



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA EN LA MEMBRANA
DE INTERCAMBIO PROTÓNICO NAFION 115, BAJO LA
MODALIDAD DE FLEXIÓN TRES PUNTOS**

TESIS:

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. RAMÓN HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

ASESOR:

DR. GONZALO MARIANO DOMÍNGUEZ ALMARAZ

COASESOR:

M.C. VÍCTOR LÓPEZ GARZA

Morelia, Michoacán. Marzo de 2017.



RESUMEN.

Actualmente es imperativo la búsqueda de fuentes alternas que disminuyan en gran medida el uso de combustibles fósiles, que son la principal fuente de energía en gran parte del mundo. Entre estas fuentes alternas que también se les conoce como renovables, se encuentran la solar, eólica, marítima, hidráulica y las celdas de combustibles, por mencionar las más importantes. Concerniente a las celdas de combustible, actualmente su caracterización físico-química ha sido intensamente estudiada; no así sus propiedades mecánicas, en particular la resistencia en fatiga.

En este trabajo se llevó a cabo el estudio del comportamiento en fatiga ultrasónica del material polimérico Nafion 115, membrana de intercambio protónico, utilizadas en las celdas de combustible. Usando el método de análisis numérico modal se obtuvieron las dimensiones geométricas del punzón utilizado para aplicar la carga ultrasónica, que cumplen con la condición de resonancia: su frecuencia natural de oscilación próxima a la frecuencia de excitación (20 KHz).

Al efectuar mediciones sobre la resistencia en fatiga de este elemento es posible prever su comportamiento en fatiga, bajo condiciones reales de uso; particularmente cuando este elemento es sometido a cargas mecánicas oscilantes durante su uso industrial.

Se llevaron a cabo pruebas en fatiga ultrasónica mediante el método de flexión tres puntos a probetas del material expuestos al medio ambiente.

Con la investigación se abordó un área de oportunidad para investigar la resistencia en fatiga de este material polímero utilizado en celdas de combustible. Con el conocimiento de la resistencia en fatiga de este material, el proceso de diseño en celdas de combustible puede encontrar mejoras en la prevención de fallas por cargas mecánicas y una adecuada prevención de vida en fatiga de este elemento.

Palabras clave: Celda de combustible, Nafion 115, fatiga ultrasónica, análisis numérico modal, frecuencia natural de oscilación.

ABSTRACT.

Nowadays it is imperative to search alternative sources that help to reduce the usage of fossil fuels, which are the main source of energy in all around of the world. Among these alternative sources that are also the ones known as renewable: solar, wind, sea, hydraulics and fuel cells, just to name a few. Currently, Fuel cells physico-chemical characterization has been intensely studied, not so its mechanical properties, in particular fatigue resistance.

In this work it will be carried out the study of the behavior in ultrasonic fatigue of the polymeric material Nafion 115, that is a proton exchange membrane, used in fuel cells. Using the method of modal numerical analysis, the geometric dimensions of the punch used to apply the ultrasonic load, which meet the resonance condition, were obtained: its natural oscillation frequency close to the excitation frequency (20 KHz).

When making measurements on the fatigue strength of this element it is possible to predict its behavior in fatigue, under real conditions of use; Particularly when this element is subjected to oscillating mechanical loads during its industrial use

Ultrasonic fatigue tests shall be performed on specimens of this material under natural environmental conditions.

The research addressed as area of opportunity to investigate the fatigue strength of this polymer material used in fuel cells. With the knowledge of the fatigue resistance of this material, the design process in fuel cells can find improvements in the prevention of failures by mechanical loads and an adequate prevention of fatigue life of this element.

ÍNDICE.

RESUMEN.....	II
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	6
NOMENCLATURA.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	11
HIPÓTESIS.....	12
OBJETIVOS.....	13
Objetivo General.....	13
Objetivos específicos.....	13
METODOLOGÍA.....	14
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y MATERIAL DE PRUEBA.....	15
1.1. CELDA DE COMBUSTIBLE.....	15
1.1.1. Principio de operación.....	15
1.1.2. Clasificación de las celdas de combustible.....	15
1.1.3. Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico.....	16
1.2. MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO.....	17
1.3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA MEMBRANA NAFION 115.....	19
CAPÍTULO 2: SIMULACIÓN DE COMPONENTES.....	21
2.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PUNZÓN.....	21
2.1.1. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA DEL PUNZÓN.....	24
2.2. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA MEMBRANA NAFION 115.....	33

2.2.1. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA MEMBRANA NAFION 115.....	37
CAPÍTULO 3: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MECANIZADO DEL DISPOSITIVO DE SUJECIÓN Y PUNZÓN.....	45
3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO DE SUJECIÓN.....	45
3.2. MAQUINADO DEL PUNZÓN.....	50
3.3. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.....	55
CAPÍTULO 4: ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	58
4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	58
4.2. RESULTADOS DE FATIGA ULTRASONICA EN MODALIDAD FLEXIÓN TRES PUNTOS.....	59
4.3. RESULTADOS OBTENIDOS POR ANÁLISIS TERMOGRÁFICOS.....	62
4.4. ANÁLISIS SOBRE LAS SUPERFICIES DE FRACTURA RELACIONADAS CON EL INICIO Y PROPAGACIÓN DE GRIETAS.....	65
CONCLUSIONES.....	69
TRABAJOS FUTUROS.....	70
ACCIONES DE DIFUSIÓN REALIZADAS.....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. 1. Funcionamiento de una celda de combustible.	15
Figura 1. 2. Clasificación de celdas de combustible.	16
Figura 1. 3. Celda de combustible del tipo membrana de intercambio protónico.	17
Figura 1. 4. Membrana Nafion 115.	18
Figura 1. 5. Presupuesto empresa Española.	19
Figura 1. 6. Presupuesto empresa de Jalisco.	19
Figura 1. 7. Presupuesto empresa de Morelia.	20
Figura 1. 8. Presupuesto de la empresa FuelCellStore.	20
Figura 2. 1. Asignación de propiedades mecánicas del material.	22
Figura 2. 2. Geometría del punzón acorde a la frecuencia natural de oscilación.	23
Figura 2. 3. Valor de la frecuencia natural de oscilación del punzón.	24
Figura 2. 4. Dimensionamiento de malla del punzón (0.7mm).	27
Figura 2. 5. Propiedad de malla Calidad del Elemento.	28
Figura 2. 6. Propiedad de malla Relación de Aspecto.	29
Figura 2. 7. Propiedad de malla Relación Jacobiana.	29
Figura 2. 8. Características de malla Factor de Deformación.	30
Figura 2. 9. Características de malla Desviación Paralela.	30
Figura 2. 10. Características de malla Ángulo de Esquina Máximo.	31
Figura 2. 11. Características de malla Oblicuidad.	31
Figura 2. 12. Características de malla Calidad Ortogonal.	32
Figura 2. 13. Módulo estático estructural.	33
Figura 2. 14. Asignación de propiedades mecánicas de los materiales.	34
Figura 2. 15. Geometrías del ensamble punzón, membrana y mordazas, bajo condición de esfuerzo en flexión tres puntos.	35
Figura 2. 16. Presión y desplazamiento inicial sobre la membrana Nafion 115.	36
Figura 2. 17. Concentración de esfuerzos sobre la membrana Nafion 115.	36
Figura 2. 18. Dimensionamiento final de la malla con valor de 60 μm	39
Figura 2. 19. Características de malla Calidad del Elemento.	40
Figura 2. 20. Características de malla Relación de Aspecto.	41
Figura 2. 21. Características de malla Relación Jacobiana.	41
Figura 2. 22. Características de malla Factor de Deformación.	42
Figura 2. 23. Características de malla Desviación Paralela.	42
Figura 2. 24. Características de malla Ángulo de Esquina Máximo.	43
Figura 2. 25. Características de malla Oblicuidad.	43
Figura 2. 26. Características de malla Calidad Ortogonal.	44

Figura 3. 1. Dimensiones de las probetas de la membrana Nafion 115.	45
Figura 3. 2. Diseño de mecanismo de tensión.	46
Figura 3. 3. Mordazas para la membrana Nafion 115.	47
Figura 3. 4. Mecanismo de tensión con celda de carga digital.	48
Figura 3. 5. Uso de taller máquina y herramientas de la facultad de mecánica, (a) torno de eje paralelo convencional, (b)rectificación de componentes, (c) uso de maquina fresadora.	49
Figura 3. 6. (a) Aluminio comercial hexagonal, (b) Proceso de Maquinado del punzón, (c) geometría terminada del punzón sin chaflán.	50
Figura 3. 7. (a) Cabezal divisor de fresadora (b) Punzón con chaflán terminado material	51
Figura 3. 8. Punzón en pruebas de resonancia.	52
Figura 3. 9. Opresor de conexión entre el punzón y el sonotrodo fracturado.	53
Figura 3. 10. Fractura del punzón con material aluminio en aleación 6061, (a) imagen del punzón fracturado, (b) visualización de la grita con el método de líquidos penetrantes.	53
Figura 3. 11. Punzón en pruebas de resonancia material Aluminio aleación 7075, (a) antes de la prueba (b) después de la prueba.	54
Figura 3. 12. Mecanismo para calibración de parámetros iniciales.	55
Figura 3. 13. Modificaciones del mecanismo para calibración de parámetros iniciales, (a) placa guía y resorte, (b) rectificación de la placa soporte de punzón provisional, (c) mecanismo de calibración listo para usarse.	56
Figura 4. 1. Calibraciones de tensión inicial en la máquina de fatiga ultrasónica.....	58
Figura 4. 2. Imágenes termográficas del promedio de temperaturas.....	64
Figura 4. 3. Análisis de inicio y propagación de fisura probeta No. 22 Tabla 4.2, sometida a 18 volts con desplazamiento por vibración ultrasónica de 25 μm	66
Figura 4. 4. Análisis de inicio y propagación de fisura probeta No. 30 Tabla 4.2, sometida a 20 volts con desplazamiento por vibración ultrasónica de 23 μm	67
Figura 4. 5. Análisis de inicio y propagación de fisura Probeta No. 8 Tabla 4.2, sometida a 15 volts con desplazamiento por vibración ultrasónica de 19 μm	68

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2. 1. Análisis de convergencia de malla del punzón.	25
Tabla 2. 2. Características del equipo de cómputo.....	26
Tabla 2. 3. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados.	34
Tabla 2. 4. Análisis de convergencia de malla de la membrana Nafion 115.....	38
Tabla 2. 5. Características del equipo de cómputo.....	39
Tabla 3. 1. Mediciones con tensión inicial de 30 gramos.	57
Tabla 3. 2. Mediciones con tensión inicial de 60 gramos.	57
Tabla 3. 3. Mediciones con tensión inicial de 90 gramos.	57
Tabla 4. 1. Valor de los ensayos en modalidad de fatiga en flexión tres puntos.....	60
Tabla 4. 2. Mediciones de comportamientos termográficos.	63

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Grafica 2. 1. Comparación de la deformación (ordenadas) en relación con el número de elementos de la malla (abscisas).....	26
Grafica 2. 2. Comparación de la deformación (ordenadas) en relación con el número de elementos de la malla (abscisas) de la membrana Nafion 115.	38
Grafica 4. 1. Grafica lineal del comportamiento del voltaje de la fuente en relación al desplazamiento inducido.	59
Grafica 4. 2. Comportamiento de vida en fatiga de la membrana Nafion 115.	61

NOMENCLATURA.

Nafion 115, Membrana de intercambio protónico utilizada en celdas de combustible.

20 KHz, Frecuencia de excitación de la fuente de la máquina de fatiga ultrasónica.

E, Módulo de Young o módulo de elasticidad.

ν , Relación de Poisson.

ρ , Densidad.

μm , Desplazamiento inducido o deformación.

KPa, Kilo Pascales unidad de medida para el esfuerzo.

MPa, Mega Pascales unidad de medida para el esfuerzo.

σ , Esfuerzo.

HR, Humedad relativa.

INTRODUCCIÓN.

Los primeros trabajos realizados como base para la generación de energía eléctrica en forma electroquímica, se llevaron a cabo por William Robert Grove en el año de 1838. Ese dispositivo contaba con un electrodo de platino inmerso en ácido nítrico y un electrodo de zinc inmerso en sulfato de zinc quien la denominó "pila de Grove". Aproximadamente generaba doce amperios de corriente a ocho voltios [1].

Actualmente se han desarrollado dispositivos electroquímicos que convierten la energía de una reacción química directamente en energía eléctrica en forma de corriente continua, denominados "celdas de combustible", estas se clasifican en función del electrolito empleado, su principio fundamental es la generación de energía eléctrica por medio de un electrolito, una membrana protónica y oxígeno del medio ambiente el cual ayuda a producir la reacción y la generación de energía eléctrica. Esta energía es utilizada actualmente en aplicaciones industriales, aeroespaciales para el transporte e incluso para uso marítimo.

Un elemento constitutivo de las celdas de combustible es la membrana protónica que es un componente importante en la generación de energía eléctrica; además, debido a que la celda de combustible está colocada dentro de un vehículo y particularmente está sometida a constantes cargas mecánicas oscilantes durante su uso, es de particular importancia conocer el comportamiento en fatiga de este elemento interno de las celdas de combustible. Actualmente su caracterización físico-química ha sido intensamente estudiada; no obstante, no es el caso de sus propiedades mecánicas, en particular la resistencia en fatiga [1].

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El estudio del comportamiento mecánico en la membrana polimérica Nafion 115 utilizada en celdas de combustible, es un tema de interés científico tecnológico internacional: los fabricantes de celdas de combustible tienen poca información respecto al comportamiento mecánico de este elemento; por lo tanto, es importante conocer el comportamiento mecánico de éste.

Derivado de las condiciones a las que se someterán las celdas de combustible de acuerdo a la estructura o diseño del medio donde será utilizado, es importante conocer el comportamiento mecánico debido a las diferentes cargas mecánicas oscilantes a las que pueden ser sometidos.

Actualmente el uso de las celdas de combustibles se ha incrementado considerablemente en muchas aplicaciones industriales; no obstante, los resultados experimentales de sus propiedades mecánicas son relativamente limitadas en la actualidad [7]. También es un área de oportunidad para mejorar el funcionamiento o rendimiento de una celda de combustible, ya que, conociendo comportamientos mecánicos de este elemento se pretende aportar información científica tecnológica para los fabricantes de celdas de combustible.

ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA.

El estudio en producción de energía mediante celdas de combustible fue realizado por el organismo estadounidense Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés). A principios de la década de 1960, la NASA necesitaba una forma de proporcionarles electricidad a los vuelos espaciales tripulados y las celdas de combustible eran la solución. Eran más seguras que la energía nuclear, más barata que la solar y más liviana que las baterías. Los investigadores continúan buscando las mejores combinaciones de combustible, electrodos y electrolitos para todo tipo de aplicaciones [2].

Actualmente los fabricantes de celdas de combustible están preocupados en reducir el costo de producción de estos dispositivos y se han realizado mejoras fundamentales donde destaca la sustitución del platino (electrocatalizador) por materiales comunes y de fácil adquisición. Los fabricantes de celdas de combustible se interesan por el desarrollo de las membranas protónicas que simbolizan un elemento constitutivo y que, por desconocimiento de ensayos mecánicos de estos, se pueden realizar mejoras significativas al desarrollo de las celdas de combustible. Hasta ahora solo se han desarrollado diferentes polímeros que funcionan como membranas protónicas mejorando solo su capacidad de ionización.

JUSTIFICACIÓN.

El estudio de las propiedades mecánicas de los materiales polímeros utilizados en celdas de combustible, es un tema de interés científico tecnológico internacional: los fabricantes de celdas de combustible tienen poca información respecto al comportamiento mecánico, en particular de la resistencia a la fatiga, de esta membrana de intercambio protónico Nafion 115.

El avance en el conocimiento de las propiedades mecánicas, en particular de la resistencia a fatiga, así como de los parámetros que influyen en inicio y la propagación de fisuras, constituyen valores agregados científicos de particular interés, para los fabricantes de celdas de combustible.

HIPÓTESIS.

Es posible obtener resultados en fatiga ultrasónica en la membrana polimérica Nafion 115 utilizada en celdas de combustible.

También es posible llevar a cabo análisis de superficie de fractura para establecer las posibles causas de iniciación y propagación de fisuras.

OBJETIVOS.

Objetivo General.

Obtener resultados en fatiga ultrasónica bajo la modalidad de flexión tres puntos, en la membrana polimérica Nafion 115 utilizada en celdas de combustible. También, llevar a cabo estudios sobre la superficie de fractura para establecer posibles causas de falla.

Objetivos específicos.

- Llevar a cabo el estudio bibliográfico para conocer el estado del arte en esta temática.
- Adquirir el material polimérico (membrana de intercambio protónico), objeto de este estudio.
- Llevar a cabo la construcción de un dispositivo para aplicar tensión plana a la membrana Nafion 115.
- Llevar a cabo simulaciones numéricas para determinar las dimensiones geométricas del punzón, utilizado para aplicar carga ultrasónica en forma perpendicular a la superficie del Nafion 115. Este elemento debe cumplir condiciones de resonancia al conectarse con la máquina ultrasónica: su frecuencia natural de oscilación es obtenida mediante simulación numérica modal.
- Maquinado y construcción del punzón (aluminio 7075), que se utiliza para aplicar la carga ultrasónica sobre la membrana Nafion 115.
- Llevar a cabo pruebas experimentales preliminares con un material similar a la membrana Nafion 115 (acetato), con objeto de calibrar el sistema de ensayos.
- Llevar a cabo análisis de los resultados experimentales sobre las superficies de fractura relacionadas con el inicio y propagación de grietas.
- Promover la difusión científica de los resultados obtenidos mediante congresos nacionales y/o internacionales y la publicación en revistas internacionales indexadas.

METODOLOGÍA.

La metodología utilizada para el estudio del comportamiento en fatiga ultrasónica del material membrana de intercambio protónico utilizada en celdas de combustible consiste en:

- Obtención de la membrana de intercambio protónico Nafion 115, análisis de las propiedades físicas, químicas y mecánicas.
- Definición del método de trabajo. Se observa que no se pueden obtener probetas de sección transversal circular necesarias para someter a fatiga ultrasónica; por esta razón, se decidió realizar las pruebas experimentales, bajo la modalidad de fatiga ultrasónica en flexión tres puntos.
- Simulación numérica de componentes haciendo uso de programa computacional con el objeto de realizar análisis modal y análisis de convergencia de malla, para reproducción de condiciones físicas. Obtención de frecuencia natural de oscilación con el propósito de hacer cumplir condiciones de resonancia bajo las condiciones de excitación de la fuente de fatiga ultrasónica (20 kHz).
- Diseño y construcción de componentes. Mecanismo de sujeción el cual aplicará fuerza a la membrana Nafion 115, reproduciendo una aproximación de la tensión a la que trabaja en la celda de combustible. Punzón encargado de transmitir la alta frecuencia a la superficie de la membrana. Mecanismo de calibración de los desplazamientos contra los esfuerzos en la membrana.
- Ensayos experimentales en fatiga ultrasónica que se llevaron a cabo verificando las dimensiones obtenidas por simulación numérica y que cumplen físicamente con la condición de resonancia. Estos ensayos se llevan a cabo en la máquina de fatiga ultrasónica patentada con el número 323948 IMPI 2014.
- Análisis de los resultados experimentales en modalidad flexión tres puntos, termográficos y de fractura relacionados con el inicio y propagación de grietas.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y MATERIAL DE PRUEBA.

1.1. CELDA DE COMBUSTIBLE.

1.1.1. Principio de operación.

La pila de combustible es una celda galvánica donde se lleva a cabo una reacción espontánea entre un combustible y un oxidante que produce: corriente eléctrica, calor y agua como productos de la reacción, como se ilustra en la **Figura 1.1**. En una celda típica, el combustible se alimenta en el ánodo y el oxidante en el cátodo, ambos en forma continua. Las reacciones electroquímicas se llevan a cabo en los electrodos y simultáneamente se genera una corriente eléctrica [3].

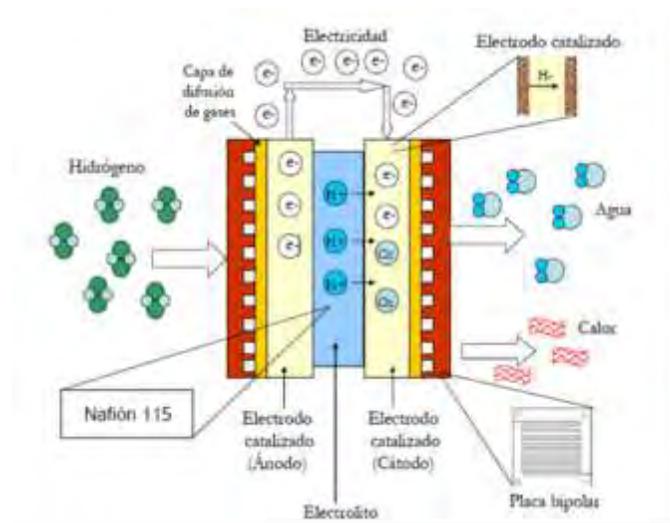


Figura 1. 1. Funcionamiento de una celda de combustible.

1.1.2. Clasificación de las celdas de combustible.

Las celdas de combustible se clasifican por el tipo de electrolito que utilizan, lo que determina a la vez su temperatura de operación. En la **Figura 1.2**, se presenta un resumen de las

principales celdas de combustible, donde se indican el tipo de electrolito empleado, su rango de temperatura de operación, así como sus aplicaciones principales.

PILAS	PEM	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nombre	Pila de Membrana de Intercambio Protónico	Pila de Metanol Directo	Pila alcalina	Pila de ácido fosfórico	Pila de Carbonatos fundidos	Pila de óxidos sólidos
Carga	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Temperaturas	50-120°C	50-100°C	90-100°C	150-200°C	600-700°C	700-1000°C
Eficiencias	60%	40%	60-70%	40%	45-50%	60%
Electrolito	Membrana de polímeros	Membrana de polímeros	KOH disuelto en agua	Ácido fosfórico	Carbonatos fundidos	Óxidos sólidos
Combustible	H ₂	Metanol	H ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂
Usos	Transporte, portátiles, residencial	Portátiles	Espaciales	Generación eléctrica distribuída. Automoción	Generación eléctrica, cogeneración	Generación eléctrica, cogeneración

Figura 1. 2. Clasificación de celdas de combustible [1].

1.1.3. Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico.

Las celdas de combustible de intercambio protónico como la que se muestra en la **Figura 1.3.**, (PEMFC) utilizan una membrana polimérica para transferir protones (H⁺) desde el ánodo hacia el cátodo. Esta membrana es un electrolito sólido. En el interior de la membrana se forman canales por los cuales únicamente los protones (H⁺), y también algunas moléculas de agua pueden atravesarlos y migrar del ánodo hacia el cátodo para reaccionar con el oxígeno [3].



Figura 1. 3. Celda de combustible del tipo membrana de intercambio protónico [2].

1.2. MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO.

Un elemento constitutivo de las celdas de combustible es la membrana protónica que es un elemento importante en la generación de energía eléctrica. Sistemáticamente en la industria automotriz la celda de combustible está colocada dentro del vehículo, con frecuencia bajo este tipo de aplicación la celda de combustible y su membrana de intercambio protónico están sometidos a cargas mecánicas oscilantes durante su uso. Actualmente su caracterización físico-química ha sido intensamente estudiada; no así sus propiedades mecánicas en particular la resistencia en fatiga.

Una vez estudiado la clasificación, características y uso común de las celdas de combustible, se decide trabajar con las celdas de combustible del tipo polímero sólido o *celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC por sus siglas en ingles)*, debido a su amplia aplicación en medios de transporte.

Al observar tanto las características físicas como químicas y mecánicas de la membrana Nafion 115, se observa que no se pueden obtener probetas de sección transversal circular necesarias para someter a fatiga ultrasónica; por esta razón, se decidió realizar un mecanismo el cual aplique tensión a una sección transversal rectangular de la membrana, para poder realizar las pruebas experimentales, bajo la modalidad de fatiga ultrasónica en flexión tres puntos.

**PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE LA MEMBRANA
NAFION 115.**

EMPRESA – PROVEEDOR:	FUEL CELL STORE (USA).
FABRICANTE:	DUPONT (THE CHEMOURS COMPANY).
ESPESOR:	0.128 mm
PESO:	250 g/m ²
DENSIDAD RELATIVA:	1.98
DENSIDAD:	1980 Kg/m ³
MODULO DE POISSON:	0.4
MODULO DE TENSIÓN:	249 MPa. Con 50% de humedad relativa a 23°C
TEMPERATURA DE TRANSFORMACION VITREA:	115 °C



Figura 1. 4. Membrana Nafion 115 [2].

1.3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA MEMBRANA NAFION 115.

La obtención de la membrana polimérica de intercambio protónico Nafion 115, producto que es utilizado principalmente para de celdas de combustibles y el proceso de electrolisis del agua, su obtención se llevó a cabo con cierta dificultad. En primer lugar, se contactó al fabricante vía telefónica y correo electrónico, realizando contacto con el área de ventas de la empresa *The Chemours Company México*, quienes agendaron una cita donde obtuvimos una respuesta negativa de parte del departamento de mencionada empresa. Posteriormente una búsqueda intensiva por internet conduce a localizar la empresa H2 Planet de España, la cual nos proporciona un costo elevado de este material, Figura 1.5. A partir de esta respuesta, se decide consultar al departamento de compras de la Universidad Michoacana de San Nicola de Hidalgo, solicitando apoyo para la obtención de la membrana Nafion 115. La respuesta recibida concierne dos cotizaciones de proveedores nacionales que resultaron aproximadamente al doble del costo respecto de la empresa española, Figuras 1.6 y 1.7.

CODIGO MATERIAL	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	DESCRIPCIÓN TOTAL	TOTAL	IVA
MEMBRANA	Membrana polimérica	1	479,00		479,00	

BASE IMPORTE	GASTOS DE ENTREGA	IVA 21%	IMPORTE TOTAL
€ 479,00	€ 24,30	€ 100,00	€ 603,30

Figura 1. 5. Presupuesto empresa Española.

CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNIDAD	DESCRIPCION TOTAL	TOTAL	IVA
1	Membrana polimérica	479,00		479,00	

BASE IMPORTE	GASTOS DE ENTREGA	IVA 21%	IMPORTE TOTAL
€ 479,00	€ 24,30	€ 100,00	€ 603,30

Figura 1. 6. Presupuesto empresa de Jalisco.

ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA EN LA MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO NAFION 115, BAJO LA MODALIDAD DE FLEXIÓN TRES PUNTOS

DISTRIBUIDORA QUIMICA HELSAM, S.A. DE C.V.
 REACTIVOS QUIMICOS, VITRIERIA Y EQUIPO PARA LABORATORIO
 R.F.C. DQHU000143

Colaboración No. 2102-VAC
 Fecha: 20 18 FEBRERO DE 2016

CLIENTE: UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HEDILLO
ENTREGA POR: Distribuidora Quimica Helsam, S.A. de C.V.

UBICACION: DEPARTAMENTO DE COMPRAS
 ALMACEN GENERAL
 C.P. 58000 - Morelia, Michoacán
 R.F.C. 0028 050075 200
 Tel/Fax: 01 442 323 18 03 Tel 1 2373 11
 Correo: ventas@quimicahelsam.com

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO DE ENTREGA	PRECIO UNITARIO PROMEDIO NACIONAL	IMPORTE PROMEDIO NACIONAL
2	MEMBRANA Añosa Membrana polimerizada (matricada) Saramonite Quibrell CTS, Michoacán, CDMX, M. 1.40" x 12" x 12" Rodamos 10000 m. Paquete tipo "membrana" Packaging 1 en el paquete	46 SEMANAS \$ 2043.00	\$ 1021.50	\$ 2043.00

CONDICIONES DE VENTA:
 PRECIO EXCLUYENDO IVA Y COMISIÓN DE BROKERIA
 SE RECOMIENDA EL 10% DE IVA
 TRATADO DE UNIDAD ADMINISTRATIVA
 CANCELACIÓN VALIDA POR 30 DIAS
 CANCELACIONES DE INICIO (30 DIAS)
 ENTREGA EN SUS INSTALACIONES
 UNA VEZ FINALIZADO EN PODERADO NO ACEPTA CANCELACIONES

Subtotal	\$ 4086.00
IVA	\$ 817.20
TOTAL	\$ 4903.20

Figura 1. 7. Presupuesto empresa de Morelia.

Finalmente, se toma la decisión de adquirir la membrana a la empresa FuelCellStore (USA), por un costo de 209 US dólares. Las cotizaciones de las dos empresas mexicanas mencionadas anteriormente alcanzaron el rango de los treinta mil pesos con las mismas propiedades, y con un tiempo de entrega mayor.

FuelCellStore
 Education, Research, and Fun since 1999

RECEIPT

Fuel Cell Store
 1902 Pinon Drive, Suite B
 College Station, Texas 77845

Telephone: (979) 703-1925
 Fax: (979) 314-1122
 Email: sales@fuelcellstore.com
 Website: fuelcellstore.com

Date Added: 03/07/2016
Order ID: 2440
Payment Method: Credit / Debit Card
Shipping Method: FedEx International Economy

Payment Address	Shipping Address
ramon hernández universidad michoacana de san n francisco j mujica morelia 58000 Michoacán de Ocampo Mexico ramonhersa@hotmail.com 7581038164	ramon hernández universidad michoacana de san n francisco j mujica morelia 58000 Michoacán de Ocampo Mexico

Figura 1. 8. Presupuesto de la empresa FuelCellStore.

CAPÍTULO 2: SIMULACIÓN DE COMPONENTES.

2.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PUNZÓN.

Para llevar a cabo ensayos en fatiga ultrasónica de la membrana polimérica Nafion 115, se seleccionó la modalidad de fatiga en flexión tres puntos. Con este propósito, se llevaron a cabo simulaciones numéricas para determinar las dimensiones geométricas de un punzón, utilizado para aplicar carga ultrasónica en forma perpendicular a la superficie de la membrana Nafion 115. Bajo esta modalidad, se analizó el comportamiento en fatiga ultrasónica y el inicio y propagación de fisuras.

El punzón es el elemento encargado de transmitir carga a la membrana Nafion 115; este elemento debe cumplir la condición de resonancia al conectarse con la máquina ultrasónica: su frecuencia natural de oscilación debe ser cercana a la frecuencia de excitación de 20 KHz. Dicha frecuencia natural de oscilación es obtenida mediante simulación numérica modal. El análisis modal para el punzón se llevó a cabo mediante el empleo del paquete de computación ANSYS Workbench® 15.0.

El material elegido para la fabricación del punzón, fue la aleación de aluminio nominación 7075. El primer paso para obtener la frecuencia natural de oscilación, consiste en asignar las propiedades mecánicas del material en el apartado de datos de ingeniería, debido a que el material del punzón es diferente al Aluminio que se encuentra en la base de datos de ingeniería de ANSYS Workbench®. Las propiedades mecánicas requeridas para esta simulación numérica son: módulo de Young (E) (módulo de elasticidad 72 GPa.), módulo de Poisson (ν)(0.33) y Densidad (ρ)(2800 Kg/m³), como se aprecia en la **Figura 2.1**.

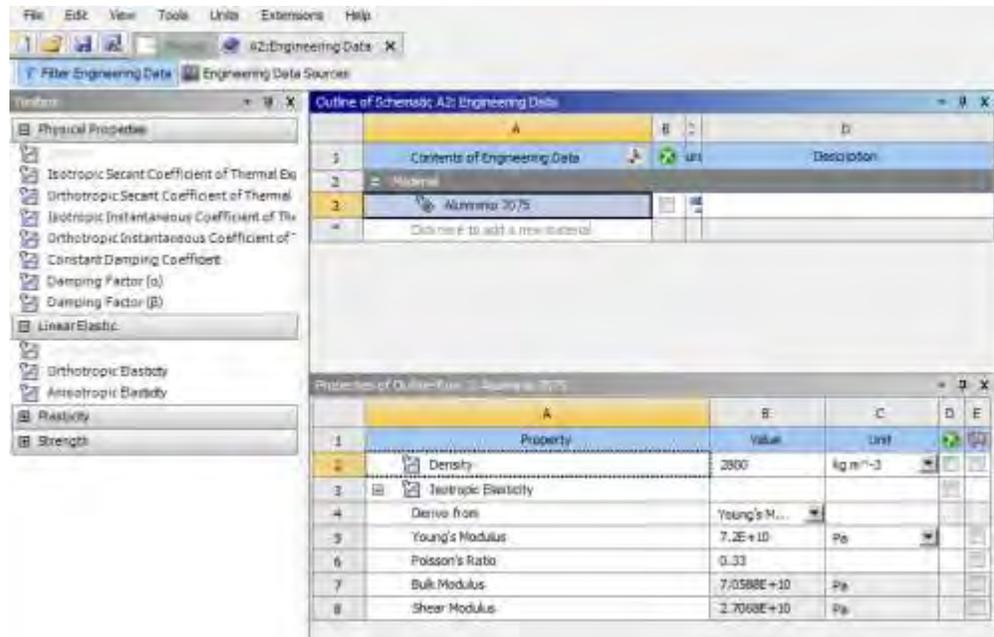


Figura 2. 1. Asignación de propiedades mecánicas del material.

El siguiente paso llevado en esta tesis para obtener la frecuencia natural de oscilación, fue la construcción geométrica del modelo proponiendo una longitud inicial de 80 milímetros (mm) de longitud, 10 mm de diámetro y se realiza con un pequeño chaflán de 20 mm de longitud a un ángulo de 12.68°, generando un espesor en la punta de 1 mm. Al validar este modelo numérico, el resultado fue una frecuencia natural de oscilación considerablemente más alta 34,344 Hertz (Hz). Un segundo intento que implicaron varias iteraciones modificando las dimensiones longitudinales del punzón se llevaron a cabo, hasta obtener una longitud adecuada de 133 mm, con la cual el resultado de la frecuencia natural de oscilación en dirección longitudinal, fue de 20,060 Hz como se aprecia en la **Figura 2.2**. Es importante resaltar que la condición de resonancia para esta máquina de fatiga ultrasónica se cumple con un margen de +/- 300 Hz, por lo que la frecuencia de 20060 Hz entra dentro de este rango. La verificación física de condición de resonancia se obtuvo directamente en la máquina de fatiga ultrasónica colocando el punzón con las dimensiones de la última simulación numérica, comprobando la continua vibración de este elemento. Estos ensayos se llevaron a cabo en la máquina de fatiga ultrasónica patentada con el número 323948 IMPI 2014.

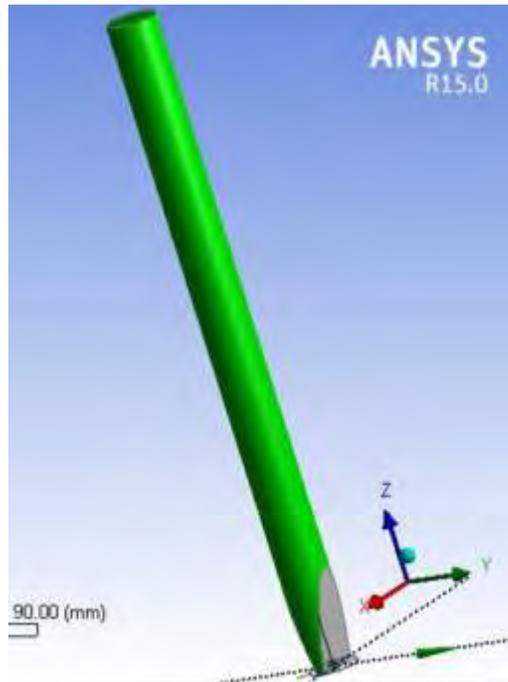


Figura 2. 2. Geometría del punzón acorde a la frecuencia natural de oscilación.

A continuación como se ilustra en la **Figura 2.3**, se obtuvo la frecuencia natural de oscilación del punzón alcanzando 20,060 Hz en dirección longitudinal a la geometría del material. El proceso de simulación numérica para obtener la frecuencia natural de oscilación consistió en las siguientes etapas: 1) asignación de las propiedades físico mecánicas del modelo a desarrollar, 2) llevar a cabo el mallado del modelo teniendo en cuenta las condiciones de frontera, 3) seleccionar la deformación total y un número de modos de vibración (20 modos de vibración) para localizar una vibración longitudinal en dirección al eje principal del punzón próxima a la frecuencia natural de oscilación, y por último 4) solucionar para obtener los resultados.

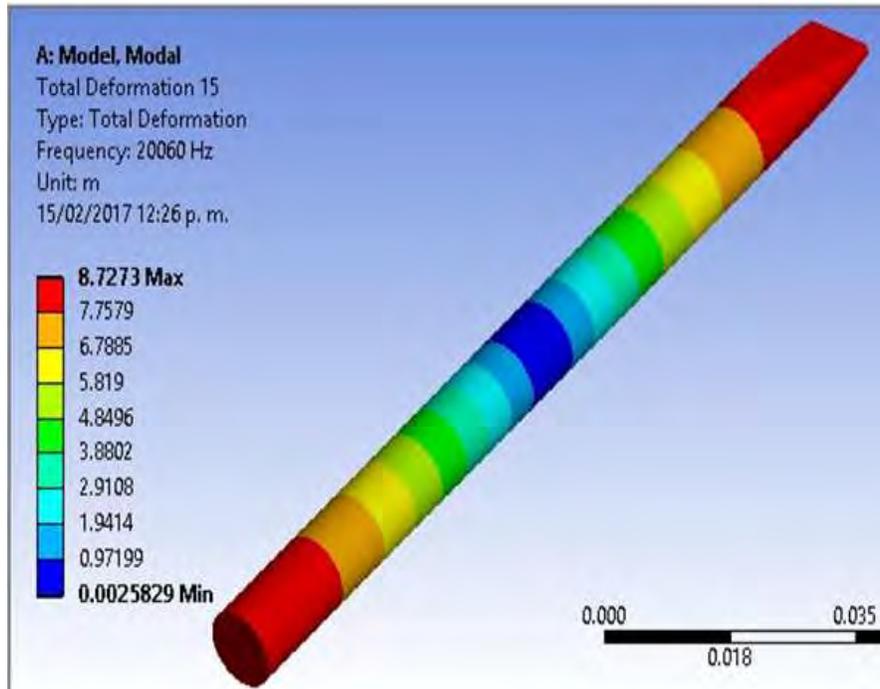


Figura 2. 3. Valor de la frecuencia natural de oscilación del punzón.

2.1.1. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA DEL PUNZÓN.

El procedimiento para realizar un análisis de convergencia de malla y de la simulación en general, es la necesidad de una básica comprensión de los conceptos fundamentales del método de los elementos finitos y un conocimiento en el programa computacional que va a ser utilizado.

El método de los elementos finitos considera la estructura como un ensamble de un número finito de partículas pequeñas, en donde su comportamiento es obtenido por la formulación de un sistema algebraico de ecuaciones que son solucionados por medio del programa a utilizar. Las partículas de tamaño finito, son llamadas elementos finitos. Los puntos donde los elementos finitos son interconectados, son conocidos como nodos, y el procedimiento de selección de nodos es llamado discretización o modelización. Normalmente el análisis de

elemento finito se realiza en una serie de siete pasos, donde los pasos 3 y 6 hacen referencia a la matriz de rigidez del elemento y la solución de las ecuaciones algebraicas lineales respectivamente; estos son calculados automáticamente por parte del programa utilizado. Los 5 pasos restantes constituyen lo siguiente: 1) discretización o modelado de la estructura, 2) propiedades del elemento, 4) aplicación de cargas, 5) definición de condiciones de frontera y 7) cálculo de esfuerzos [4].

Para este análisis en particular, para obtener la solución del modelado, se realiza la discretización y se asigna un método hexaédrico de 1 mm, como dimensionamiento original de la malla, arrojándonos 8,304 elementos, posteriormente se realiza un remallado para hacer converger la malla quedando esta de 0.7 mm y 50,939 elementos.

Como se aprecia en la **Tabla 2.1**, se realizaron tres iteraciones hasta hacer converger la malla, es decir que entre una deformación y otra exista un margen de variación del 5%. En este caso se observa que la malla converge automáticamente en la primera iteración, aunque se procede a realizar dos iteraciones más para poder demostrar un comportamiento lineal. Como se aprecia en la **Grafica 2.1**, donde se puede observar la convergencia con una línea que tiende a un valor constante al incrementar el número de elementos.

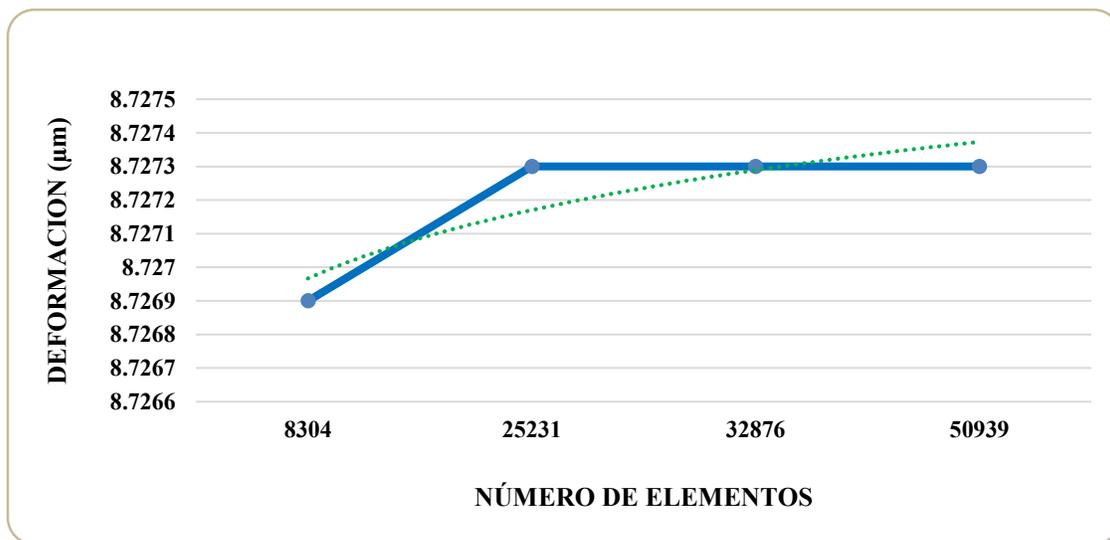
Tabla 2. 1. Análisis de convergencia de malla del punzón.

ITERACIONES DEL PUNZÓN		
DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA (m)	NÚMERO DE ELEMENTOS	DEFORMACIÓN (μm)
0.001	8304	8.7269
0.0009	25231	8.7273
0.0008	32876	8.7273
0.0007	50939	8.7273

El hecho de considerar las características del equipo de cómputo es un factor importante para el análisis de convergencia de malla, con el cual se lleva a cabo la simulación, como se aprecia en la **Tabla 2.2**, así mismo se aprecia en la **Figura 2.4**, el ultimo dimensionamiento de malla (0.7 mm), con el cual se obtiene la convergencia.

Tabla 2. 2. Características del equipo de cómputo.

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CÓMPUTO	
FABRICANTE:	TOSHIBA
MODELO:	SATELLITE S40 Dt-A
PROCESADOR:	AMD A8 HD GRAPHICS 1.7 GHz
MEMORIA:	6 GB
TIPO DE SISTEMA:	S.O. 64 BITS PROCESADOR X64
EDICIÓN DE WINDOWS:	WINDOWS 8.1
DISCO DURO:	HD 1TB
SOFTWARE	ANSYS V.15.0



Grafica 2. 1. Comparación de la deformación (ordenadas) en relación con el número de elementos de la malla (abscisas).

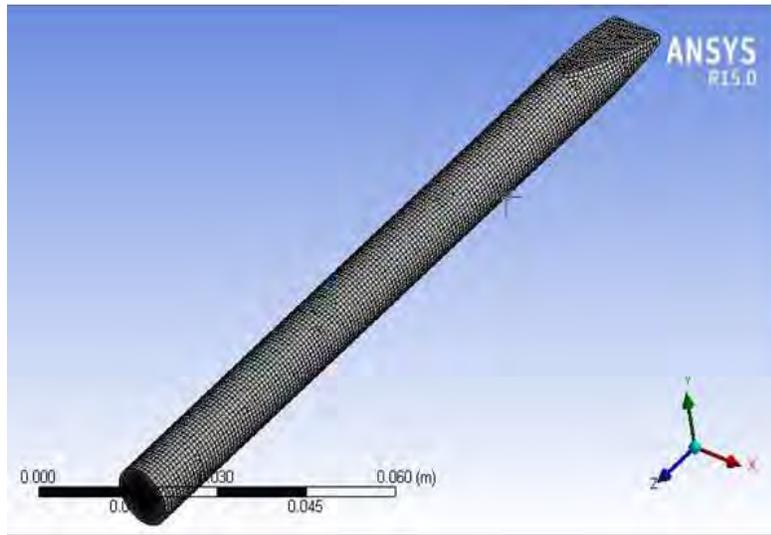
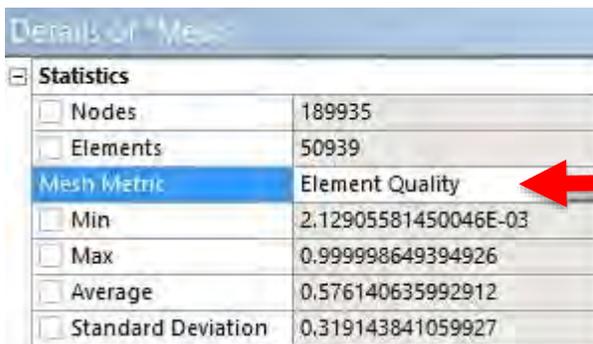


Figura 2. 4. Dimensionamiento de malla del punzón (0.7mm).

Las propiedades de la malla tales como: Calidad del Elemento, Relación de Aspecto, Relación Jacobiana, Factor de Deformación, Desviación Paralela, Ángulo de Esquina Máximo, Oblicuidad y Calidad Ortogonal, son de particular importancia que se toman en cuenta para el análisis de convergencia de malla. Estas son calculadas por el programa y se toma en cuenta en estas propiedades su valor promedio sea un próximo a una constante, como se puede apreciar en cada uno de ellos en las siguientes figuras: **Figuras 2.5 a la Figura 2.12.**



Statistics	
Nodes	189935
Elements	50939
Mesh Metric	Element Quality
Min	2.12905581450046E-03
Max	0.999998649394926
Average	0.576140635992912
Standard Deviation	0.319143841059927

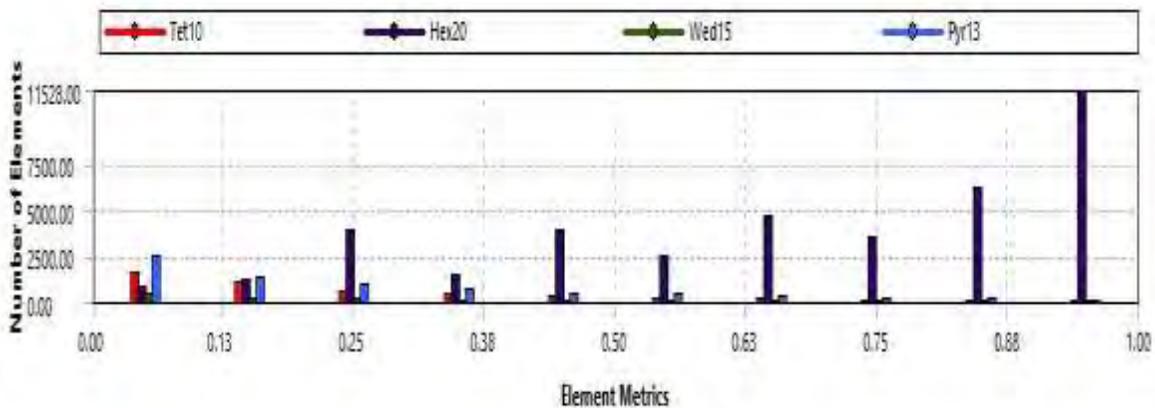


Figura 2. 5. Propiedad de malla Calidad del Elemento.

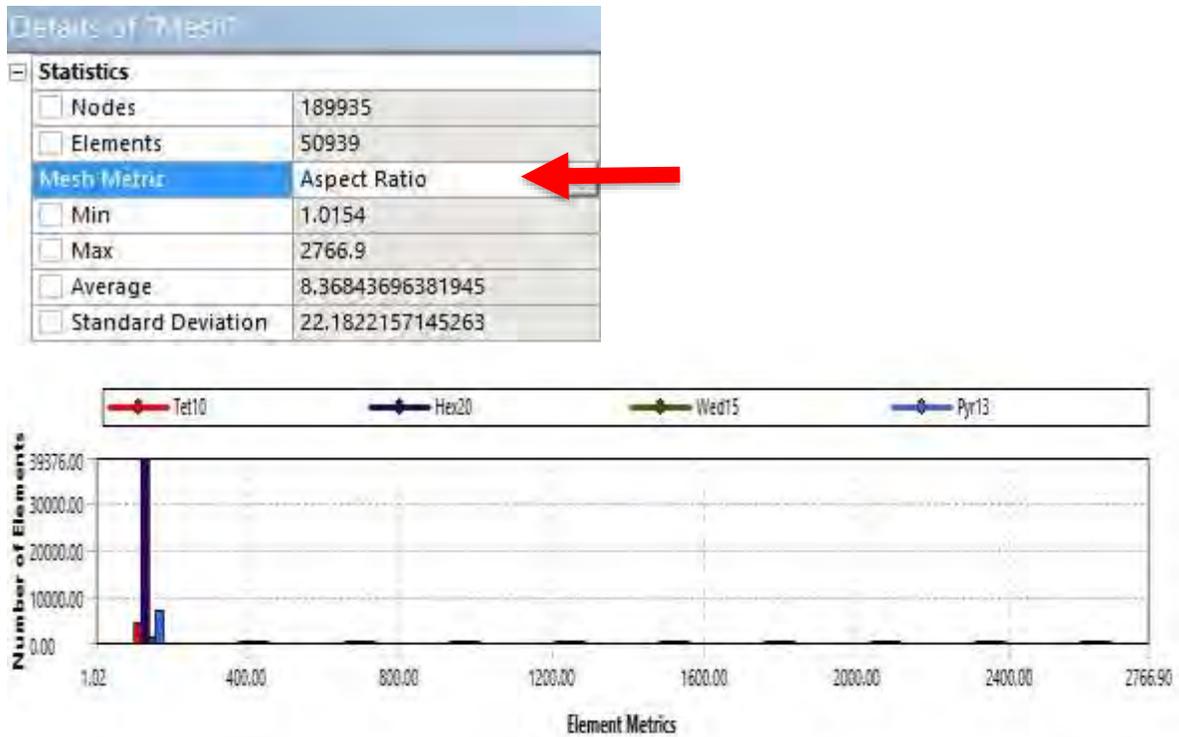


Figura 2. 6. Propiedad de malla Relación de Aspecto.

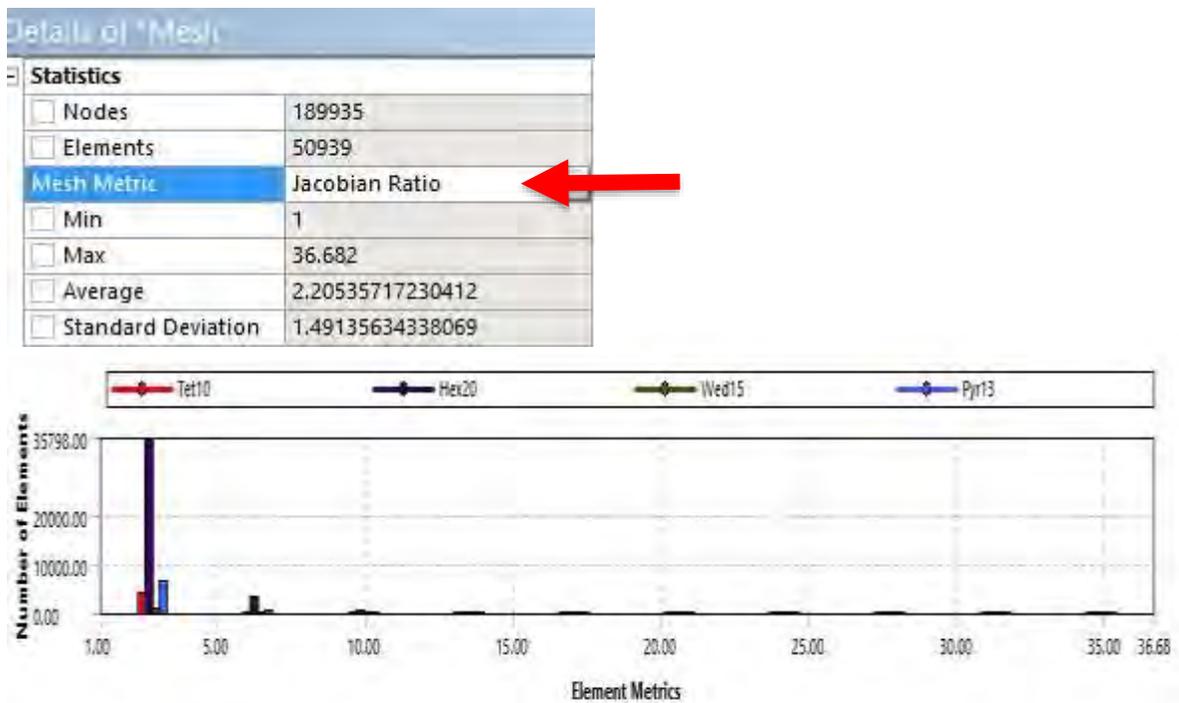


Figura 2. 7. Propiedad de malla Relación Jacobiana.

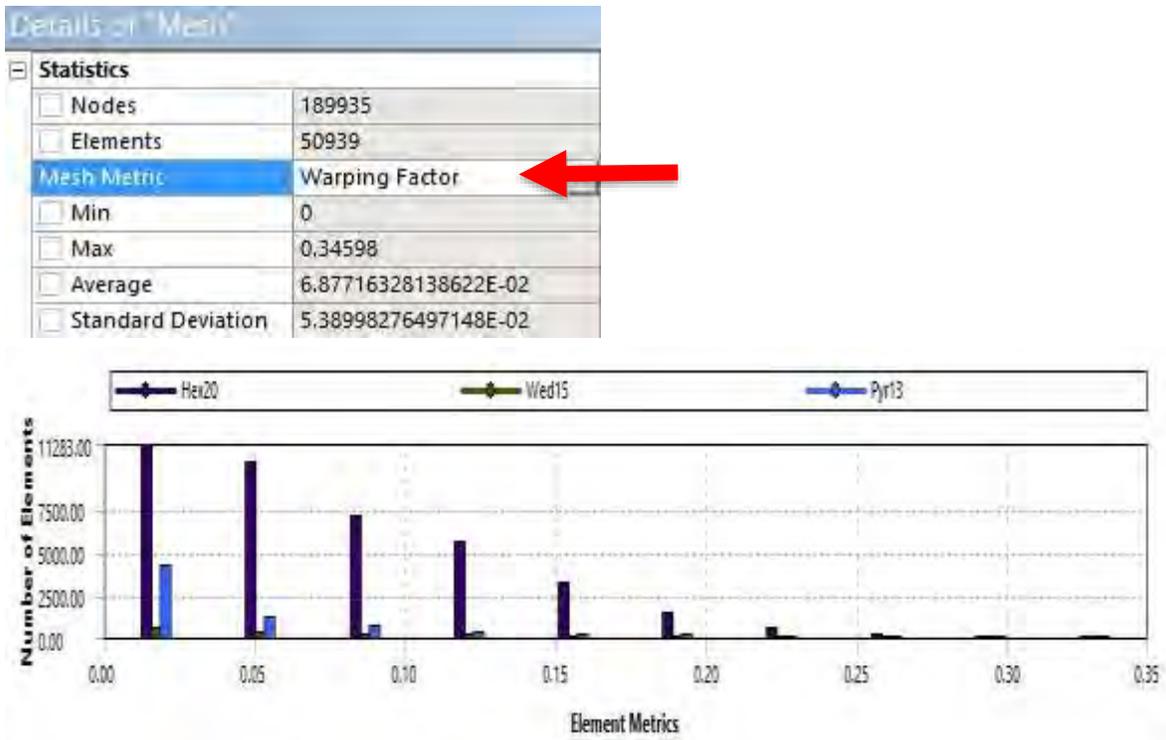


Figura 2. 8. Características de malla Factor de Deformación.

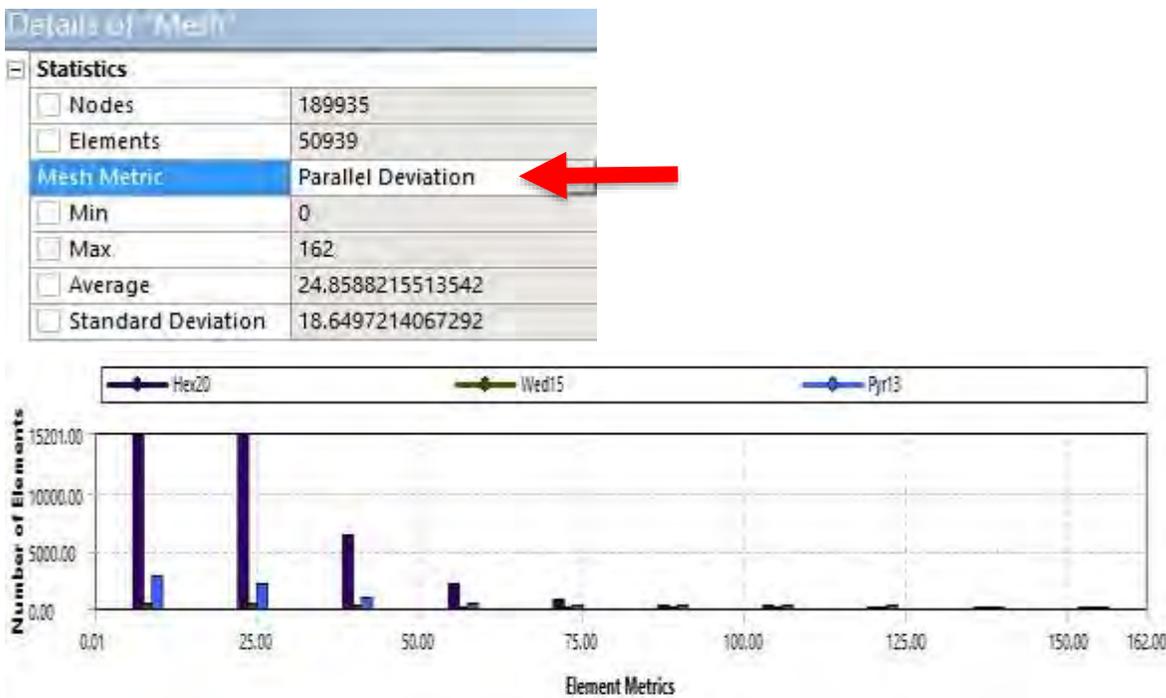


Figura 2. 9. Características de malla Desviación Paralela.



Figura 2. 10. Características de malla Ángulo de Esquina Máximo.

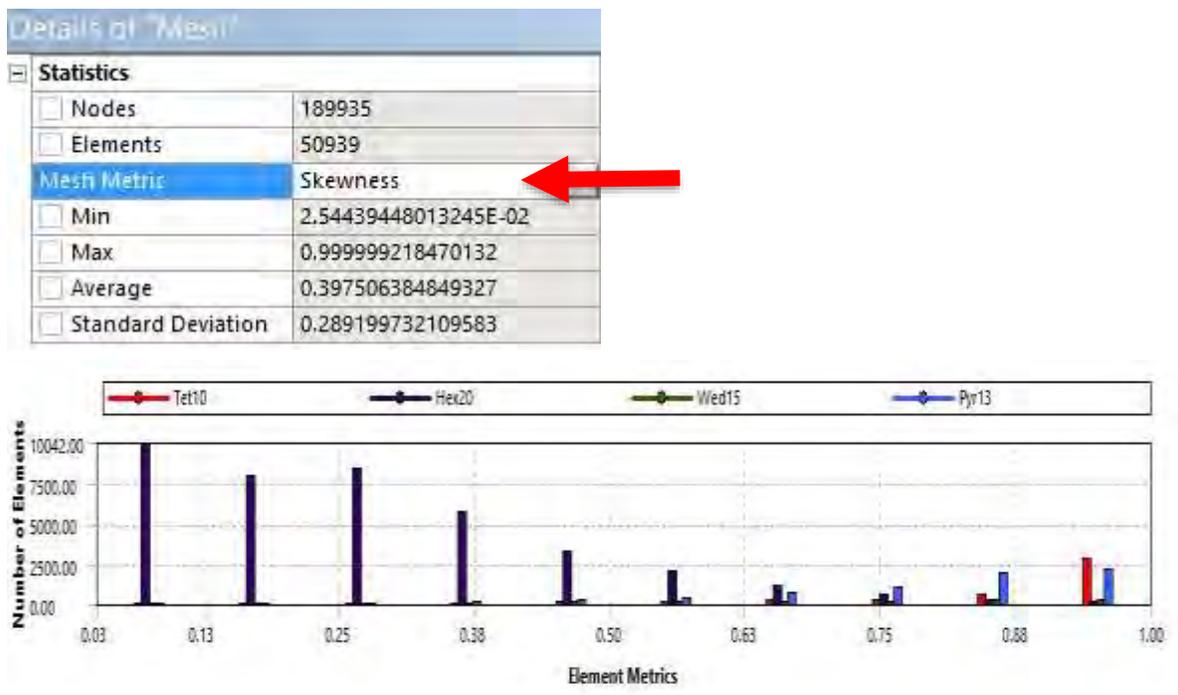


Figura 2. 11. Características de malla Oblicuidad.

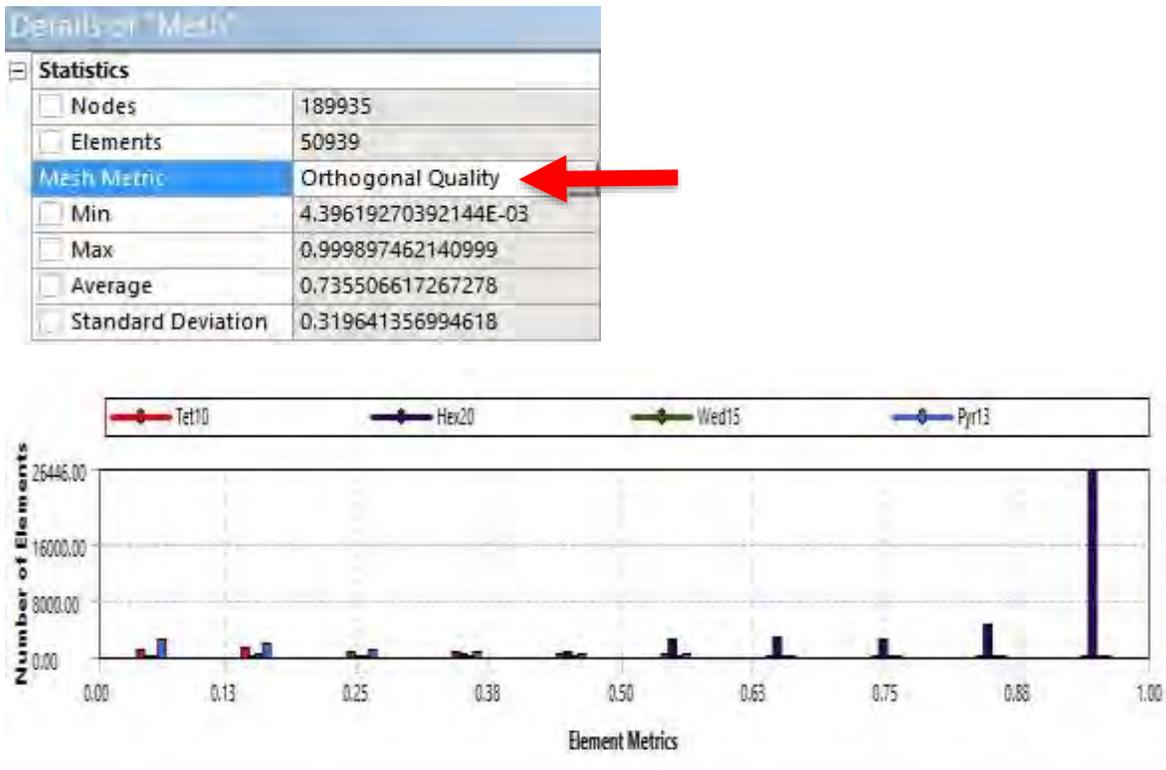


Figura 2. 12. Características de malla Calidad Ortogonal.

2.2. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA MEMBRANA NAFION 115.

Para llevar a cabo la simulación numérica en la membrana Nafion 115 y obtener parámetros iniciales de operación, se definen mediante análisis haciendo uso del módulo estático estructural en ANSYS Workbench®, y para este caso se realizan los siguientes pasos:

En primer lugar, seleccionar el módulo de trabajo, en este caso se elige el módulo estático estructural y al mismo tiempo la asignación de las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar, como se aprecia en la siguiente **Figura 2.13**.

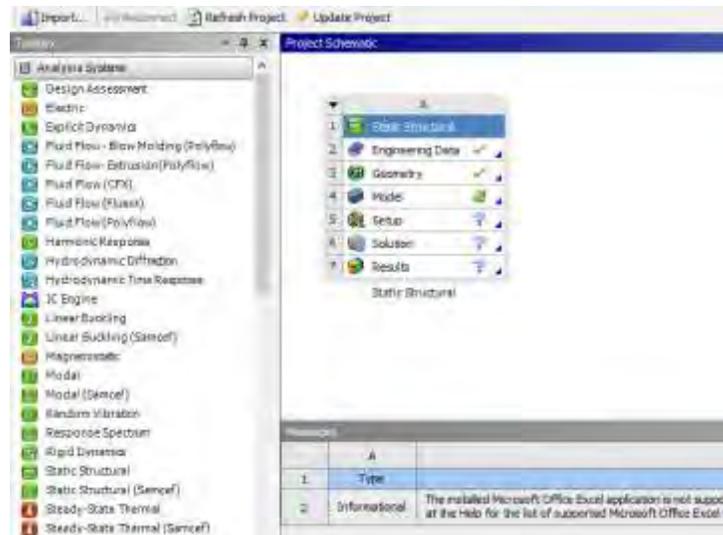


Figura 2.13. Módulo estático estructural.

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados fueron: aleación de aluminio 7075, aleación de aluminio 6061 y la membrana polimérica Nafion 115 son necesarias para llevar a cabo la simulación numérica y el cálculo de parámetros iniciales, como se aprecia en la **Tabla 2.3**, y en la **Figura 2.14**. Estas propiedades mecánicas se introducen al programa de simulación, y son necesarias para obtener resultados fieles a los materiales físicos utilizados.

Tabla 2. 3. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados.

MATERIAL	DENSIDAD (Kg/m ³)	MODULO DE YOUNG (GPa)	MÓDULO DE POISSON
NAFION 115	1980	0.249	0.4
ALUMINIO 7075	2800	72	0.33
ALUMINIO 6061	2770	69.8	0.33

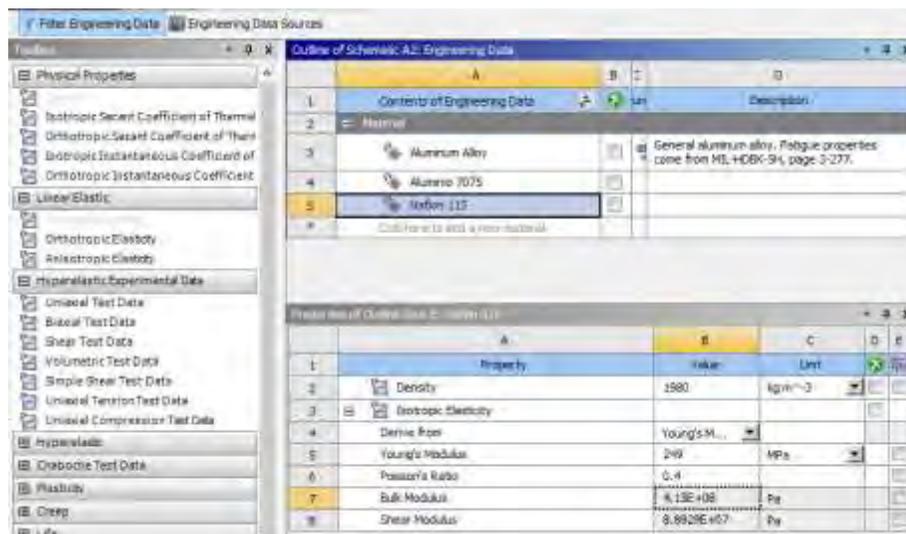


Figura 2. 14. Asignación de propiedades mecánicas de los materiales.

El siguiente paso es realizar la geometría del ensamble punzón, membrana y mordazas, las condiciones de carga a las que estará trabajando la membrana polimérica Nafion 115. Es importante que al realizar la geometría se tome en cuenta que se trabaja con tres materiales diferentes los cuales se le asignarán sus propiedades una vez llegado a la etapa de solución de modelado. En este caso la geometría está constituida de seis cuerpos sólidos; 1) la membrana Nafion 115 que se le asignó la apariencia de un extruido congelado para diferenciar de los demás cuerpos, la cual está sujeta por medio de, 2) cuatro mordazas de aluminio 6061, encargadas de aplicar la tensión inicial a esta última, y 3) el punzón fabricado de la aleación de aluminio 7075, este último encargado de aplicar la carga inicial y la carga ultrasónica vibratoria. El conjunto de estas diferentes geometrías se aprecia en la **Figura 2.15.**

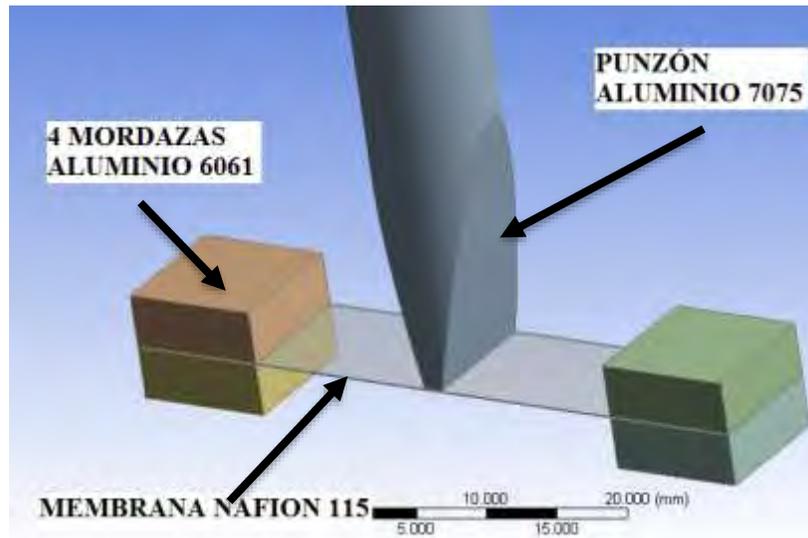


Figura 2. 15. Geometrías del ensamble punzón, membrana y mordazas, bajo condición de esfuerzo en flexión tres puntos.

Después de realizar la geometría el siguiente paso es la solución del modelado; para realizar esta solución se asigna el material y sus propiedades mecánicas previamente cargadas a cada sólido generado en la geometría. Se generó un tipo de malla aleatoria, paso indispensable para reproducir el medio ambiente o las condiciones de frontera, estas son: fijar las mordazas para aplicar una presión inicial en la superficie circular superior del punzón y obtener así la penetración inicial como se aprecia en la **Figura 2.16**. Esta presión inicial provoca un desplazamiento en el otro extremo del punzón de aproximadamente $100\ \mu\text{m}$, condicionando así uno de los parámetros iniciales a los que será sometido la membrana Nafion 115. El último paso es insertar la deformación total como opción de salida para obtener los resultados de desplazamiento y esfuerzos generados.

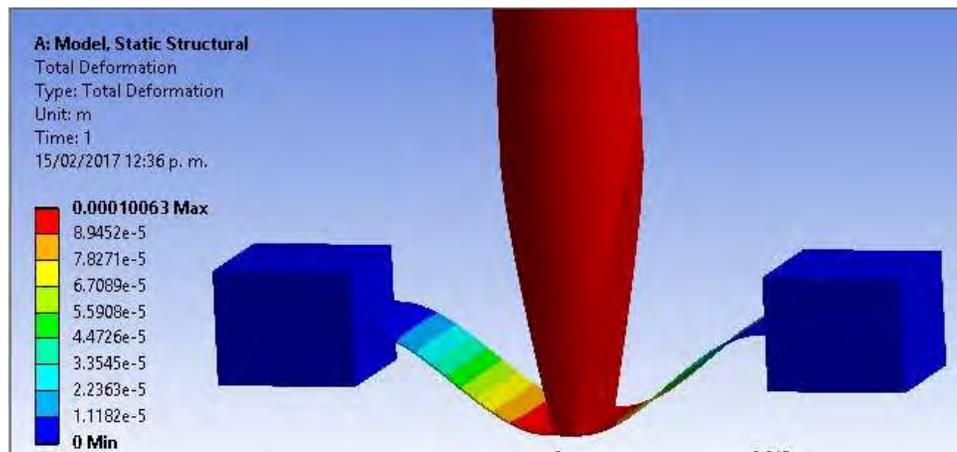


Figura 2. 16. Presión y desplazamiento inicial sobre la membrana Nafion 115.

Además de medir el desplazamiento inicial a la geometría, también se inserta para los resultados de salida el valor de esfuerzo generado por el ensamble. La distribución de esfuerzos de Von Mises se ilustra en la **Figura 2.17.**, que corresponde al desplazamiento de 100 micras de la figura anterior: el valor máximo del esfuerzo registrado es de 63.232 KPa.

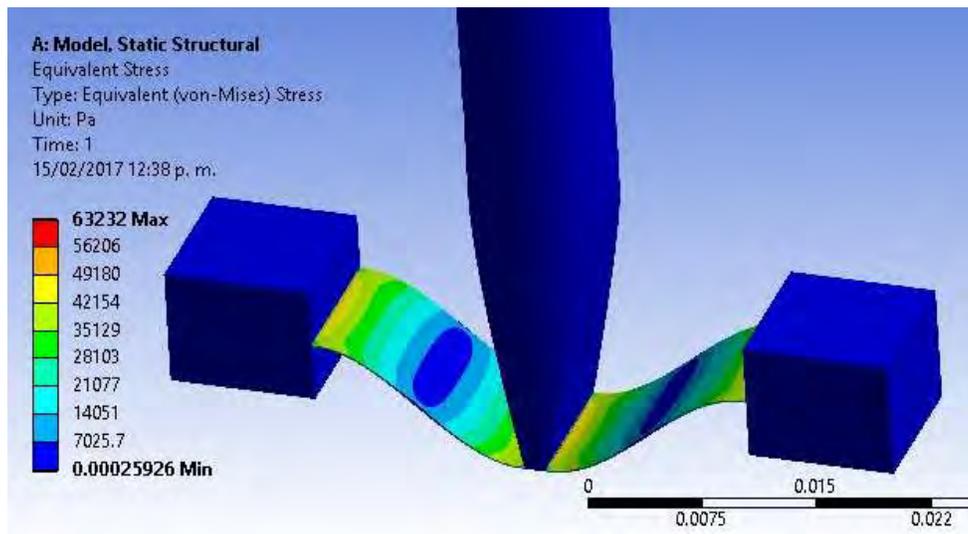


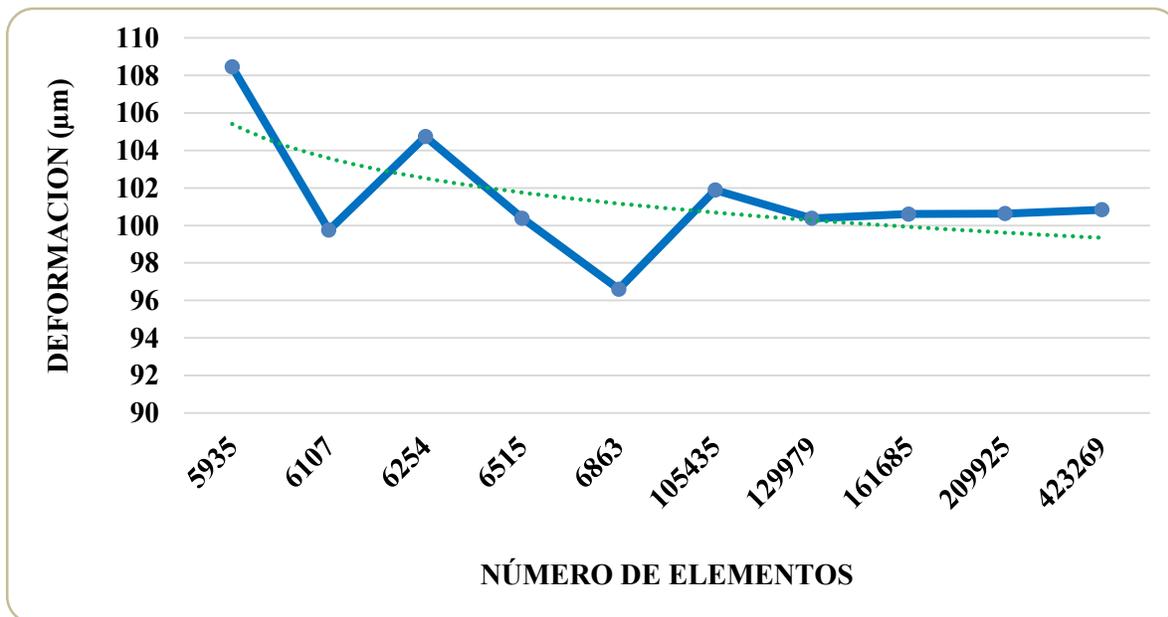
Figura 2. 17. Concentración de esfuerzos sobre la membrana Nafion 115.

2.2.1. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA MEMBRANA NAFION 115.

Para el análisis de convergencia de malla de la membrana Nafion 115, en particular para realizar la solución del modelado, se propone la discretización y se asigna un método hexaédrico de 1 mm como dimensionamiento original de la malla, lo que resulta en 5,935 elementos. Posteriormente se realiza un remallado hasta concluir cuatro iteraciones más, observando que existió una dispersión en la convergencia de la malla, posteriormente se redujo adicionalmente la malla hasta 0.1 mm, en donde se observa un inicio de convergencia, con una variación de 10 y 8% entre cada iteración en relación a la deformación. Fue hasta imponer una dimensión de malla de 90 μm cuando se observa que la variación de la deformación queda en un 5%, procediendo a realizar tres iteraciones más para que al realizar la gráfica entre la deformación respecto del número de elementos, encontrándose un comportamiento casi constante. Todos estos resultados de simulación se enlistan en la **Tabla 2.4**, así como la evolución en la gráfica deformación contra número de elementos, hasta llegar a un comportamiento casi constante, como se aprecia en la **Grafica 2.2**.

Tabla 2. 4. Análisis de convergencia de malla de la membrana Nafion 115.

ITERACIONES DE LA MEMBRANA NAFION 115		
DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA (m)	NÚMERO DE ELEMENTOS	DEFORMACIÓN (μm)
0.001	5935	108.46
0.0009	6107	99.75
0.0008	6254	104.74
0.0007	6515	100.39
0.0006	6863	96.6
0.0001	105435	101.89
0.00009	129979	100.38
0.00008	161685	100.61
0.00007	209925	100.63
0.00006	423269	100.84



Grafica 2. 2. Comparación de la deformación (ordenadas) en relación con el número de elementos de la malla (abscisas) de la membrana Nafion 115.

Para efectuar cualquier tipo de análisis de convergencia de malla es importante el hecho de considerar las características del equipo de cómputo con el cual se lleva a cabo la simulación, como se ilustra en la **Tabla 2.5**, y en la **Figura 2.18**. El dimensionamiento de malla de la membrana aislada correspondió a una talla de malla de 0.06 mm; con esta talla se obtiene una adecuada convergencia (ultimo valor de la **Tabla 2.4**)

Tabla 2. 5. Características del equipo de cómputo.

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE CÓMPUTO	
FABRICANTE:	TOSHIBA
MODELO:	SATELLITE S40 Dt-A
PROCESADOR:	AMD A8 HD GRAPHICS 1.7 GHz
MEMORIA:	6 GB
TIPO DE SISTEMA:	S.O. 64 BITS PROCESADOR X64
EDICION DE WINDOWS:	WINDOWS 8.1
DISCO DURO:	HD 1TB
SOFTWARE:	ANSYS V.15.0

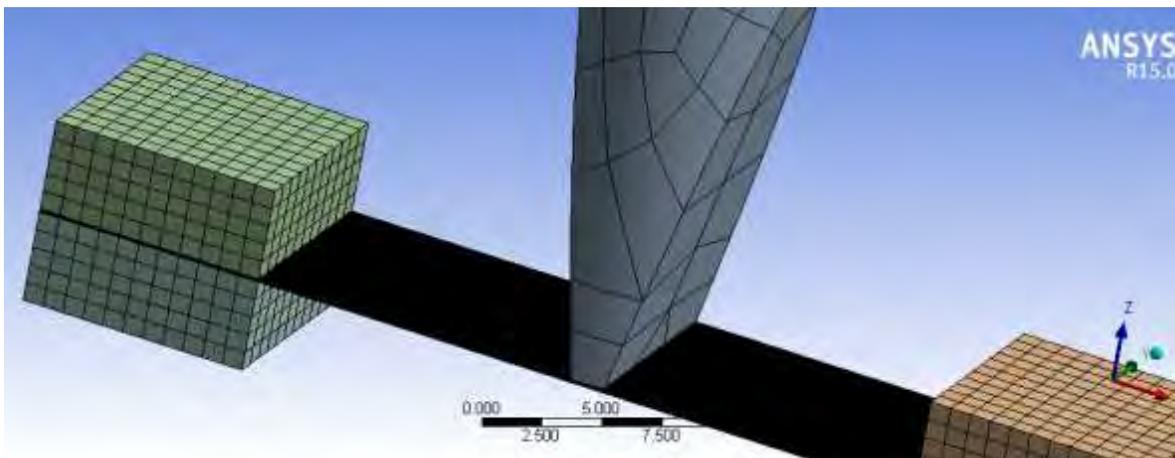


Figura 2. 18. Dimensionamiento final de la malla con valor de 60 μm .

Las propiedades de la malla como son: Calidad del Elemento, Relación de Aspecto, Relación Jacobiana, Factor de Deformación, Desviación Paralela, Ángulo de Esquina Máximo, Oblicuidad y Calidad Ortogonal, son elementos de importancia que también se llevan a cabo para el análisis de convergencia de malla, estos son calculados por el mismo programa y se toma en cuenta en ellos que el promedio sea un valor próximo a uno constante, como se puede apreciar en cada uno de ellos en las siguientes figuras de la **Figuras 2.19 a la Figura 2.26**.

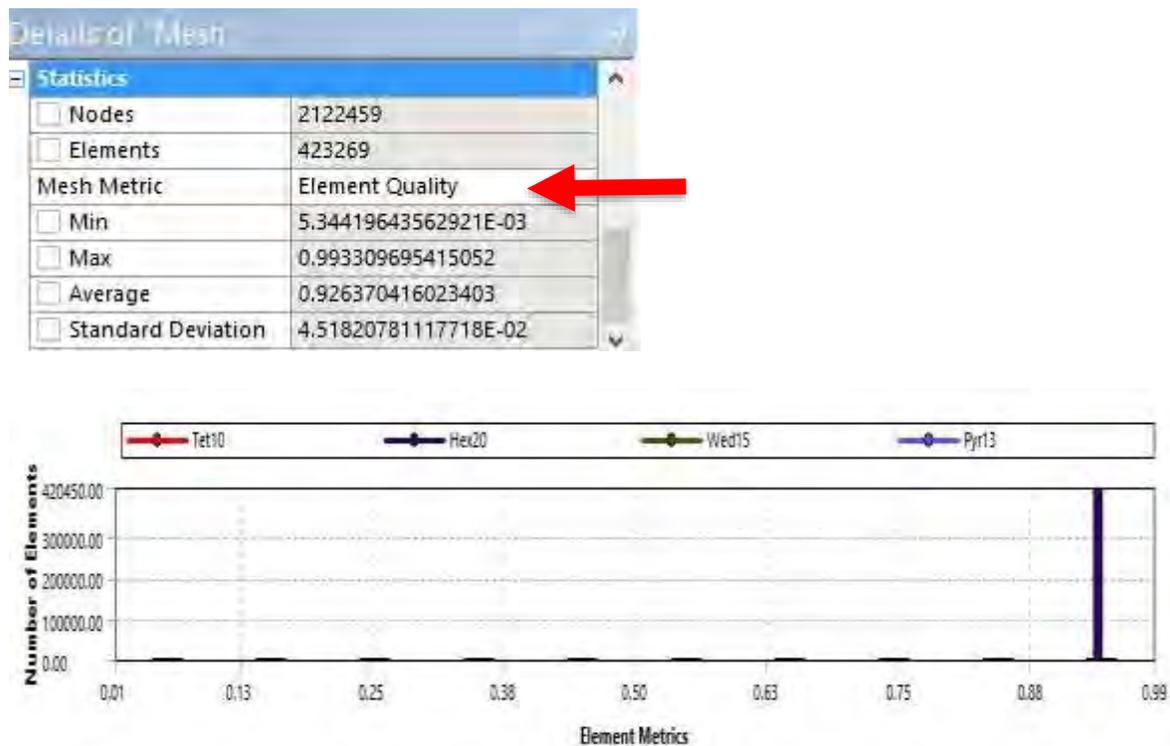


Figura 2. 19. Características de malla Calidad del Elemento.



Figura 2. 20. Características de malla Relación de Aspecto.

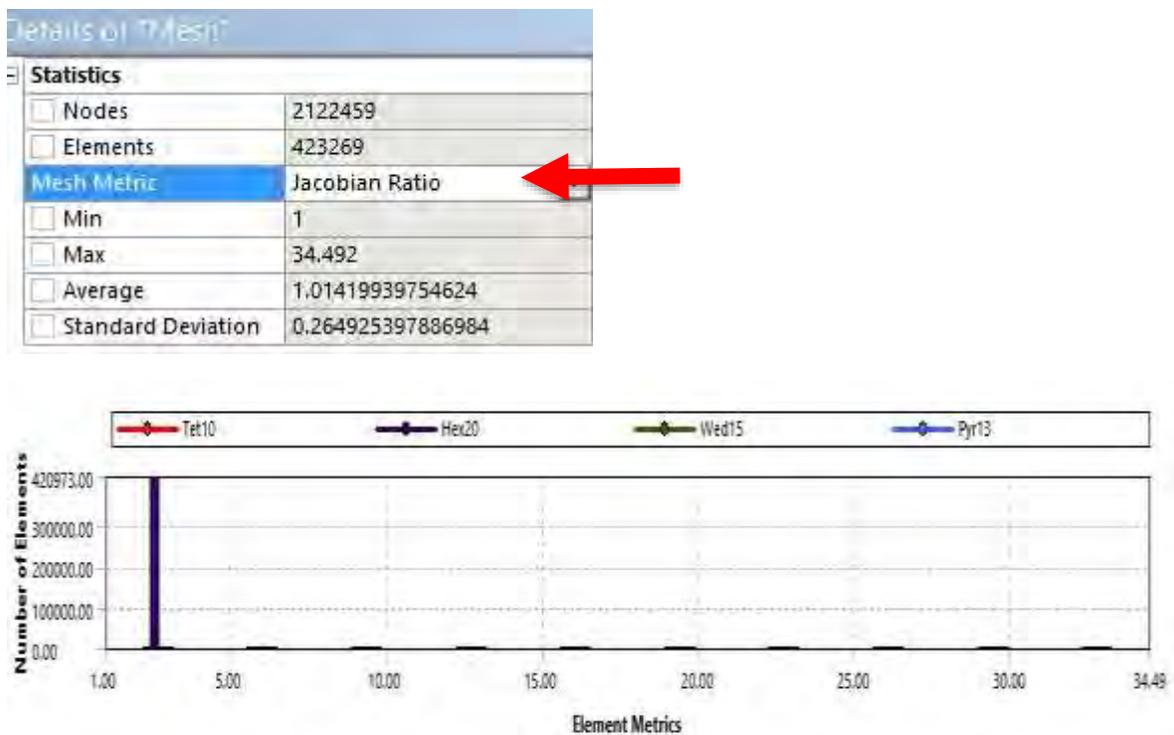


Figura 2. 21. Características de malla Relación Jacobiana.

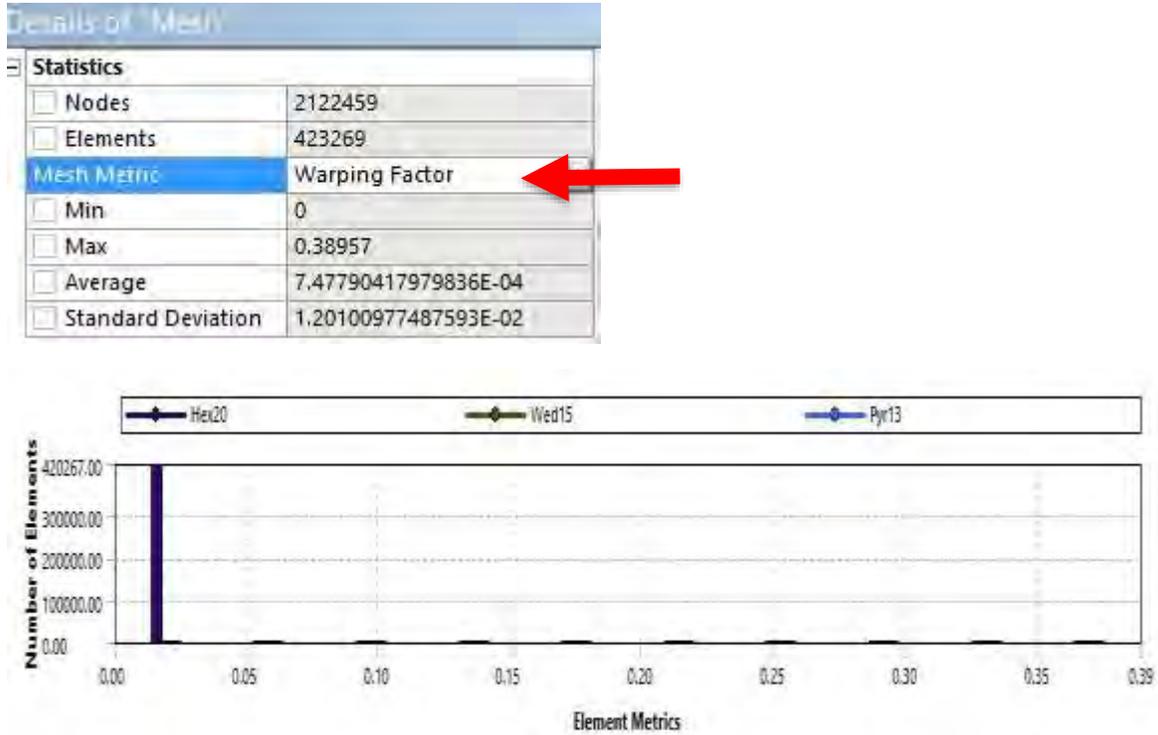


Figura 2. 22. Características de malla Factor de Deformación.

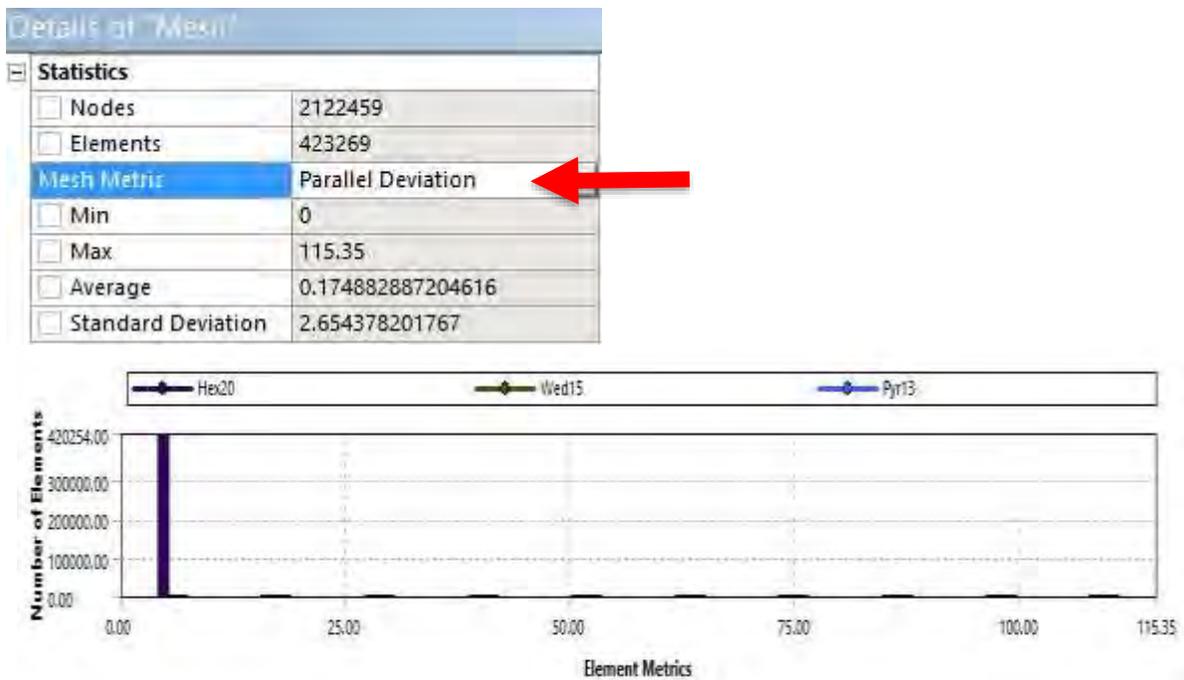


Figura 2. 23. Características de malla Desviación Paralela.

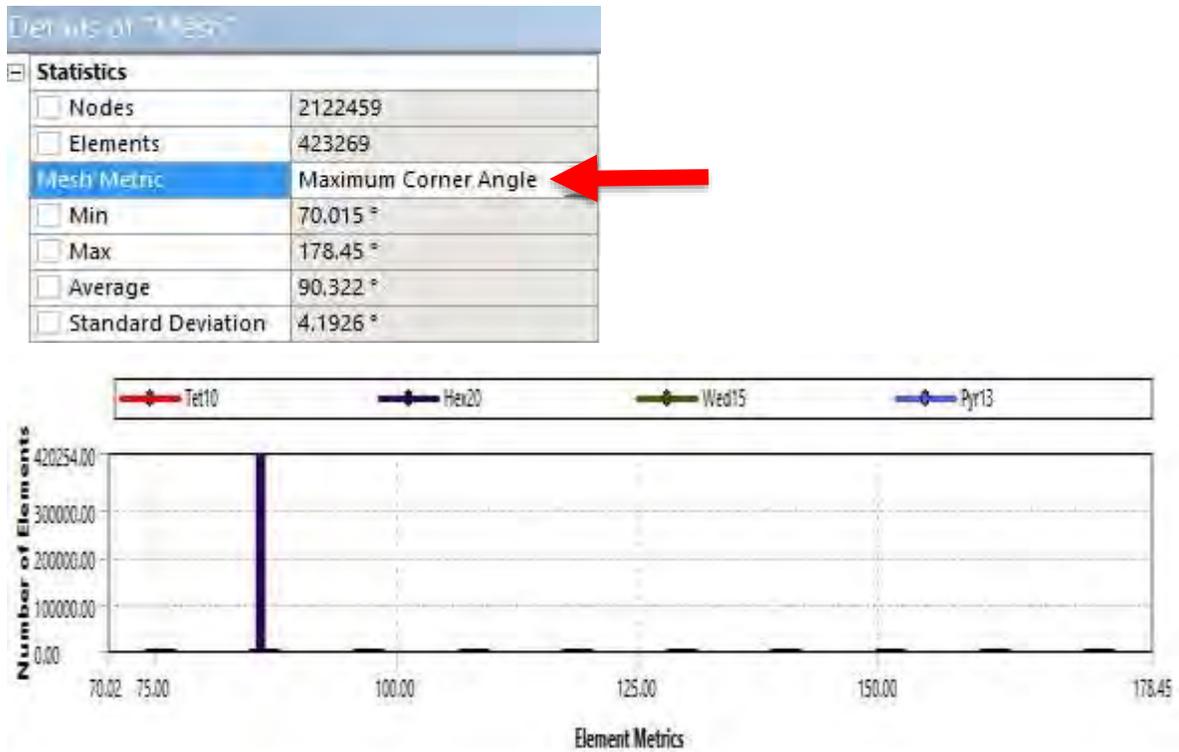


Figura 2. 24. Características de malla Ángulo de Esquina Máximo.

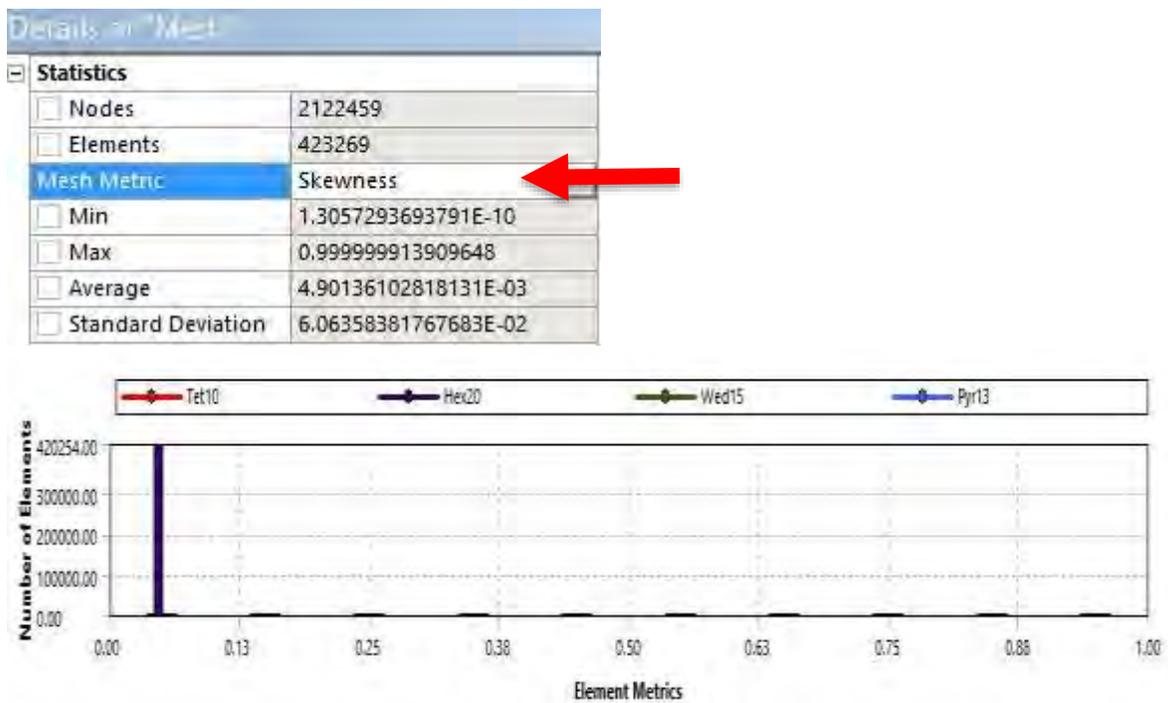


Figura 2. 25. Características de malla Oblicuidad.

Details of "Mesh"

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	2122459
<input type="checkbox"/> Elements	423269
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1.06645719285291E-02
<input type="checkbox"/> Max	1
<input type="checkbox"/> Average	0.996495924763733
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	4.91348883812819E-02

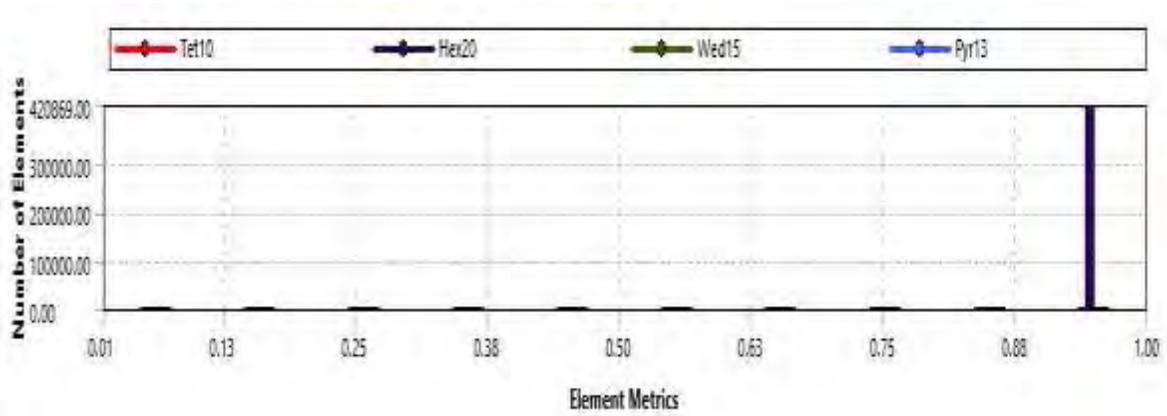


Figura 2. 26. Características de malla Calidad Ortogonal.

CAPÍTULO 3: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MECANIZADO DEL DISPOSITIVO DE SUJECIÓN Y PUNZÓN.

3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO DE SUJECIÓN

Una vez adquirida la membrana objeto de este estudio, su presentación comercial es de bandas de 300 mm x 300 mm y un espesor de 128 μm , como se muestra en la **Figura 3.1**. A partir de esta presentación comercial fue necesario recortar bandas a las dimensiones longitudinales de 50 mm x 10mm como se observa en la **Figura 3.1.**, propicias para los ensayos en fatiga ultrasónica en la modalidad de flexión tres puntos. Fue necesario diseñar y construir un mecanismo destinado a la sujeción de la tira de Nafion 115 y también para aplicar una tensión inicial sobre la misma tira, **Figura 3.2**.

Las dimensiones mostradas en la **Figura 3.1.**, fueron seleccionadas en base a las dimensiones del dispositivo de sujeción diseñado, adecuadas además con las dimensiones del punzón: el ancho de la banda es de 10 mm correspondiente al ancho en la punta del punzón.

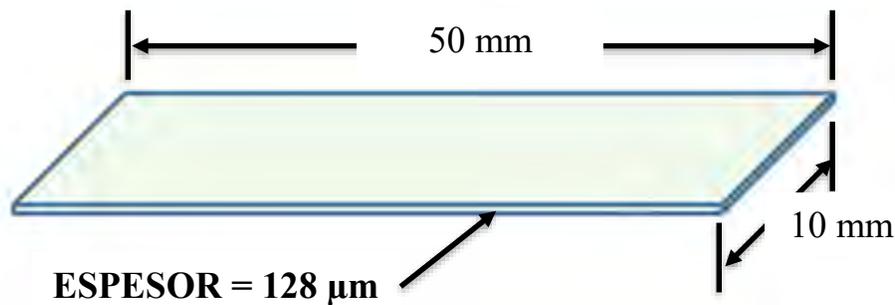


Figura 3. 1. Dimensiones de las probetas de la membrana Nafion 115.

Haciendo uso del mismo programa de diseño y utilizando el módulo de geometría, se trabajó en un diseño el cual consiste en una base de aluminio con dos mordazas, una de ellas fija en el extremo y la otra móvil a lo largo de un eje constituido por un tornillo de cuerda fina, destinado a la aplicación de la carga de tensión, como se puede apreciar en la **Figura 3.2**.

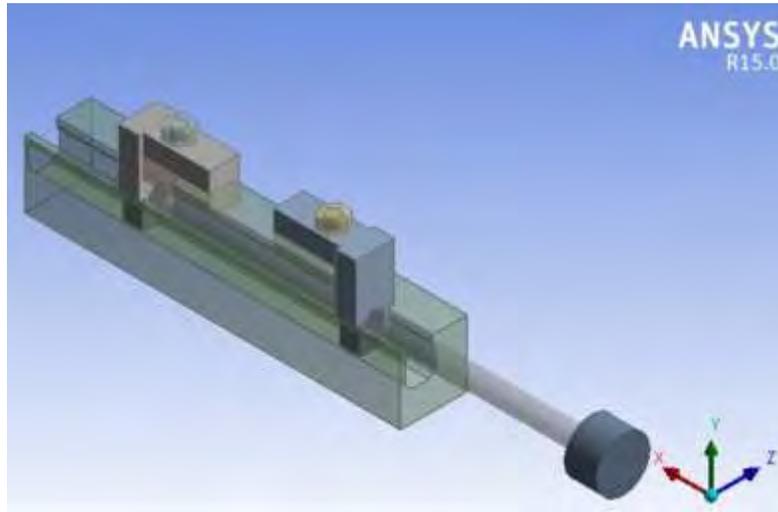


Figura 3. 2. Diseño de mecanismo de tensión.

El dispositivo de sujeción que se diseñó para aplicar la tensión inicial a la membrana, una vez que se determinó trabajar con el método de fatiga ultrasónica en la modalidad de flexión tres puntos, fue diseñado con una base cuadrada de aluminio de 31.5 mm por lado y una longitud de 175 mm, con un riel de 10 mm de abertura y 10 mm de profundidad. Las mordazas están hechas de la misma aleación de aluminio 6061: la mordaza fija consta de una placa de 40 mm de altura, 18 mm de ancho y un espesor de 9.5 mm, sujeta en el riel de la base cuadrada de la aleación de aluminio mediante un opresor de 4 mm de diámetro; esta a su vez, tiene un orificio pasado en donde se colocó un tornillo de cuerda fina de 4mm de diámetro sujetando a la mordaza fija. Una mordaza superior que se presiona a la fija por medio de un tornillo cuerda estándar de 6.4 mm de diámetro el cual es el encargado de aplicar la presión suficiente para evita que la membrana Nafion 115 pueda deslizarse.

Posteriormente se realiza la misma dimensión de la mordaza móvil la cual a diferencia del opresor que fija a la primera mordaza, esta presenta un orificio de 8 mm con una cuerda fina de diámetro 9.5 mm por donde pasará un tornillo con la misma cuerda, a través del cual se aplica la tensión a la membrana una vez sujeta entre las dos mordazas, como se aprecia en la

Figura 3.3. el mecanismo funciona como sigue: al girar el tornillo en el sentido horario, la mordaza móvil se alejará de la fija ocasionando con esta acción que la membrana se tense: la operación contraria implica un relajamiento de la tensión sobre la membrana.

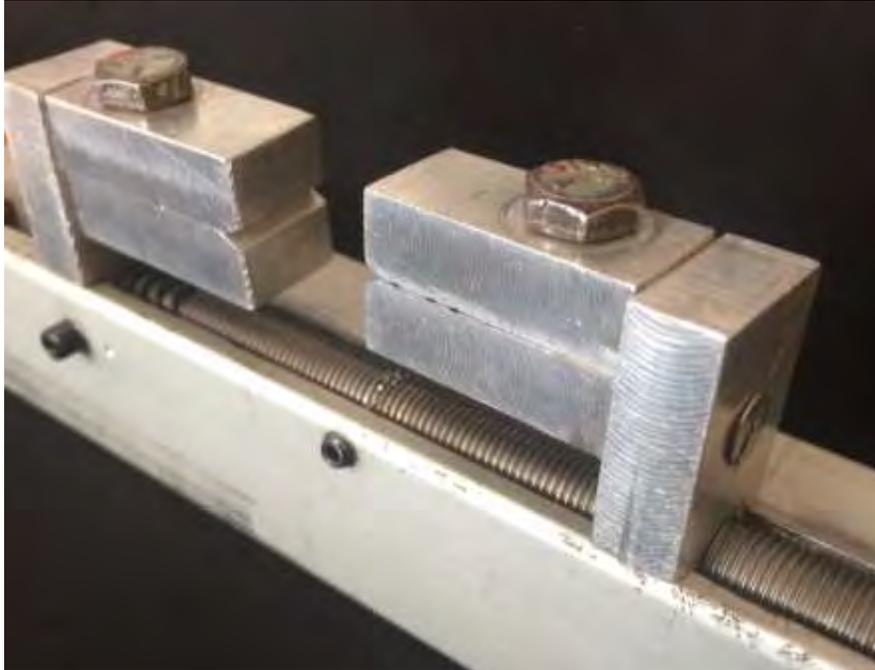


Figura 3. 3. Mordazas para la membrana Nafion 115.

Con el propósito de medir la tensión inicial de la membrana, se le ha colocado al final del mecanismo una celda de carga digital como se aprecia en la **Figura 3.4**, que tiene un rango de medición desde un gramo hasta 50 kilogramos. Esto con la finalidad de medir la tensión inicial a la que será sometida la membrana reproduciendo las condiciones reales a las que es sometida en el interior de la celda de combustible. Esta celda de carga es accionada por la mordaza móvil del mecanismo y se acopla mediante un resorte que se calibra a cero según la dimensión original. Inicialmente la longitud de la membrana fue de 50 mm; puesto que las mordazas abarcan 10 mm de cada lado la parte libre de la membrana resulta entonces de una longitud de 30 mm, adecuados para el estudio del comportamiento de la resistencia en fatiga ultrasónica bajo esta modalidad de carga.



Figura 3. 4. Mecanismo de tensión con celda de carga digital.

Cabe mencionar que el proceso de fabricación de los componentes que constituyen el mecanismo de tensión fueron fabricados en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, haciendo uso de las diferentes herramientas como fueron: torno, fresa, machuelos tarrajas y demás herramental con lo cual se hizo posible la fabricación del mecanismo de tensión como se aprecia en la **Figura 3.5 (a), (b) y (c)**.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. 5. Uso de taller máquina y herramientas de la facultad de mecánica, (a) torno de eje paralelo convencional, (b)rectificación de componentes, (c) uso de maquina fresadora.

3.2. MAQUINADO DEL PUNZÓN.

Para realizar el maquinado del punzón el primer paso fue obtener el material, se eligió inicialmente la aleación de aluminio 6061, la que se encuentra disponible comercialmente en barras con un diámetro de 12.7 mm, y longitud de tres metros en forma hexagonal como se aprecia en la **Figura 3.6. (a)**. El resultado de la simulación proporciona las dimensiones requeridas para cumplir con la condición de resonancia con la máquina de fatiga ultrasónica: 10 mm de diámetro y 133 mm de longitud, cuya frecuencia natural de oscilación fue cercana a la frecuencia de excitación 20 KHz. Estos resultados de simulación numérica fueron suficientes para fabricar el punzón en un torno paralelo convencional, de acuerdo a la geometría de la simulación como se aprecia en la **Figura 3.6. (b) y (c)**.



(a)



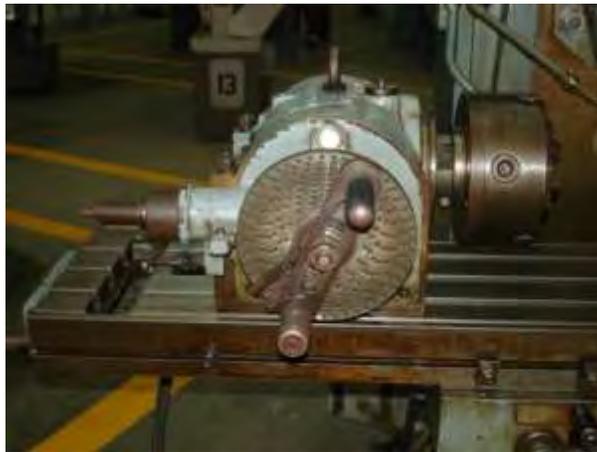
(b)



(c)

Figura 3. 6. (a) Aluminio comercial hexagonal, (b) Proceso de Maquinado del punzón, (c) geometría terminada del punzón sin chaflán.

El maquinado para la obtención de las dimensiones geométricas resultado de la simulación del punzón, específicamente el chaflán de la punta con un ángulo de 12.68° y una longitud de 20 mm, se realizaron en una fresadora con el accesorio cabezal divisor el cual se puede apreciar en la **Figura 3.7 (a)**; con objeto de lograr el maquinado en ambos lados en la punta del punzón y lograr el alineamiento adecuado. El resultado del maquinado del punzón se aprecia en la **Figura 3.7. (b)**.



(a)



(b)

Figura 3. 7. (a) Cabezal divisor de fresadora (b) Punzón con chaflán terminado material aleación de aluminio 6061

Cuando el punzón es obtenido después del maquinado, se le realiza una perforación en la parte superior a la punta chaflán, para colocarle un opresor. Esta perforación tiene un diámetro de 2.5 mm y una longitud de 9 mm. Esta perforación se utiliza para fijar el punzón con el sonotrodo de la máquina de fatiga ultrasónica, permitiendo transmitir la alta vibración desde la maquina ultrasónica al punzón, y de este último a la membrana, como se muestra en la **Figura 3.8**. Con el fin de verificar la condición de resonancia, el punzón de conecta a la maquina ultrasónica y se aplican diferentes voltajes para verificar físicamente que el punzón está en resonancia con la máquina.



Figura 3. 8. Punzón en pruebas de resonancia.

Al finalizar las diferentes pruebas de resonancia en el punzón en las que se pueden incluir rangos de tiempos y voltajes diferentes, así como diferentes pares de apriete, se pudo observar que este material resulta frágil para la operación que realiza. En la **Figura 3.9**, se observa como en un primer fracaso se produce una fractura en el opresor que conecta al sonotrodo y al punzón para la transmisión de la frecuencia. Posteriormente como se aprecia en la **Figura 3.10 (a) y (b)**, se presenta la fractura del punzón que ocasionó en varias ocasiones la pérdida de la condición de resonancia al arranque de la máquina ultrasónica. En efecto, la condición de resonancia implica la continuidad del material, al presentarse la fractura se pierde esta continuidad y se pierde la condición de resonancia.



Figura 3. 9. Opresor de conexión entre el punzón y el sonotrodo fracturado.

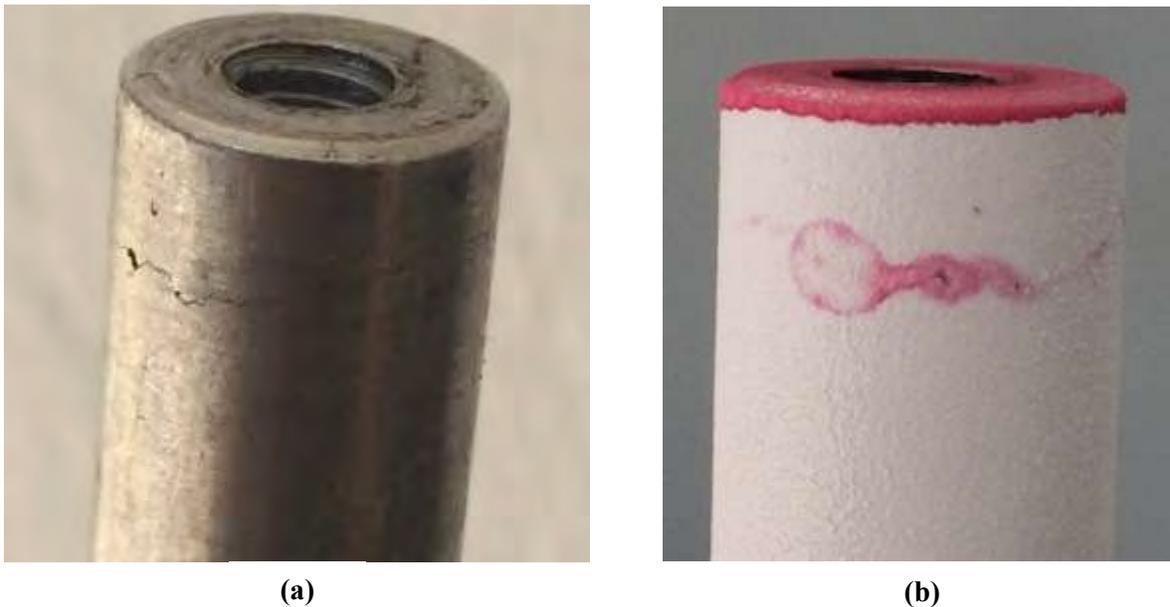


Figura 3. 10. Fractura del punzón con material aluminio en aleación 6061, (a) imagen del punzón fracturado, (b) visualización de la grita con el método de líquidos penetrantes.

Por el motivo de fractura del punzón hecho con el material de aluminio aleación 6061, se toma la decisión de cambiar a fabricar un nuevo punzón con material de aluminio 7075 esto con la finalidad de dar un mayor rango de dureza por su composición química de esta aleación, cabe hacer mención que para la obtención de este material solo es comercial en longitud de 3 metros con un diámetro de 25.4 mm. Como se aprecia en la **Figura 3.11 (a) y (b)**, se obtienen excelentes resultados en el comportamiento de resonancia con este nuevo

material, y se realizan pruebas preliminares con un material de apoyo (acetato comercial), con características similares al de la membrana Nafion 115, por motivo de la dificultad en la obtención de la membrana.

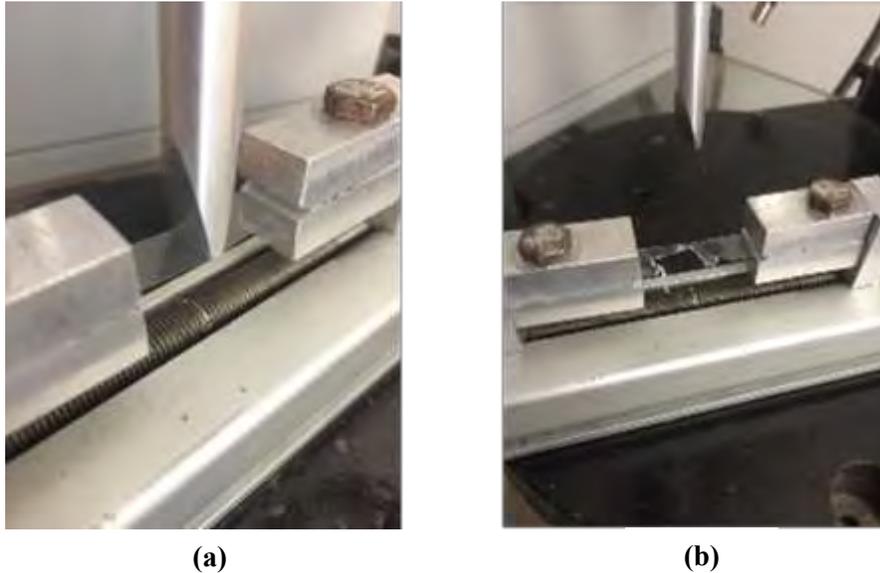


Figura 3. 11. Punzón en pruebas de resonancia material Aluminio aleación 7075, (a) antes de la prueba (b) después de la prueba.

3.3. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS INICIALES.

Con el punzón en operación bajo condiciones de resonancia requeridas, se procede a la etapa siguiente, la cual consiste en la calibración de desplazamiento contra el esfuerzo. Una tarea adicional importante fue la fabricación de un mecanismo para medir con precisión la penetración inicial, ya que solo fue posible mantener controlada la tensión inicial. Como se aprecia en la **Figura 3.12**, haciendo uso una vez más de las máquinas y herramientas del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, se diseñó y se construyó una barra roscada en cuerda estándar de una longitud aproximada de 500 mm, y un diámetro de 9.5 mm, a la cual se le añaden placas de aluminio, un punzón provisional, tuercas y roldanas.



Figura 3. 12. Mecanismo para calibración de parámetros iniciales.

Una vez que se construyó el mecanismo para la calibración del desplazamiento contra los esfuerzos, se instaló un sensor inductivo de proximidad con el objetivo de medir el desplazamiento en micras del punzón y la tensión inducida en la membrana mediante el

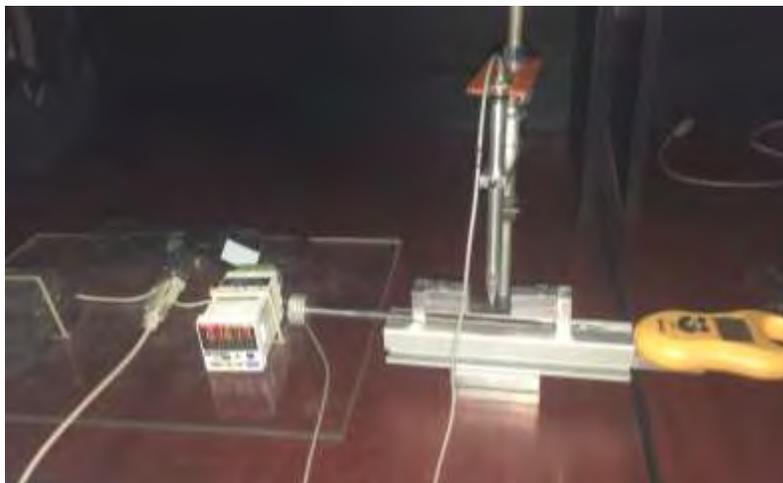
mecanismo de tensión diseñado. Las primeras mediciones fueron de baja precisión y se optó por agregar una placa de acero y un resorte. Para mejorar la precisión de las mediciones, se rectificaron las caras de la placa de aluminio que sirve de sujeción al punzón provisional; así mismo se rectifican las caras del punzón que le sirve de referencia al sensor. Esto último con el objeto de corregir los errores en la medición, como se aprecia en la **Figura 3.13 (a), (b) y (c)**, el mecanismo terminado para la instalación del sensor inductivo para la calibración de desplazamientos contra esfuerzos.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. 13. Modificaciones del mecanismo para calibración de parámetros iniciales, (a) placa guía y resorte, (b) rectificación de la placa soporte de punzón provisional, (c) mecanismo de calibración listo para usarse.

Se realizó la calibración de desplazamientos contra esfuerzos con material de apoyo con muestras de acetato, con muestras de acuerdo a las dimensiones con las cuales se realizaron las pruebas de membrana Nafion 115. Como se aprecia en las **Tablas 3.1., 3.2. y 3.3.**, se hicieron cuatro mediciones en tres niveles de tensión inicial, se sistematizó el desplazamiento inicial contra el esfuerzo en la membrana.

Tabla 3. 1. Mediciones con tensión inicial de 30 gramos.

MICRAS DE DESPLAZAMIENTO	TENSIÓN INICIAL			
	30 gr	30 gr	30 gr	30 gr
200 a 600	22	28	26	28
600 a 1000	17	20	18	18
1000 a 1400	8	10	5	7
1400 a 1800	0	0	0	0

Tabla 3. 2. Mediciones con tensión inicial de 60 gramos.

MICRAS DE DESPLAZAMIENTO	TENSION INICIAL			
	60 gr	60 gr	60 gr	60 gr
200 a 600	45	55	55	55
600 a 1000	35	40	30	45
1000 a 1400	15	20	25	30
1400 a 1800	0	1	0	2

Tabla 3. 3. Mediciones con tensión inicial de 90 gramos.

MICRAS DE DESPLAZAMIENTO	TENSION INICIAL			
	90 gr	90 gr	90 gr	90 gr
200 a 600	85	80	85	85
600 a 1000	70	70	75	80
1000 a 1400	50	50	65	55
1400 a 1800	30	20	40	35

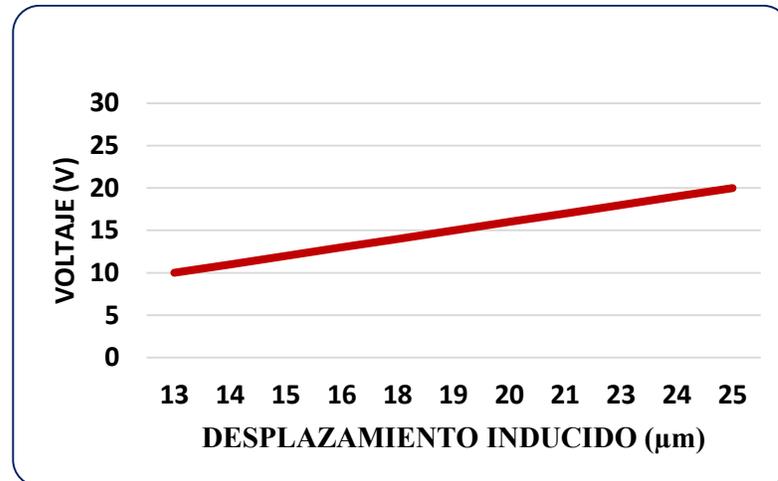
CAPÍTULO 4: ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A partir de los resultados obtenidos de las mediciones de los desplazamientos contra esfuerzos enlistados en las **Tablas 3.1 a la 3.3**, se realizaron calibraciones de tensión en la máquina de fatiga ultrasónica, aplicando inicialmente 60 gr de carga que indujeron $100\ \mu\text{m}$ de desplazamiento sobre la superficie central de la membrana. Debido a la disposición de la columna de transmisión de alta frecuencia, el punzón se aproxima en la sección media de la tira de Nafion 115 y se ejerce presión en esta zona hasta que la tensión aplicada por el mecanismo diseñado indique cero en la pantalla (la tensión original por el mecanismo de tensión se relaja al mismo tiempo que el punzón induce un esfuerzo concentrado en la tira de Nafion), **Figura 4.1**. Se ajustó el rango de voltaje al que se realizaron los ensayos en fatiga ultrasónica con el método de fatiga en flexión tres puntos. Los ensayos experimentales fueron realizados en la máquina de fatiga ultrasónica que tiene un desplazamiento inducido de $1.25\ \mu\text{m}$ por unidad de voltaje aplicado al generador comportándose de manera proporcional, la cual podemos observar en la siguiente **Grafica 4.1**.



Figura 4. 1. Calibraciones de tensión inicial en la máquina de fatiga ultrasónica.



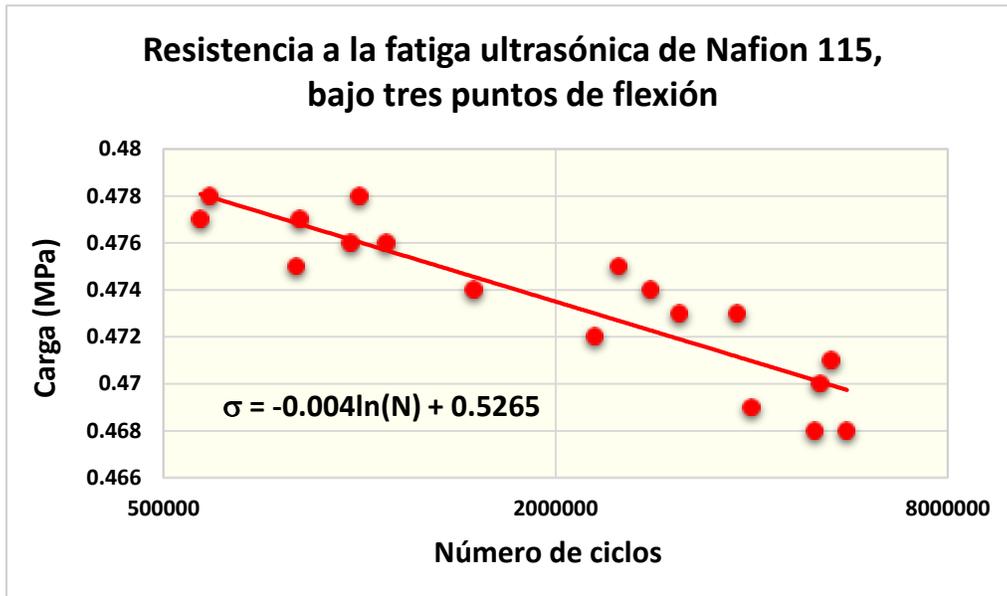
Grafica 4. 1. Grafica lineal del comportamiento del voltaje de la fuente en relación al desplazamiento inducido.

4.2. RESULTADOS DE FATIGA ULTRASONICA EN MODALIDAD FLEXIÓN TRES PUNTOS

Los ensayos experimentales se realizaron al medio ambiente en una temperatura promedio de entre 20 y 23 ° C, con humedad ambiental comprendida entre 40-45%, con tensión inicial de 60 gr. (Tensión equivalente en la tira Nafion 115 cerca de 0,46 MPa). La secuencia para el inicio del ensayo fue la siguiente: aplicación de una tensión de 60 gr en la tira de la membrana Nafion 115 por el mecanismo de tensión; el punzón se aproxima en la sección media de la tira y se ejerce presión en esta zona hasta que la tensión aplicada por el mecanismo de tensión indique cero en la pantalla (la tensión original inducida por dicho mecanismo se relaja al mismo tiempo que el punzón induce un esfuerzo concentrado en la tira de Nafion). Todas las pruebas de fatiga ultrasónica en Nafion 115 han seguido la secuencia descrita; después de la última etapa, la vibración ultrasónica de diferente amplitud se comunica a la tira por el punzón, que está en resonancia con la máquina de fatiga ultrasónica. En la **Tabla 4.1** se muestran los valores en fatiga de los ensayos realizados. En la **Gráfica 4.2.**, observamos el comportamiento de vida en fatiga de la membrana Nafion 115, para los ensayos de las probetas 1, 2, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 18, 19, 20, 24, 28, 29, 33 y 34 de la **Tabla 4.1**.

Tabla 4. 1. Valor de los ensayos en modalidad de fatiga en flexión tres puntos.

PROBETA	TIEMPO DE LA PRUEBA (Hr)	VOLTAJE (V)	DESPLAZAMIENTO POR VIBRACIÓN ULTRASÓNICA (μm)	NÚMERO DE CICLOS	CARGA INICIAL (MPa)
1	0.078	10	13	5.60E+06	4.68E+05
2	0.055	11	14	3.98E+06	4.69E+05
3	0.07	12	15	5.07E+06	4.69E+05
4	0.074	13	16	5.30E+06	4.70E+05
5	0.031	14	18	2.30E+06	4.71E+05
6	0.043	15	19	3.10E+06	4.72E+05
7	0.069	15	19	4.96E+06	4.72E+05
8	0.068	15	19	4.90E+06	4.72E+05
9	0.023	15	19	1.70E+06	4.72E+05
10	0.053	15	19	3.85E+06	4.72E+05
11	0.043	16	20	3.10E+06	4.73E+05
12	0.015	16	20	1.08E+06	4.73E+05
13	0.066	16	20	4.80E+06	4.73E+05
14	0.021	16	20	1.48E+06	4.73E+05
15	0.039	16	20	2.83E+06	4.74E+05
16	0.011	17	21	8.21E+05	4.73E+05
17	0.013	17	21	9.69E+05	4.73E+05
18	0.035	17	21	2.51E+06	4.75E+05
19	0.011	17	21	8.05E+05	4.75E+05
20	0.045	18	23	3.20E+06	4.76E+05
21	0.016	18	23	1.12E+06	4.74E+05
22	0.015	18	23	1.11E+06	4.74E+05
23	0.0069	18	23	4.96E+05	4.74E+05
24	0.014	18	23	9.74E+05	4.76E+05
25	0.027	19	24	1.99E+06	4.75E+05
26	0.02	19	24	1.40E+06	4.75E+05
27	0.043	19	24	3.12E+06	4.75E+05
28	0.008	19	24	5.70E+05	4.77E+05
29	0.011	19	24	8.15E+05	4.77E+05
30	0.015	20	25	1.05E+06	4.76E+05
31	0.018	20	25	1.28E+06	4.76E+05
32	0.014	20	25	1.02E+06	4.76E+05
33	0.015	20	25	1.06E+06	4.78E+05
34	0.0083	20	25	5.95E+05	4.78E+05



Grafica 4. 2. Comportamiento de vida en fatiga de la membrana Nafion 115.

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS POR ANÁLISIS TERMOGRÁFICOS.

Desde la posición de 0 gr del mecanismo de tensión (equivalente a 0,46 MPa, aproximadamente), se aplica una vibración ultrasónica induciendo desplazamientos en diferentes voltajes al final del punzón aplicados a la superficie de la membrana Nafion 115. En la **Tabla 4.2**, se enumeran los ensayos de fatiga ultrasónica en comportamientos termográficos, llevados a cabo bajo la modalidad de tres puntos de flexión: todas las temperaturas de ensayo oscilan entre 30 y 60 ° C, siendo el último valor el 55% de la temperatura de transformación vítrea para este polímero [23]. Con el fin de mantener la temperatura de ensayo a lo largo de la tira Nafion por debajo de la temperatura de transición vítrea de este polímero, se inyectó aire de enfriamiento seco; entonces, se supone que el efecto térmico-mecánico durante la prueba de fatiga ultrasónica en esta condición [24] [25]. Se deduce de los resultados experimentales en la **Tabla 4.2.**, que la resistencia a la fatiga ultrasónica de Nafion 115 bajo la modalidad descrita oscila entre los medio millones de ciclos para la menor vida de fatiga, hasta 5,5 millones de ciclos para la vida de fatiga más larga. Además, la temperatura de ensayo se mantenía baja con respecto a la temperatura de transición vítrea de este polímero: el valor alto alcanza solo 60 ° C. Los resultados experimentales están algo dispersos; Sin embargo, se observan algunas tendencias generales: 1) la resistencia a la fatiga por ultrasonidos disminuye a medida que los desplazamientos al final del punzón aumentan, 2) la temperatura media de ensayo aumenta con los desplazamientos del punzón, 3) la temperatura máxima y la tensión máxima se localizan en la zona de contacto Entre el punzón y la tira de Nafion 115, y cerca de los extremos sujetados de la tira. En la **Figura 4.2.**, se muestra la temperatura media obtenida por una cámara termográfica para las pruebas: 1, 8, 12, 18, 22, 25 y 30, que se enumeran en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4. 2. Mediciones de comportamientos termográficos.

PROBETA	VOLTAJE (V)	PROMEDIO DE TEMPERATURA DE LA PRUEBA (°C)	DESPLAZAMIENTO INICIAL DEFORMACIÓN (µm)
1	10	30	500
2	11	38	200
3	12	40	200
4	13	40	300
5	14	38	100
6	15	31	300
7	15	45	100
8	15	45	100
9	15	50	100
10	15	50	100
11	16	42	100
12	16	40	100
13	16	45	100
14	16	50	100
15	16	50	100
16	17	40	100
17	17	60	100
18	17	47	100
19	17	60	100
20	18	40	100
21	18	55	100
22	18	55	100
23	18	47	100
24	18	50	100
25	19	58	100
26	19	47	100
27	19	55	100
28	19	50	100
29	19	60	100
30	20	60	100
31	20	60	100
32	20	57	100
33	20	50	100
34	20	50	100

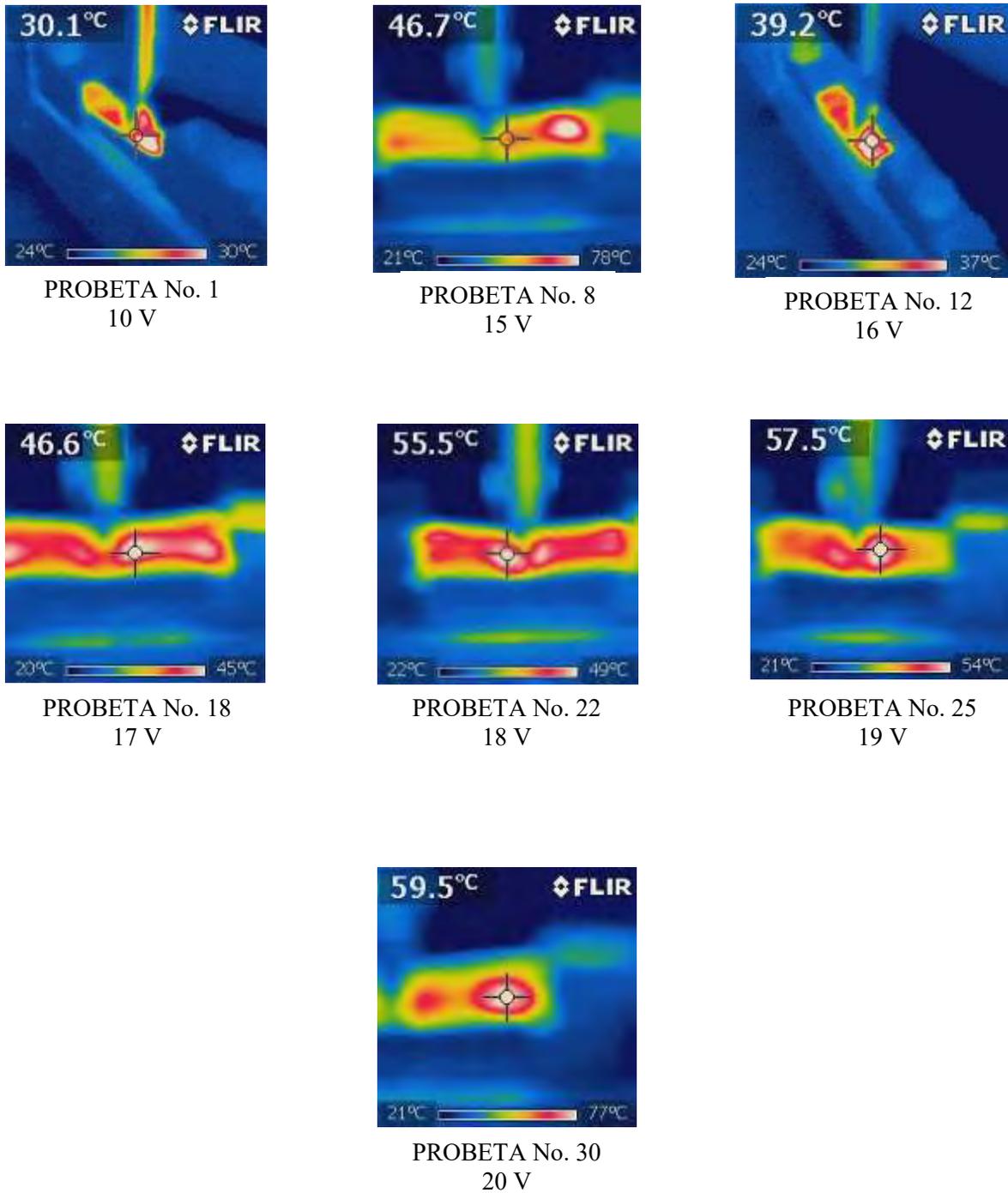


Figura 4. 2. Imágenes termográficas del promedio de temperaturas.

4.4. ANÁLISIS SOBRE LAS SUPERFICIES DE FRACTURA RELACIONADAS CON EL INICIO Y PROPAGACIÓN DE GRIETAS.

La localización de la fractura bajo condición tres puntos de carga de fatiga ultrasónica donde se produce un orificio hacia un costado de la línea central, muestran el mecanismo de daño bajo esta modalidad de prueba de fatiga. Aparece una combinación de efectos térmicos y mecánicos [26]. Además, teniendo en cuenta que la resistencia a la tracción de Nafion 115 es de 32-43 MPa, la vida de fatiga bajo condición tres puntos en fatiga ultrasónica cerca al medio millón de ciclos requiere una carga aplicada de sólo 0,48 MPa, alrededor de una centésima parte en relación a la resistencia a la tracción para esta membrana [27].

Como se observa en las imágenes captadas haciendo uso del microscopio de barrido electrónico, en las superficies de fractura, se observan pequeñas burbujas en la membrana por la combinación de carga mecánica y térmica, que colisionan durante las pruebas experimentales que conducen a pequeños orificios. La degradación de este polímero durante la prueba de fatiga ultrasónica se observa claramente en las **Figuras 4.3. 4.4. y 4.5.**, relacionados con las probetas ensayadas de la **Tabla 4.2.**, rotura y separación de material en la capa externa de Nafion 115. En las dos últimas figuras se muestra la deformación plástica y la degradación del polímero a escala microscópica, donde el efecto de la temperatura sería el factor predominante para el fallo por fatiga [24] [25].

VISUALIZACIONES EN EL MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRÓNICO.

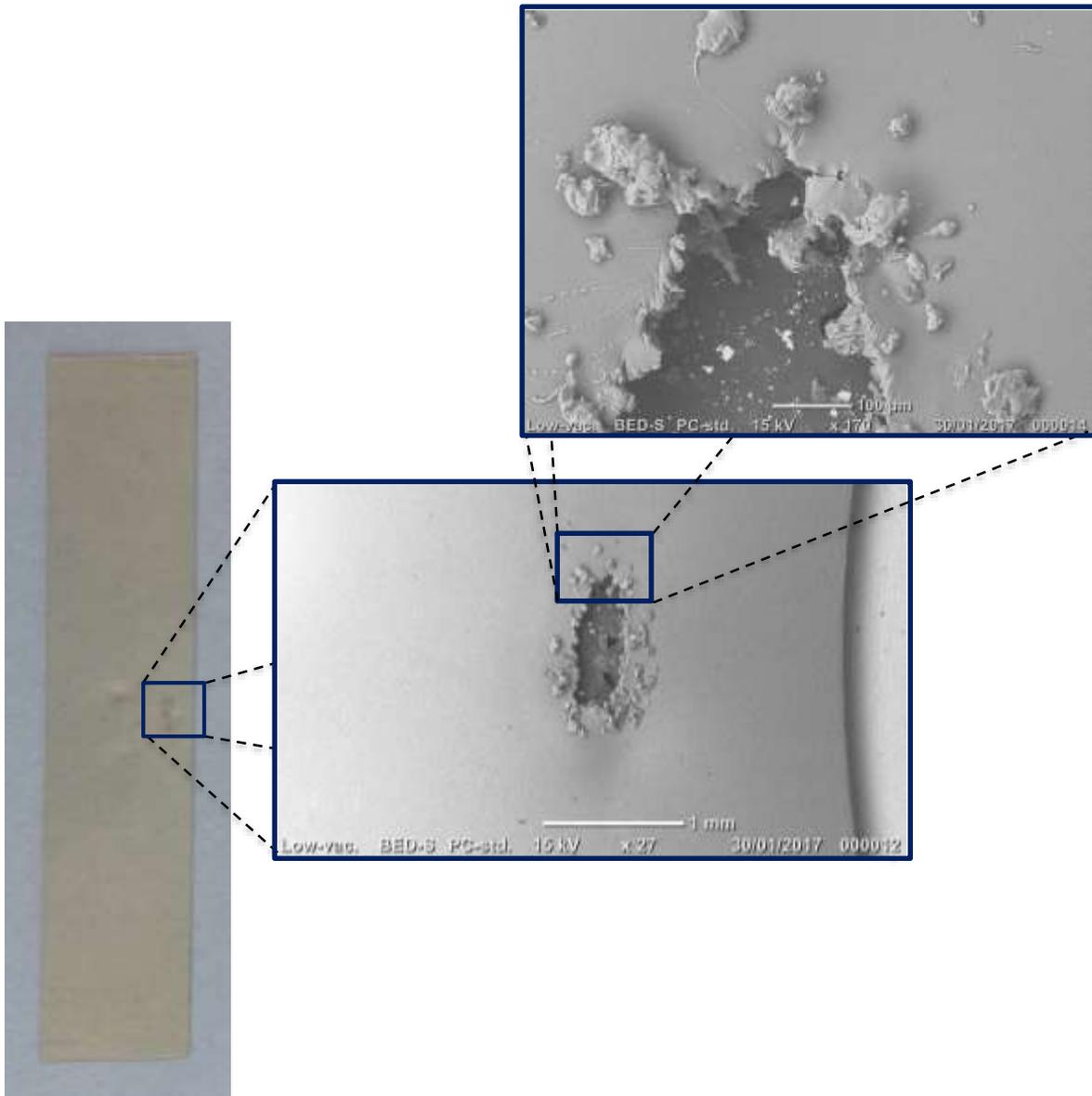


Figura 4. 3. Análisis de inicio y propagación de fisura probeta No. 22 Tabla 4.2, sometida a 18 volts con desplazamiento por vibración ultrasónica de 25 μm.

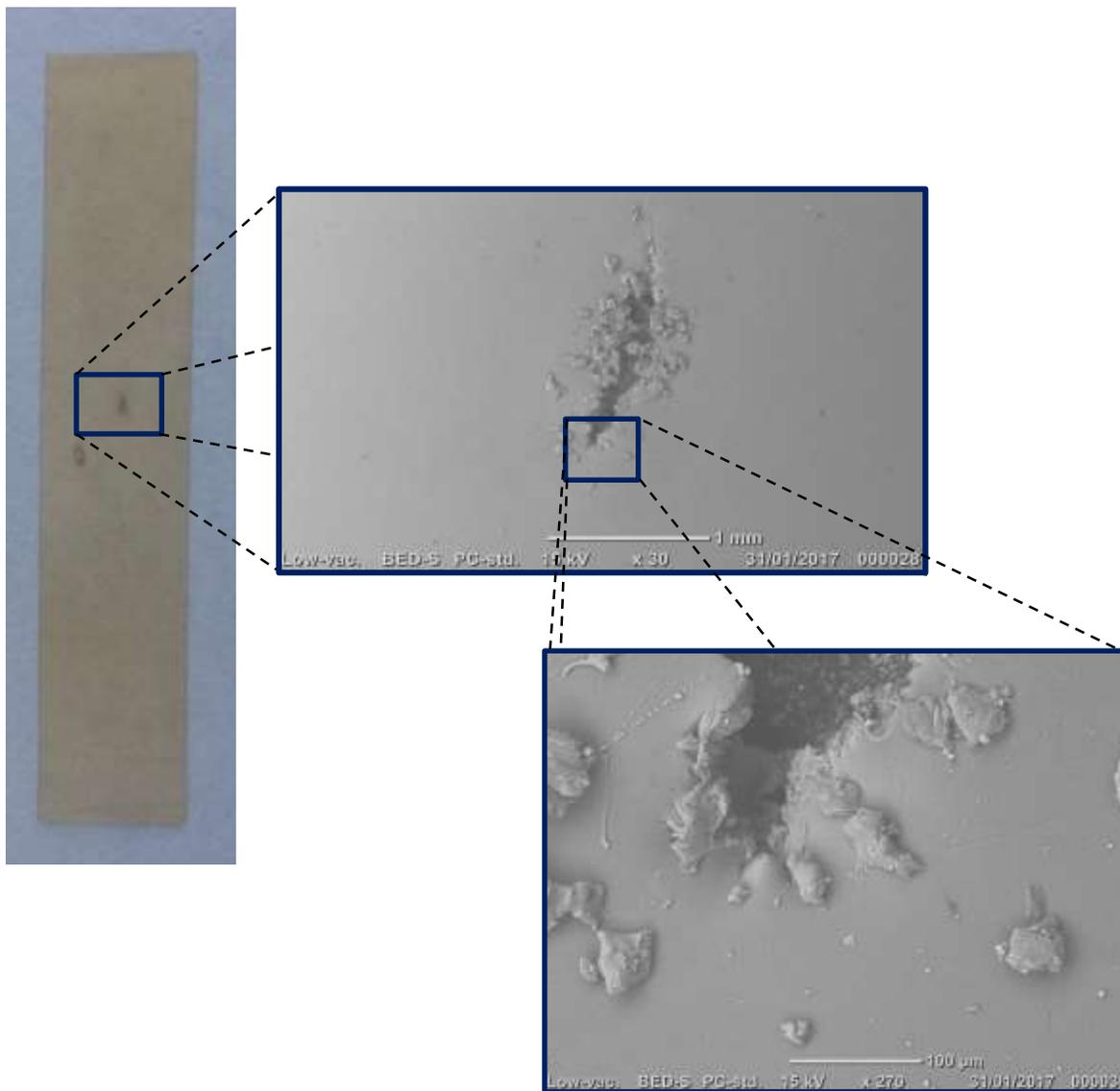


Figura 4. 4. Análisis de inicio y propagación de fisura probeta No. 30 Tabla 4.2, sometida a 20 volts con desplazamiento por vibración ultrasónica de 23 μm .

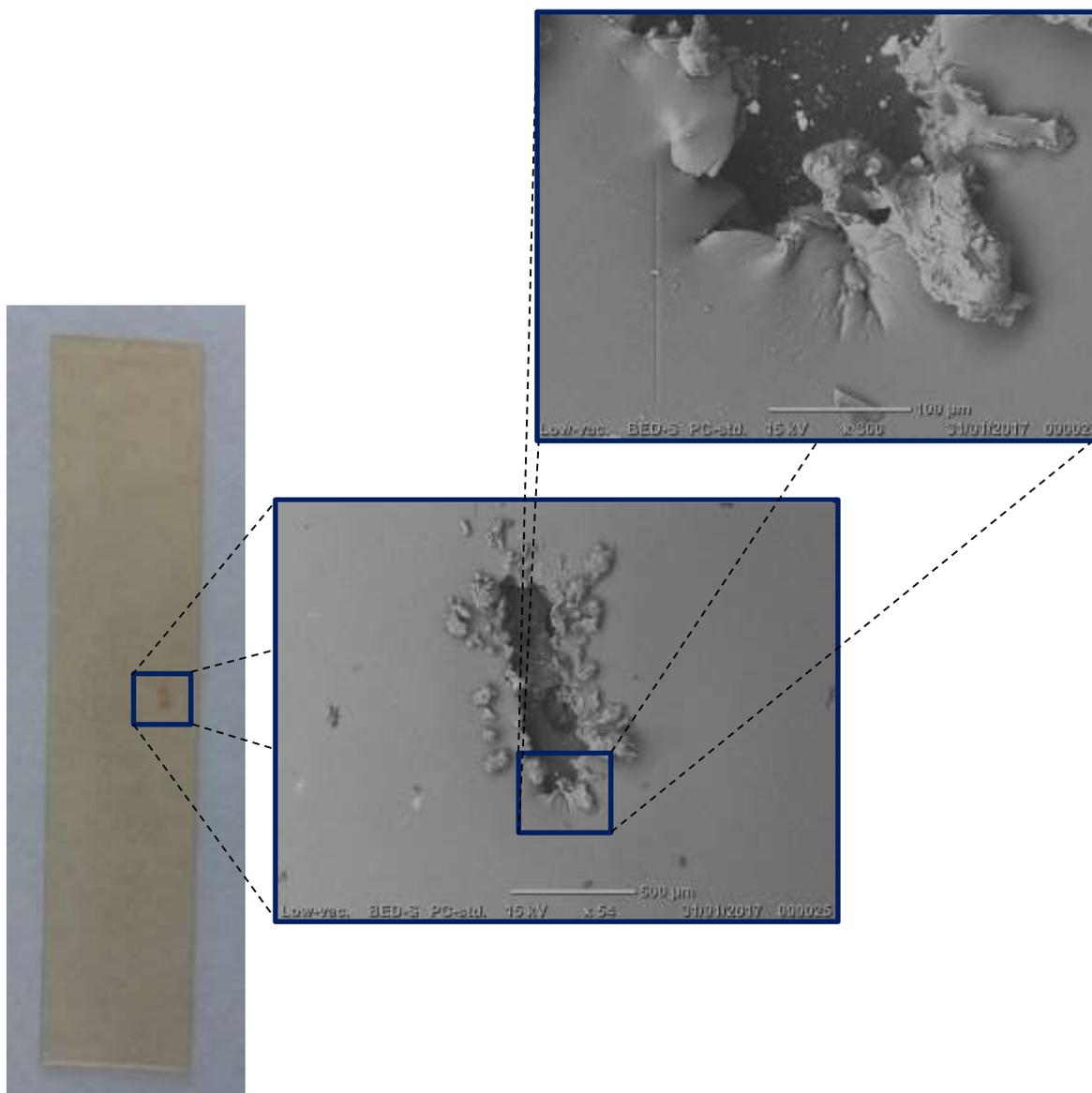


Figura 4. 5. Análisis de inicio y propagación de fisura Probeta No. 8 Tabla 4.2, sometida a 15 volts con desplazamiento por vibración ultrasónica de 19 µm.

CONCLUSIONES.

- Se realizaron pruebas de fatiga ultrasónica bajo la modalidad de flexión de tres puntos en la membrana polimérica de intercambio protónico Nafion 115 con aplicación en celdas de combustible.
- La temperatura de ensayo más alta se mantuvo baja (60°C), representando el 55% con respecto a la temperatura de transición vítrea de este material polimérico.
- Los puntos experimentales presentan alguna dispersión; Sin embargo, se observa una clara tendencia para la vida de fatiga bajo la modalidad de prueba: a) aumento de la vida de fatiga con la disminución de la carga aplicada y b) temperatura de la prueba aumenta con el aumento de la carga aplicada.
- La resistencia a la fatiga bajo esta modalidad es cercana a medio millón de ciclos para 0,478 MPa de carga aplicada; Esta propiedad mecánica es cercana a 5.5 millones de ciclos cuando la carga aplicada disminuye a 0.468 MPa.
- Bajo control externo de humedad relativa ($\text{HR} = 40\text{-}45\%$), la iniciación de fisuras se encuentra en las zonas de altas temperaturas termográficas: en la línea central de la tira Nafion 115 (a lo largo del contacto entre el punzón y la tira Nafion 115) y cerca de los extremos sujetos de la tira. La iniciación y propagación de la grieta bajo esta modalidad de ensayo de fatiga es inducida por una combinación de efectos mecánicos y térmicos.
- La degradación inicial de la tira Nafion 115 se observa en la capa externa de este material polimérico por rasgado y separación de material; La degradación adicional se extiende a la zona interior con tiempo de ensayo.

TRABAJOS FUTUROS.

- En el futuro próximo se emprenderán nuevas investigaciones sobre esta modalidad de pruebas de fatiga por ultrasonidos en Nafion 115. El interés particular se centrará en: desacoplar los efectos mecánicos y térmicos sobre la degradación de este polímero, la variación de la humedad interna y su influencia en la resistencia a la fatiga, un enfoque por modelos para simular la resistencia a la fatiga de esta membrana, bajo la modalidad propuesta de pruebas de fatiga.

ACCIONES DE DIFUSIÓN REALIZADAS.

- JCR, Ultrasonic Fatigue Tests on the Nafion Proton Exchange Membrane, Under the Modality of Three Points Bending. Publicación arbitrada. ISSN: 2452-3216, Procedia Structural Integrity.
- XXIV Italian Group of Fracture Conference, Urbino, Italy. Ultrasonic Fatigue Tests on the Nafion Proton Exchange Membrane, Under the Modality of Three Points Bending. 1-3 March 2017. Presentación en congreso.
- JCR, Ultrasonic Fatigue Testing on the Polymeric Material PMMA, Used in Odontology Applications. Publicación arbitrada. ISSN: 2452-3216, Procedia Structural Integrity.
- XXIV Italian Group of Fracture Conference, Urbino, Italy. Ultrasonic Fatigue Testing on the Polymeric Material PMMA, Used in Odontology Applications. 1-3 March 2017. Presentación en congreso.
- Asistencia al Primer Seminario de Ingeniería MEATAL MECÁNICA, Ponente de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Noviembre 24 y 25 del 2016.
- Ponencia “Validación de componentes mecánicos con Ansys.” En el Primer Seminario de Ingeniería MEATAL MECÁNICA Memoria del Trabajo enviado con ISBN: En trámite. Noviembre 24 y 25 del 2016.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Cano, U., Rejón, L., & Ojeda, M.. (2000, agosto 20). infraestructura de uso de hidrogeno y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso. iie, 1,2,3,4. 2015, junio 28, De iie Base de datos.
- [2] Asensio, J., Peña, J., Perez-Coll, D., Ruiz, J., Marrero, D., Nuñez, P., Ballesteros, B., Canales, J., Borrós, S., & Gémez, P.. (2011, septiembre 2). Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. GEMAT, 554, 1,2,8,12. 2015, junio 22, De Centro de Investigación de Nanociencia y Nanotecnología Base de datos.
- [3] Rodríguez Varela F.J., Solorza Feria O., Hernandez Pacheco E. Celdas de Combustible. ISBN 978-0-9809915-2-9. Pag.17, 18.
- [4] Cubillos Alfonso. Introducción al método de los elementos finitos. Universidad de Ibagué. Programa de ingeniería mecánica. Pag.1 – 3.
- [5] Domínguez Almaraz G.M., Avila Ambriz J.L., Cadenas Calderon E., “Fatigue endurance and crack propagation under rotating bending fatigue tests on aluminum alloy AISI 6063-T5 with controlled corrosion attack”, Engineering Fracture Mechanics, 2012, Vol. 93, pp. 119-131.
- [6] Domínguez Almaraz G.M., Correa Gómez E. Ultrasonic Fatigue Endurance Investigation on Plastic Material Nylon 6. Materials Sciences and Applications, 2011,2,1293-1297. DOI:10.4236/msa.2011.29174 Published Online September 2011 (<http://www.SciRP.org/journal/msa>). ISSN Print: 2153-117X. ISSN Online: 2153-1188.

- [7] Domínguez Almaraz G.M., Correa Gómez E., Quintana Zepeda V.H., Gómez Sánchez A. Ultrasonic Fatigue Tests on Plastic Material: “Nylomaq”. Fifth International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF). Berlín, Alemania ISBN 978-3-9814516-0-3.
- [8] Domínguez Almaraz G.M., Correa Gómez E., Verduzco Juárez J.C., González Bernal R., Avila Ambriz J.L. Fatigue Analysis Undergoing Rotating Bending Tests of Aluminum Alloy AISI 6061-t6, Subjected to Welding Process GMAW (Gas Metal Arc Welding). XXI International Materials Research Congress. Cancún, Qroo. México. Agosto 12 - 17, 2012.
- [9] Anderson T.L., Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, Taylor & Francis Editor, Tercera Edición (2005), 621 páginas.
- [10] Rice J.R. “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks”, Journal of Applied Mechanics”, Vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- [11] Begley J.A. and Landers J.D., “The J-Integral as a Fracture Criterion” ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1972, pp. 1-20.
- [12] Erdogan, G. and Sih, G.-C., On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, ASME J. Basic Engineering, Vol. 85, pp. 519-527.
- [13] Shih C., F., Small-scale yielding of mixed mode planes train crack problems. ASTM STP 560, ASTM Philadelphia, 1974, pp.187–210.
- [14] Goldstein, R V and Salganik, R L, Brittle fracture of solids with arbitrary cracks, Int. J. Fract., 10, 1974, 507-523.

- [15] Duga J.J., Fisher W.H., Buxbaum R.W., Rosenfeld A.R., Mc Millan S.C., The economic effects of fracture in the United States, Part 2-A report to NBS by Batelle Columbus Laboratories, Technical Report, Special Publication, 1983.
- [16] Domínguez Almaraz G.M., Guzmán Tapia M., Patente: “Máquina para pruebas de fatiga en flexión rotativa, a gran número de ciclos”, número de patente: MX276818, recibida en mayo 2010.
- [17] C. Yanga, P. Costamagn, S. Srinivasan, J. Benziger, A.B. Bocarslyd: “Approaches and technical challenges to high temperature operation of proton exchange membrane fuel cells”. A Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA b Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA c Department of Chemical Engineering, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA d Department of Chemistry, Princeton University, Princeton, NJ 08540, USA.
- [18] M. BARCLAY SATTERFIELD,¹ PAUL W. MAJSZTRIK,² HITOSHI OTA,² JAY B. BENZIGER,¹ ANDREW B. BOCARSLYD: “Mechanical Properties of Nafion and Titania/Nafion Composite Membranes for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”. ¹Department of Chemical Engineering, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544 ²Chemistry Department, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544 Received 23 January 2006; revised 21 March 2006; accepted 13 April 2006 DOI: 10.1002/polb.20857 Published online in Wiley InterScience.
- [19] T. Leon Yu^{1,2,*}, Hsiu-Li Lin^{1,2}, Kun-Sheng Shen¹, Li-Ning Huang¹, Yu-Chen Chang^{1,2}, Guo-Bin Jung² and Jerry C. Huang¹: “Nafion/PTFE Composite Membranes for Fuel Cell Applications”. ¹ Department of Chemical Engineering, Yuan Ze University, Nei-Li, Taoyuan, 32026, Taiwan ² Fuel Cell Center, Yuan Ze University, Nei-Li, Taoyuan, 32026, Taiwan.

- [20] Yangjian Zhang, Cheng Wang, Nianfang Wan, Zhixiang Liu, Zongqiang Mao *
“Study on a novel manufacturing process of membrane electrode assemblies for solid polymer electrolyte water electrolysis” Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Qinghua Yuan, Haidian District, Beijing 100084, China.
- [21] Sathya Motupally, Aaron J. Becker, John W. Weidner: “Diffusion of Water in Nafion 115 Membranes”. University of South Carolina - Columbia, weidner@enr.sc.edu
- [22] M. BARCLAY SATTERFIELD, JAY B. BENZIGER: “Viscoelastic Properties of Nafion at Elevated Temperature and Humidity”. Department of Chemical Engineering, Princeton University, Princeton, New Jersey.
- [23] Satterfield M.B., Majsztrik P.W., Ota H., Bezinger J.B., Bocarsly A.B., 2006. Mechanical properties of Nafion and Titania/Nafion composite membranes for polymer electrolyte membrane fuel cells.
- [24] Khorasany R.M.H., Alavijeh A.S., Kjeang E., Wang G.G., Rajapakse R.K.N.D., 2015. Mechanical degradation of fuel cell membranes under fatigue fracture tests. *Journal of Power Sources* 274, 1208–1216.
- [25] Khorasany R.M.H., Singh Y., Alavijeh A.S., Rajapakse R.K.N.D., 2016. Fatigue properties of catalyst coated membranes for fuel cells: Ex-situ measurements supported by numerical simulations. *International Journal of Hydrogen Energy* 41(2016). 8992-9003.
- [26] Bhadra S., Kim N.-H., Choi J.-S., Lee J.-H., 2010. Hyperbranched poly(benzimidazole-co-benzene) with honeycomb structure as a membrane for high-temperature proton-exchange membrane fuel cells 195(9), 2470-2477.

- [27] Tan S., Bélanger D., 2005. Characterization and transport properties of Nafion/Polyaniline composite membranes. *The Journal of Physical Chemistry* 109(49), 23480–23490.
- [28] Amjadi M., Rowshanzamir S., Peighambardoust S.J., Eikani M.H., 2010. Investigation of physical properties and cell performance of Nafion/TiO₂ nanocomposite membranes for high temperature PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(17), 9252-9260.
- [29] Bauer F., Denneler S., Willert-Porada M., 2005. Influence of temperature and humidity on the mechanical properties of Nafion® 117 polymer electrolyte membrane. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* 43(7), 786–795.
- [30] Khorasany R.M.H., Alavijeh A.S., Kjeang E., Wang G.G., Rajapakse R.K.N.D., 2015. Mechanical degradation of fuel cell membranes under fatigue fracture tests. *Journal of Power Sources* 274, 1208–1216.
- [31] Tan S., Bélanger D., 2005. Characterization and transport properties of Nafion/Polyaniline composite membranes. *The Journal of Physical Chemistry* 109(49), 23480–23490.