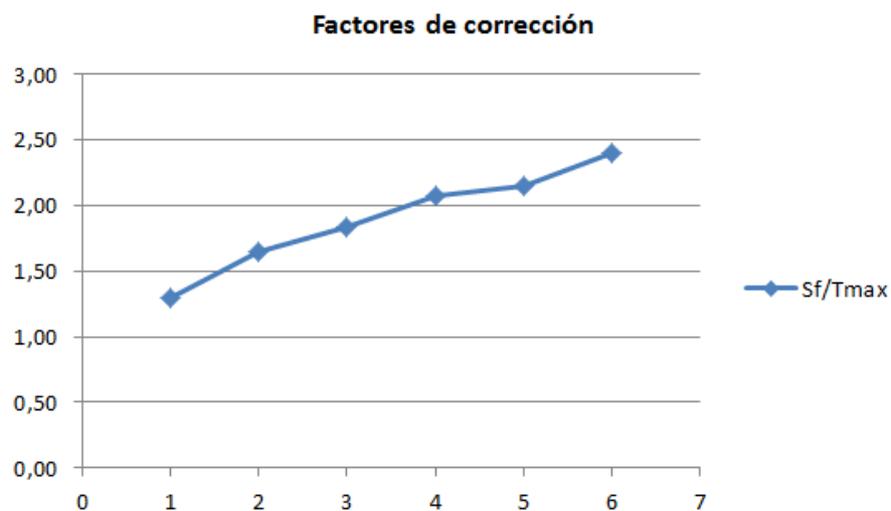


Figura 43: Ajuste de resultados "Sf"
Factores de corrección para ajuste numérico de las probetas.

3.1. Análisis de posibilidad constructiva de las probetas

Para la construcción de las probetas de sección circular no se plantean problemas tecnológicos importantes, pudiendo obtenerse en forma regular y seriada sin dificultades apreciables mediante centro de mecanizado. Si debería hacerse un estudio de volúmenes y densidades al tipificar distintos materiales, esto es para determinar las amplitudes que permitan controlar eficientemente las solicitaciones aplicadas, remitirse a la ecuación 4 y (Figura 3a y 3b). El mecanizado de este diseño debe hacerse utilizando inserto en buen estado y con bajas velocidades, se debe obtener un acabado sin rayas ni micro fisuras.

Para las probetas planas se consideró el mecanizado de la probeta mediante corte por agua a alta presión o métodos de desbaste y rectificación mediante herramientas por insertos de pequeño tamaño, por métodos de limado. Todo lo anterior con terminación rectificado espejo.

Se consideró el mecanizado de la pieza de montaje (encastre), mediante centro de mecanizado, por método de fresado. Esta solución requiere necesariamente un trabajo cuidadoso en la construcción y el centrado, se plantean dos problemas a estudiar para su utilización de manera que el resultado se logre y tenga repetitividad, que sea posible de extrapolar a nuevos materiales y que permita el rediseño y mejora continua además de un ajuste fino

- El mecanizado eficiente y controlado de la entalla.
- El centrado eficiente de la probeta para evitar que aparezcan solicitaciones de flexión.

4. CONCLUSIONES

- La simulación determinó la adecuación de las condiciones de excitación que el equipamiento existente puede aplicar a las probetas diseñadas. La utilización de una solicitación inercial (que depende de la dimensión de cada probeta) evita la variación de potencia a desplegar por el equipo generador de onda y del transductor a diferencia del método utilizado en los ensayos que han hecho otros grupos de trabajo. Logrando los resultados buscados, con una excitación fija.
- La pérdida de sensibilidad detectada para cierto número de ciclos se corresponde con el cambio de pendiente esperada dentro de los diagramas normales de fatiga (NACA-tech, 1996) por lo que no debe interpretarse como dificultad importante de sensibilidad debida al ensayo o diseño de la probeta y si debida al comportamiento del material, los ensayos permitirán evaluar esta condición.
- La variación de la entalla de la probeta y su influencia permite sospechar el desarrollo de la evaluación de sensibilidades de entalla típicas para futuros materiales bajo el mismo estado de solicitación.
- Este tipo de ensayos mediante ultrasonido requiere determinar la respuesta vibratoria natural de las probetas para evitar que afecten las condiciones de solicitación por aparición de resonancia. Los códigos comerciales utilizados para las simulaciones tienen esta capacidad, por lo que este método permite evitar esta condición y determinar diseños convenientes de probetas.
- Mediante las simulaciones se puede controlar los posibles resultados que validen numéricamente el modelo propuesto, la frecuencia de trabajo del equipo permite hacer ensayos en tiempos menores de 10 minutos, lo que implica llegar hasta los 10^7 ciclos, valor considerado como de vida infinita.

5. REFERENCIAS

- ASM, I. (2000). *Mechanical Testing and Evaluation, Volume 8 of the ASM Handbook*. Materials Park: ASM Handbook.
- ASTM/Standards. (1994). *Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus*. United States: ASTM edition.
- Bello, C. (2012). Condiciones de Validez de la norma ASTM-G32: análisis crítico para aleaciones de alto níquel. *II congreso de Educadores en Ciencias Empíricas en Facultades de Ingeniería 2012 - ECEFI2012*. Mendoza: Facultad Regional Mendoza.
- Kromp W., Kromp K., Bitt H., Langer H., Weiss B. (1973). Ultrasonics Internacional 1973 Conference. Guilford, Surrey, U.K.: IPC Science and Technology Publicatións.
- NACA-tech, N. 3. (1996). *Diagrama de resistencia a la fatiga para materiales ferrosos*.
- Shigley, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Wells, J. M, Buck O., Roth L. D., Tien J. K. (1982). Ultrasonic Fatigue. Warradale, PA.: TMS-AIME.