

**Estudio del comportamiento de la sensibilidad de entalla de polímeros (Onyx y nylon) para
manufactura aditiva (AM).**

Juan David Sandoval Herrera

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico

Director Alberto David Pertuz Comas, PhD. en Ingeniería Mecánica.

Codirector Jorge Guillermo Díaz Rodríguez, PhD. en Ingeniería Mecánica.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de ingenierías Físico-mecánicas
Escuela de ingeniería mecánica
Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este proyecto es dedicado a mi padre Pedro Antonio Sandoval Cruz y madre Flor de María Herrera Chipagra, Hermanos Freddie Andrés Sandoval Herrera, Angie Juliana Sandoval Herrera, Paula Julieth Sandoval Herrera y mi novia Zahira Melissa Navarro Cala que sin su ayuda no sería posible también a todas las personas las cuales contribuyeron y apoyaron en todo este trayecto.

Juan David Sandoval Herrera

Agradecimientos

Doy gracias a todas las personas que estuvieron acompañándome en todo este proceso universitario a mis directores Alberto David Pertuz y Jorge Guillermo Diaz, gracias a ellos profundicé mejor mis conocimientos, aprendí y crecí académicamente.

Al laboratorio de Microscopia de la Universidad Industrial de Santander ubicada en la sede Guatiguará por su gran cooperación y también al SENA – Tecnoparque por sus servicios brindados, infinitas gracias.

Juan David Sandoval Herrera

Contenido

	Pág.
Introducción.	9
1. Planteamiento y/o justificación del problema.	13
2. Objetivos.	15
2.1 Objetivo general:	15
2.2 Objetivos específicos:	15
3. Materiales y métodos.	16
4. Resultados y análisis	22
4.1 Ensayos de tracción Onyx	22
4.2 Ensayos de fatiga Onyx sin muesca	23
4.3 Ensayos de fatiga Onyx con muescas	35
4.4 Análisis fractográfico	48
5. Conclusiones	54
Bibliografía	56

Lista tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros ensayos de tracción.	18
Tabla 2. Especímenes con muescas.	20
Tabla 3. Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx.	24
Tabla 4. Datos finales del ensayo para el espécimen 1 sin muesca.	24
Tabla 5. Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 2.	26
Tabla 6 Datos finales del ensayo para el espécimen 2 sin muesca.	27
Tabla 7. Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 3.	28
Tabla 8. Datos finales del ensayo para el espécimen 3 sin muesca.	29
Tabla 9. Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 4.	30
Tabla 10. Datos finales del ensayo para el espécimen 4 sin muesca.	31
Tabla 11 Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 5.	31
Tabla 12 Datos finales del ensayo para el espécimen 5 sin muesca.	32
Tabla 13 Tamaños de muescas a investigar.	35
Tabla 14. Concentrador de esfuerzos para cada tamaño de muesca.	38
Tabla 15 Estimación de esfuerzo para el numero de ciclos a la falla.	39
Tabla 16. Deformación para cada configuración muesca.	39
Tabla 17. Condiciones para la muesca N°5.	40
Tabla 18. Datos obtenidos para las configuraciones de las muescas propuestas.	43
Tabla 19. Estimación del factor de concentración de esfuerzo por fatiga.	45
Tabla 20. Sensibilidad de muesca para cada configuración.	46

Lista figuras

	Pág.
Figura 1. Impresora 3D MarkForged Mark Two © utilizada para fabricar los especímenes.	16
Figura 2. (a) Dirección de carga ensayos estáticos (b) Dirección de carga ensayos dinámicos.	17
Figura 3. Geometría y medida en (mm) de los especímenes.	18
Figura 4. Extensómetro MTS 634.12F-25.	19
Figura 5. Impresión 3D Onyx sin muesca.	19
Figura 6 Máquina MTS Bionix model 370.02.	20
Figura 7. Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650.	21
Figura 8. Diagrama de Esfuerzo vs Deformación unitaria Onyx.	22
Figura 9. Modulo de elasticidad Onyx.	23
Figura 10. Alargamiento longitudinal del espécimen luego de la prueba de fatiga uniaxial.	25
Figura 11. Variación del grosor del espécimen a 1'181.865.	26
Figura 12. Modelo lineal para predecir la fuerza máxima.	28
Figura 13. Modelo lineal actualizado para predecir la fuerza máxima.	30
Figura 14. Grieta de la muestra lisa número 5.	32
Figura 15. Zoom grieta de la muestra lisa número 5.	33
Figura 16. Resultados de los ensayos número 3,4,5 sin muesca.	33
Figura 17. Modelo matemático que predice la máxima deformación a determinado número de ciclos a la falla.	34
Figura 18. Curva S-N experimental Onyx sin muesca y ajustada con el modelo de Basquin.	35
Figura 19. Muecas a investigar: (a) Muecas $r = 0.25$ mm (b) Muecas $r = 0.5$ mm, 1 mm, 1.5 mm y 2 mm.	36
Figura 20. Cálculo de K_t para la muesca con radio de muesca 2 mm.	37
Figura 21. Resultado K_t cálculo muesca N°5.	38
Figura 22 Esfuerzo máximo en la punta de la muesca "U" para un espécimen plano.	40
Figura 23. Inicio de grieta en la muesca tipo "U".	41
Figura 24. Crecimiento de la grieta en una muesca tipo "U".	42
Figura 25 Grieta extendida por la parte fontal de la muesca.	42
Figura 26. Crecimiento de grieta en la parte lateral del espécimen.	43
Figura 27. Curva S-N para cada configuración de muesca Onyx.	44
Figura 28. Sensibilidad de muesca q vs r radio de muesca.	47
Figura 29. K_f vs K_t.	47
Figura 30. K_f vs r.	48
Figura 31. Nitrógeno líquido aplicado a los especímenes.	48
Figura 32. Preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido.	49
Figura 33. Imagen SEM para el espécimen radio de muesca 2 mm.	50

Figura 34. Imagen SEM para el espécimen radio de muesca 2 mm..... 51
Figura 35. Imagen SEM zona de fractura espécimen con radio de muesca de 0.25 mm. 52
Figura 36. Imagen SEM zona de fractura espécimen con radio de muesca de 1.5 mm. 53

Resumen

Título: Estudio del comportamiento de la sensibilidad de entalla de polímeros (Onyx y nylon) para manufactura aditiva (AM)*.

Autor: Juan David Sandoval Herrera**

Palabras clave: Sensibilidad de muesca, Fatiga uniaxial, carga dinámica, polímeros, onyx, manufactura aditiva.

Onyx es un nuevo material de la familia de los polímeros que mediante una fabricación de manufactura aditiva con impresoras 3D que fabrican termoplásticos están llevando esta tecnología a un nuevo nivel en términos de eficiencia de producción, bajo desperdicio de material y propiedades mecánicas óptimas. Por esta razón, es necesario estudiar el comportamiento mecánico bajo las cargas estáticas y dinámicas de las piezas fabricadas en este material y así determinar si cumplen las propiedades mecánicas necesarias para ser considerados como piezas funcionales. El propósito de este trabajo es presentar el estado actual del comportamiento de este material sin y con muescas en “U” de diferentes tamaños y analizar este estudio bajo las cargas estáticas y dinámicas para determinar experimentalmente la curva de fatiga S-N con el fin de ajustar los datos a modelos como el propuesto por Basquin.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías físicomecánicas Escuela de ingeniería Mecánica director: Alberto David Pertuz Comas, PhD. en Ingeniería Mecánica; codirector Jorge Guillermo Díaz Rodríguez, PhD en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Study of the behavior of the notch sensitivity of polymers (Onyx and nylon) for additive manufacturing (AM)*.

Author: Juan David Sandoval Herrera**

Keywords: Notch sensitivity, uniaxial fatigue, dynamic loading, polymers, onyx, axial loading.

Onyx is a new material from the polymer family that through additive manufacturing with 3D printers that manufacture thermoplastics are taking this technology to a new level in terms of production efficiency, low material waste and optimal mechanical properties for this reason, it is necessary to study the mechanical behavior under static and dynamic loads of the parts made of this material and thus determine if they meet the necessary mechanical properties condition and be considered as functional parts. The purpose of this paper is to present the current status of the performance of this material without notches and with notches “U” of different sizes and to analyze this study under the static and dynamic loads to experimentally determine the S-N fatigue curve in order to fit the data to models such as the one proposed by Basquin.

*Degree work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Alberto David Pertuz Comas, PhD. en Ingeniería Mecánica; codirector Jorge Guillermo Díaz Rodríguez, PhD en Ingeniería Mecánica.

Introducción.

La manufactura aditiva es un conjunto de tecnologías que comparten ciertas características para realizar un proceso. Hoy en día ha evolucionado a la producción de piezas funcionales, la ventaja de esta tecnología es que las piezas no son moldeadas o mecanizadas y también se pueden hacer modelos con formas y geometrías complejas que tal vez no serían posible mediante otro método, generando ahorro de tiempo y material (Dudek, 2013). Su característica principal es el proceso de extrusión ya que esta tecnología lo ejecuta adicionando material capa por capa permitiendo la superposición de material, se debe modelar la figura en un programa CAD u obtenerla mediante escaneo. (Leon Becerra, Díaz Rodríguez, & González Estrada, 2020). Hoy en día se pueden encontrar diferentes tipos de impresión 3D. El método de modelado deposición fundida FDM es uno de ellos y permite el uso de una amplia variedad de materiales termoplásticos, esta tecnología se puede usar en aplicaciones médicas como la ingeniería de tejido óseo y el desarrollo de prótesis personalizadas (Dudek, 2013).

Debido al fenómeno de fusión y solidificación de la matriz polimérica termoplástica, el FDM presenta nuevos parámetros de proceso a considerar. Se ha encontrado que los parámetros particulares de la manufactura aditiva que afectan las propiedades mecánicas son: espesor de capa, velocidad de alimentación, dirección de construcción y temperatura del extrusor, siendo dependientes los dos primeros. La orientación de la dirección de construcción es uno de los parámetros que más afecta las partes (Chacón et al. , 2019).

El Onyx es una matriz de nylon con microfibra corta de carbono que produce piezas precisas con un muy buen acabado superficial. Ofrece alta resistencia, tenacidad, resistencia

química y se puede reforzar con fibras continuas para producir piezas altamente resistentes. (Markforged., s.f.).

Un material compuesto se basa en una estructura molecular lineal y cuando se moldea su estructura no varía respecto a su estado base inicial. Dentro de los materiales compuestos termoplásticos está el Onyx. Posee una buena resistencia al desgaste y tenacidad. Los plásticos pueden tener un cambio de sus propiedades a medida que envejecen, en especial, cuando se someten a temperaturas elevadas (Mott, 2006).

Existen diferentes métodos que nos permiten predecir la vida de un componente con entalla. Uno de estos métodos desarrollado por Neuber (Neuber, Theory of Notch Stresses, 1958) replanteo la idea de Weighardt después de 50 años, en su libro donde le llamo (fictitious notch rounding FNR). Es un método donde utiliza la tensión promediada en una pequeña distancia antes de la grieta en la muesca para la resistencia estática o a la fatiga del componente. Otro método (TDC) teoría de la distancia crítica este llamado así por Taylor en el (paper The theory of critical distances) (Taylor, 2008). Clegg hizo diferentes artículos relacionados al uso de la teoría de la distancia critica como (The theory of critical distances and fatigue from notches in aluminium 6061). Allí se usaron procedimientos analíticos como gráficos para el desarrollo del cálculo de la distancia crítica de la sensibilidad a la muesca de un aluminio. (Clegg et al. , 2012).

(Yang et al. , 2012) describe y presenta un método para la predicción de la vida a la fatiga donde la tensión nominal y el concertador de esfuerzos son importantes para la elaboración del método. Se midió la sensibilidad a la muesca de dos materiales basados en NiDZ125 y Ti-6Al-4V con muesca en “V” y en “U”.

Los tres métodos de fatiga-vida que se usan en el diseño y el análisis son: el método de esfuerzo-vida, el método de deformación-vida y el método de mecánica de la fractura lineal

elástica. Con ellos se busca la predicción de vida en función del número de ciclos de carga. El límite a la resistencia a la fatiga es un parámetro que se mide en general mediante ensayos de esfuerzos, aunque son preferibles los ensayos de deformación (Budynas & Nisbett, 2008).

El comportamiento estático de termoplásticos reforzados e impresos en manufactura aditiva y modelado por deposición fundida fue estudiado mediante ensayos de tracción uniaxial calculando las propiedades mecánicas. La composición del material de estudio es de matriz de nylon reforzada con fibra de vidrio, fibra de carbono, kevlar y sección transversal de anillos concéntricos. La caracterización de las propiedades de fatiga bajo carga de tracción uniaxial se realiza de acuerdo con ASTM D7791-14 método de prueba estándar para propiedades de fatiga uniaxial de plásticos. La distribución de Weibull se selecciona como método estadístico para el ajuste de los datos obtenidos en cada nivel de carga. Ajustando los datos con esta herramienta estadística, se puede obtener una media precisa para el número de ciclos del material en cada respectivo nivel de carga (Pertuz et al. , 2020).

(Ezeh & Susmel, 2020) realizó un estudio sobre la resistencia a la fatiga de la muesca del polímero poliláctico fabricado aditivamente (PLA), por medio del uso de la teoría de distancias críticas y extendiendo también a la evaluación de la fatiga del PLA impreso en 3D con muescas. Se observó que esta teoría arrojaba estimaciones precisas.

Se estudió la sensibilidad a la muesca a flexión de alambres de alta resistencia para evaluar la sensibilidad de muesca (Kenedi, 2017). Esto se llevó a cabo experimentalmente mediante ensayos de fatiga y así poder evaluar el concentrador de esfuerzos a la fatiga. Se utilizó el método la escalera (Dixon, 1965) ese método utiliza una idea simple. Una muestra se somete a un cierto nivel de tensión, después de un cierto número de ciclos si esta muestra se rompe, la siguiente muestra tiene el nivel de tensión disminuido por una disminución de tensión predefinida, sin

embargo, si la muestra no se rompe, el nivel de tensión aumenta con un incremento de tensión predefinido, este proceso continúa hasta que se utilizan todas las muestras hasta un número significativo de muestras que son estadísticamente representativas (Dixon & Mood, 1948). Los ensayos de tracción son realizados para determinar las principales propiedades mecánicas monótonas del material, tales como: límite elástico S_y y resistencia máxima del material S_{ut} . Para evaluar experimentalmente el valor de K_f , fue necesario obtener los límites de fatiga de las probetas libres con muescas y sin muescas. (Kenedi, 2017).

Se han utilizado varios modelos de fatiga para predecir la vida de fatiga de los materiales termoplásticos, el modelo de Basquin se emplea para ajustar los datos por su precisión y sencillez en los ensayos de fatiga uniaxial en tipo de especímenes donde la fatiga con muescas se determina en pruebas experimentales (Basquin, 1910).

En el presente proyecto de investigación se quiere estudiar la sensibilidad a la entalla de material polimérico termoplástico Onyx con el fin de usarla en métodos de diseño generalmente aceptados como el método esfuerzo-vida (S-N). El estudio de sensibilidad a la muesca se hizo a diferentes radios de entalla con una configuración de tipo “U” sometiendo las muestras a ensayos de fatiga bajo carga uniaxial.

1. Planteamiento y/o justificación del problema.

La impresión 3D o Additive Manufacturing (AM) es un grupo de tecnologías de fabricación de piezas muy innovador el cual en los últimos años ha tenido un gran auge dado que permite abarcar todo tipo de geometrías complejas y fabricación de numerosas piezas que por métodos de fabricación convencionales actualmente son muy difícil desarrollar (Yang et al. , 2012).

La (AM) aún tiene limitaciones para ser totalmente funcional debido a que se presentan varios inconvenientes como la falta de resistencia, análisis de falla, baja rigidez y fabricación. Debido a que son materiales anisotrópicos se han desarrollado nuevas tecnologías para mejorar sus propiedades mecánicas y productividad. Más aún, no existe un consenso general en los métodos de diseño a usar (Leon Becerra et al. , 2020).

El modelado por deposición fundida (FDM) es el método más utilizado en la impresión 3D debido a su bajo costo y la cantidad mínima de desperdicio de material. Esta técnica se basa en la deposición de material de fibra fundida en una plataforma desplegable, que ofrece la oportunidad de diseñar e introducir nuevos materiales, incluidos los compuestos (González et al. , 2020).

Cuando aparece una discontinuidad en una pieza y está sometida a cargas fluctuantes no se comporta de la misma forma que un componente sin muesca, esta representa un cambio de sección transversal en el material concentrando esfuerzos en la zona donde está la muesca. La sensibilidad de muesca es un factor que actúa contra los concentradores de esfuerzos debidos especialmente a la geometría de la muesca, este parámetro también se ve afectado por las propiedades y fabricación del material. Si dos materiales de diferentes propiedades se someten a ensayos de fatiga con el

mismo tamaño de discontinuidad e iguales condiciones iniciales, el comportamiento será diferente para cada una. La apertura de una grieta en una muesca normalmente inicia en la punta de ellas debido que allí se produce el máximo esfuerzo por concentración de esfuerzos. El valor de la sensibilidad de entalle para los materiales como el acero y aluminio se pueden encontrar en tablas y graficas. (Budynas & Nisbett, 2008).

El análisis de las formas geométricas para determinar los factores de concentración de esfuerzos se convierte en un problema difícil y no se encuentran muchas soluciones. La mayoría de los concentradores de esfuerzos se determina por medio de técnicas experimentales como las compiladas por Peterson (Pilkey et al. , 2020), numéricamente o una combinación de los dos (Diaz, 2022).

Con la intención de conocer el desempeño operativo de materiales poliméricos para manufactura aditiva AM se desea realizar el estudio y la caracterización de la sensibilidad a la entalla para poder usarla en métodos de diseño aceptados. En la Universidad Industrial de Santander se han realizado pocas investigaciones respecto al tema para estos materiales tanto en ensayos estáticos como a la fatiga. Esta propuesta pretende dar respuesta al siguiente interrogante ¿Cuál es la sensibilidad de entalla en las muescas del material polimérico Onyx usado en manufactura aditiva?

2. Objetivos.

2.1 Objetivo general:

Evaluar la sensibilidad de entalla en las muescas de los materiales poliméricos usados en AM (Additive manufacturing) mediante la técnica FDM (fused deposition modelling).

2.2 Objetivos específicos:

Estudiar los métodos reportados en literatura para establecer la sensibilidad a la entalla con el fin de identificar el método apropiado para materiales poliméricos usados en AM.

Determinar las propiedades mecánicas bajo carga axial del material polimérico Onyx usados en AM.

Evaluar el efecto del tamaño de entallas en ensayos de fatiga uniaxial en material polimérico Onyx usados en AM.

Realizar un análisis fractográfico con el fin de establecer la causa de falla en la zona de fractura.

3. Materiales y métodos.

Las muestras fueron manufacturadas con la tecnología FDM usando la impresora Mark Two, ver Figura 1, de Tecnoparque SENA Bucaramanga. Se usó ONYX para las muestras que es nylon embebido con fibra corta de carbono. Se imprimieron 7 muestras lisas y 14 muestras con muesca.

Figura 1

Impresora 3D MarkForged Mark Two © utilizada para fabricar los especímenes.



Se han utilizado varios modelos de fatiga para predecir la vida de fatiga de los materiales termoplásticos. Se utiliza el modelo de Basquin (Basquin, 1910). Ver Eq. (1).

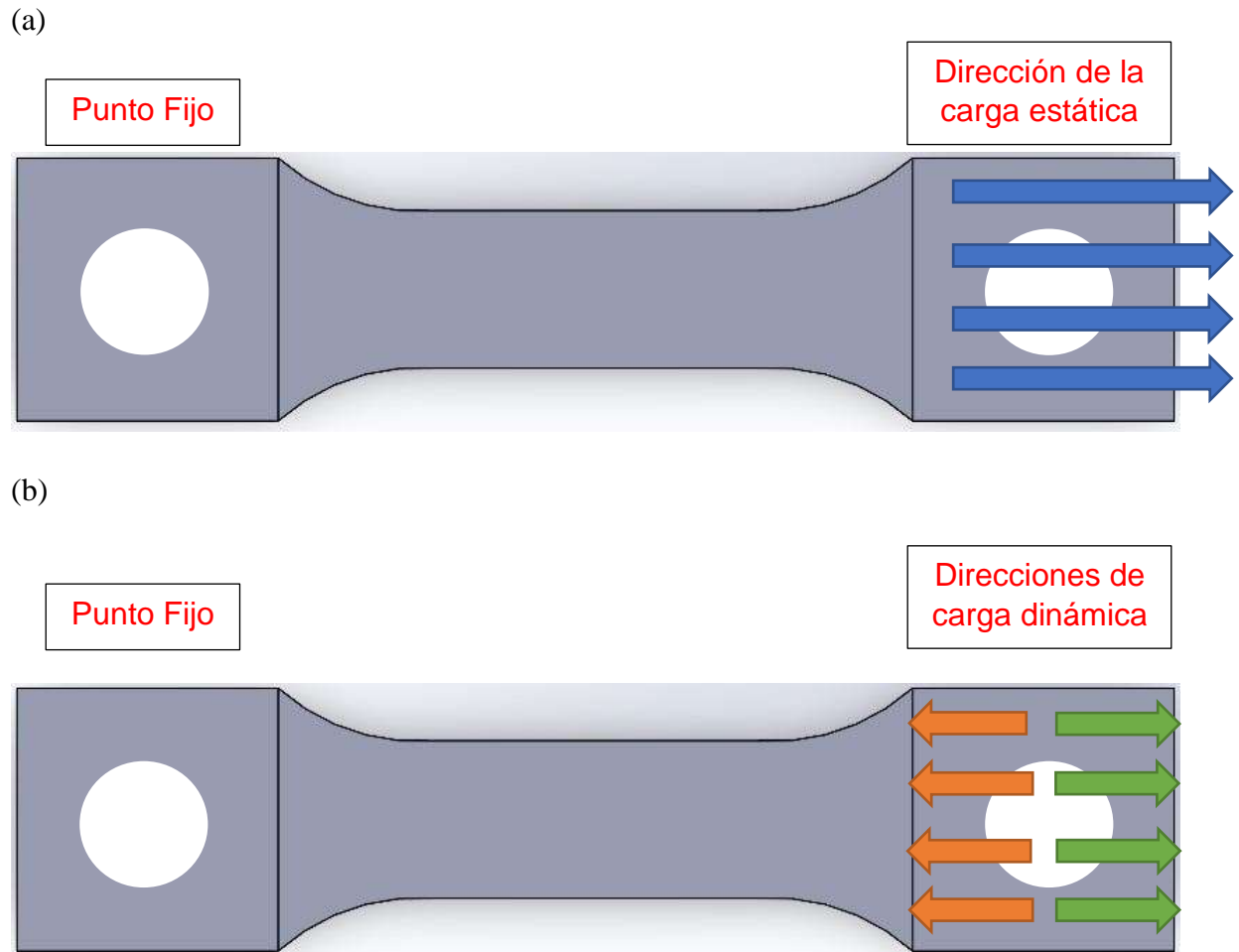
$$S = A \cdot (N_f)^b \quad (1)$$

A y b son constantes del material que se pueden determinar ejecutando una serie de experimentos de fatiga estándar. Con el fin de estudiar el comportamiento a la fatiga se diseñaron especímenes lisos y con entalles. Los ensayos de fatiga se realizaron con los parámetros iniciales de relación tensión $R = 0,1$. Cinco tipos de muescas en “U” con diferentes radios se ensayaron y

se compararon los datos obtenidos por cada uno, la dirección de carga es paralela a la dirección de la longitud de la probeta, ver en la Figura 2.

Figura 2

(a) Dirección de carga ensayos estáticos (b) Dirección de carga ensayos dinámicos.



Los parámetros para hallar los valores de resistencia a la tracción, geometría del espécimen y radio de muesca se determinaron de acuerdo con investigaciones estudiadas anteriormente (Yang et al. , 2012) (Ezeh & Susmel, 2020) (Kenedi, 2017) ya que los métodos tradicionales no capturan las tensiones tan complejas debido a la discontinuidad de la geometría. Por lo tanto, se deben

desarrollar modelos de vida más sofisticados para considerar el efecto de muesca (Weighardt et al. , 1995). Los parámetros utilizados para los especímenes en los ensayos de tracción y fatiga se muestran en la Tabla 1 . Las especificaciones geométricas se muestran en la

Figura 3 y el espesor de todos los especímenes es de 3 mm.

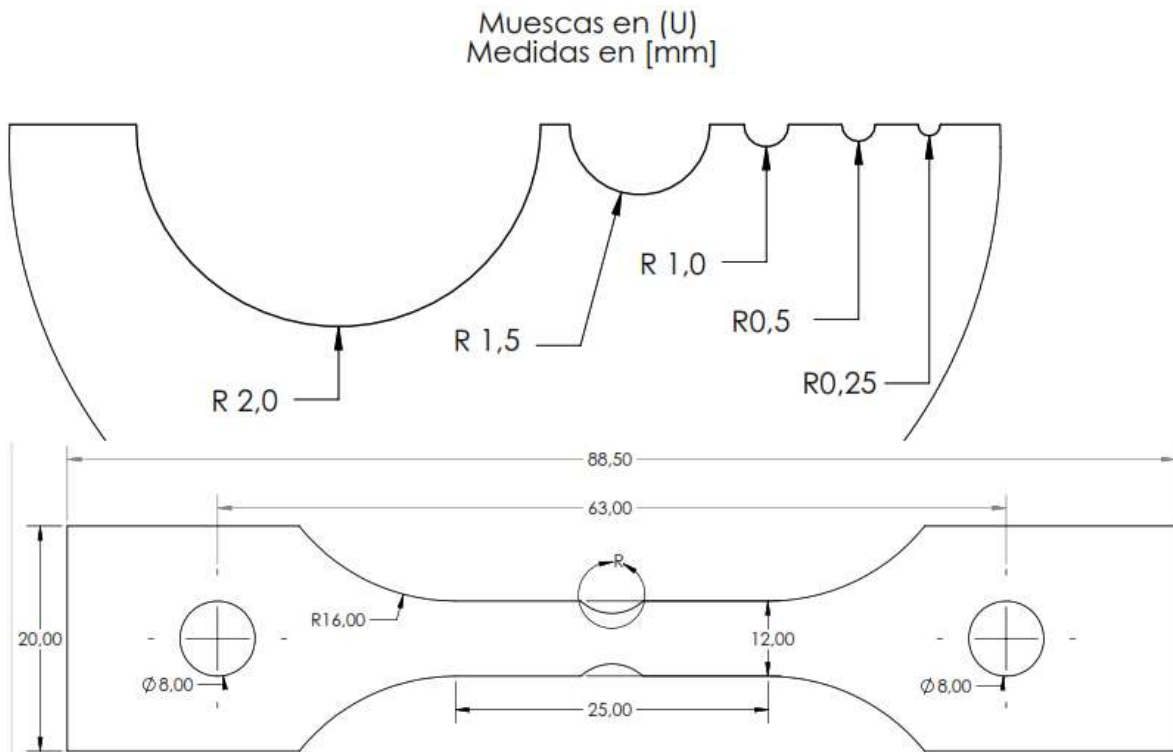
Tabla 1

Parámetros ensayos de tracción.

Parámetros de ensayo de tracción		Parámetros de ensayo de fatiga	
Distancia entre mordazas	25 [mm]	Distancia entre mordazas	25 [mm]
Velocidad de prueba	5 [mm/min]	Frecuencia	5 Hz

Figura 3

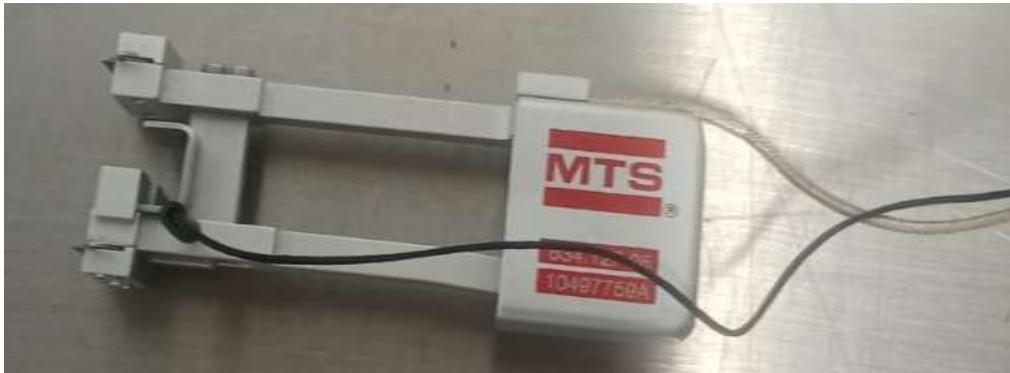
Geometría y medidas en (mm) de los especímenes.



La deformación longitudinal para las pruebas de tracción fue medida por el extensómetro MTS 634.12F-25 mostrado en la Figura 4. Un ejemplo de la muestra sin muesca del material ONYX se muestra en la Figura 5. Finalmente, los ensayos de tracción se realizaron a una velocidad de deformación de 5 mm/min. La máquina usada en los ensayos de tracción como de fatiga MTS Bionix model 370.02 ubicada en la escuela de ingeniería mecánica con una celda de carga máxima de 25 KN, ver Figura 6.

Figura 4

Extensómetro MTS 634.12F-25.

**Figura 5**

Impresión 3D Onyx sin muesca.



Figura 6

Máquina MTS Bionix model 370.02.



Se determinaron las propiedades mecánicas del termoplástico ONYX en ensayos bajo carga estática y dinámica. Se tomaron cinco muestras sin muesca con el objetivo es estimar la curva (S-N) para los especímenes. Luego de analizar y desarrollar los resultados para las muestras sin muescas se procedió a ensayar los especímenes con muescas mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2

Especímenes con muescas.

Especímenes con muescas		
Radio de muesca [mm]	Muesca en "U" número	Número de especímenes
0.25	1	2
0.50	2	3
1.0	3	3
1.5	4	3
2.0	5	3

Se realizó una evaluación fractográfica para analizar la superficie de falla del compuesto, así como los mecanismos de falla bajo condiciones de carga de tracción y fatiga. Para esto se utilizó un microscopio electrónico de barrido, ver Figura 7.

Figura 7

Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650.



4. Resultados y análisis

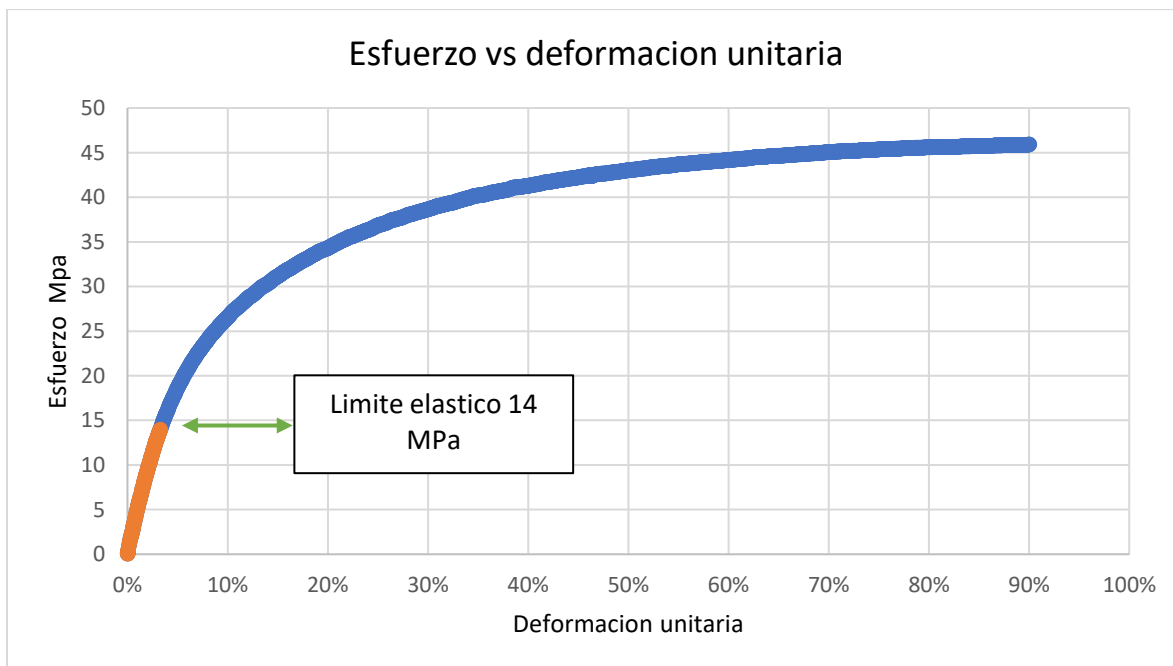
Los resultados de los ensayos hechos en el laboratorio se muestran a continuación:

4.1 Ensayos de tracción Onyx

Los ensayos de tracción se realizaron bajo las condiciones mostradas en la Tabla 1. Una vez concluidos los ensayos de tracción se procesaron los datos tomados para determinar las propiedades mecánicas necesarias. La Figura 8 muestra la curva de Esfuerzo vs Deformación unitaria también los resultados del esfuerzo último (S_{ut}) del material aproximadamente de 46 MPa y el límite elástico del material.

Figura 8

Diagrama de Esfuerzo vs Deformación unitaria Onyx.

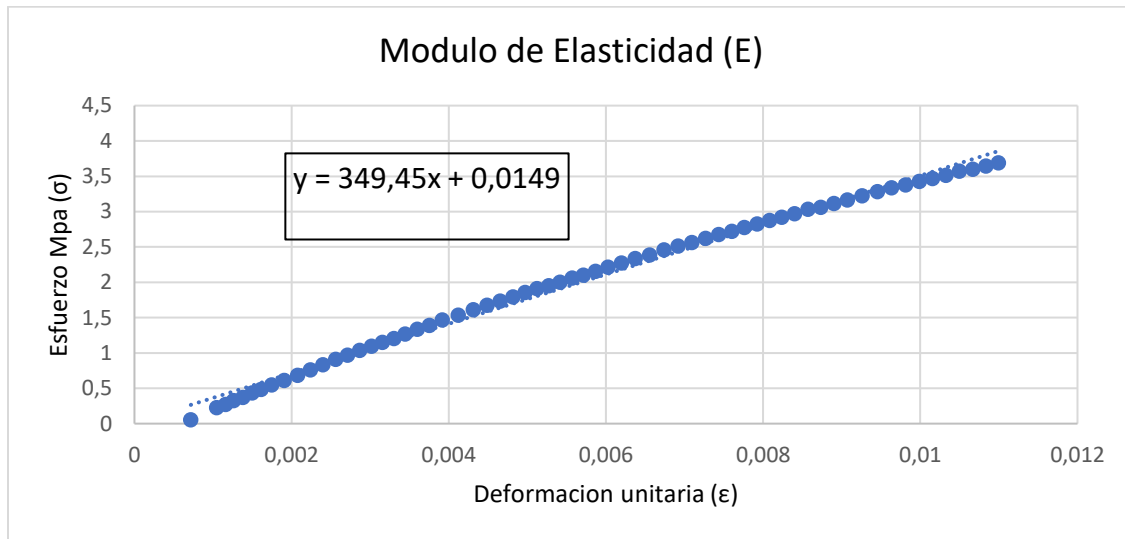


La deformación longitudinal máxima para estos ensayos es de 22.4 mm. El valor del esfuerzo de fluencia S_y 14 MPa y el módulo de elasticidad (E) del material termoplástico Onyx

349.5 MPa se muestra en la Figura 8. La Figura 9 muestra la pendiente elástica del material en la zona lineal de la gráfica. Estos datos fueron determinados con el extensómetro MTS 634.12F-25 mostrado en la Figura 4.

Figura 9

Módulo de elasticidad Onyx.



4.2 Ensayos de fatiga Onyx sin muesca

Esta sección de ensayos es un poco diferente debido al tipo de carga aplicada al espécimen, estas ocasionan tensiones fluctuantes y toman una forma sinusoidal con el paso del tiempo. Se determina la deformación para predecir la vida del material Onyx en la prueba de fatiga uniaxial bajo las condiciones encontradas.

Al comenzar los ensayos de fatiga uniaxial se decidió estudiar la probeta a una condición inicial de 85% S_y optando por un método más conservador (Saleh, et al. , 2017), (Pertuz et al. , 2022). Para determinar el desplazamiento del espécimen 1 Onyx sin muesca se recurrió a la Eq. (2). Los parámetros de entrada para las muestras de Onyx están mostrados en la Tabla 3.

$$\delta = \frac{L * \%P_{sy}}{A * E} \quad (2)$$

Tabla 3

Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx.

Especimen N°1 sin muesca	
Frecuencia	5 Hz
S_y	14 MPa
L	25 mm
Área	36 mm ²
Deformación Máxima (δ_{Max})	0.85 mm
Deformación Mínima (δ_{Min})	0.085 mm

El objetivo principal con los datos iniciales es predecir el número de ciclos al cual el espécimen sin muesca llegue a fracturarse con una deformación constante. Los datos finales del ensayo para el espécimen 1 sin muesca son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos finales del ensayo para el espécimen 1 sin muesca.

Muestra sin entalle N°1	
Numero de ciclos alcanzados	1'181.865
P_{max} [N]	214.7
d_{Max} [mm]	0.85
d_{min} [mm]	0.085
S_{max} [MPa]	6.0

Este espécimen no presentó fractura luego de 1'181.865. Al examinar la probeta se pudo constatar que esta tuvo un alargamiento longitudinal paralelo a la dirección de la carga de 4 mm

aproximadamente confrontándola con un espécimen sin ensayar Figura 10 y esto se ve también reflejado en el grosor del espécimen comparada con una probeta sin carga inicial Figura 11. A medida que transcurre el ensayo existe una relajación de tensiones como lo reportado por (Maurer et al. , 2022).

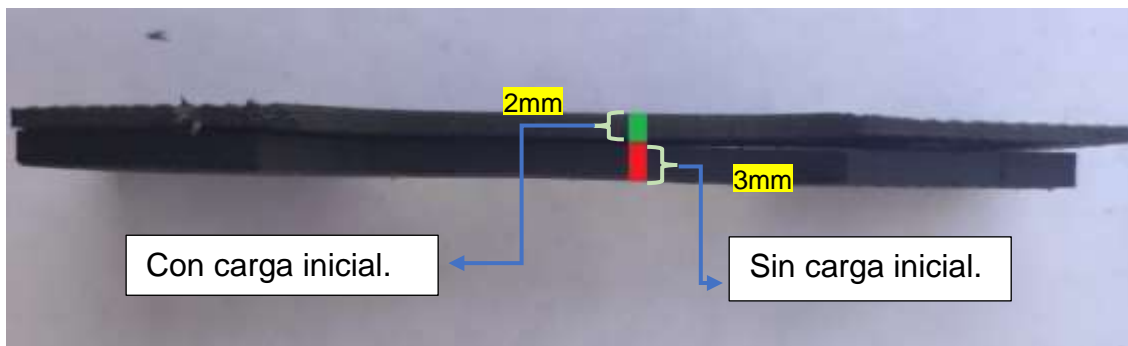
Figura 10

Alargamiento longitudinal del espécimen luego de la prueba de fatiga uniaxial.



Figura 11

Variación del grosor del espécimen a 1'181.865.



Con en el desplazamiento anterior no se consigue generar grietas y se decide trabajar con porcentajes del esfuerzo máximo comenzando con el 75%. Con la Eq. (2) se encuentran los datos de entrada para el nuevo ensayo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 2.

Especimen N°2 sin muesca	
Frecuencia	5 Hz
Sut 75%	35 MPa
L	25 mm
Área	36 mm ²
Deformación Máxima (δ Max)	2.4 mm
Deformación Mínima (δ Min)	0.24 mm

Los resultados del ensayo sin muesca N°2 se muestran en la Tabla 6, no se presentó fractura alguna, dada esta observación se decide ensayar con un nuevo espécimen sin muesca.

Tabla 6

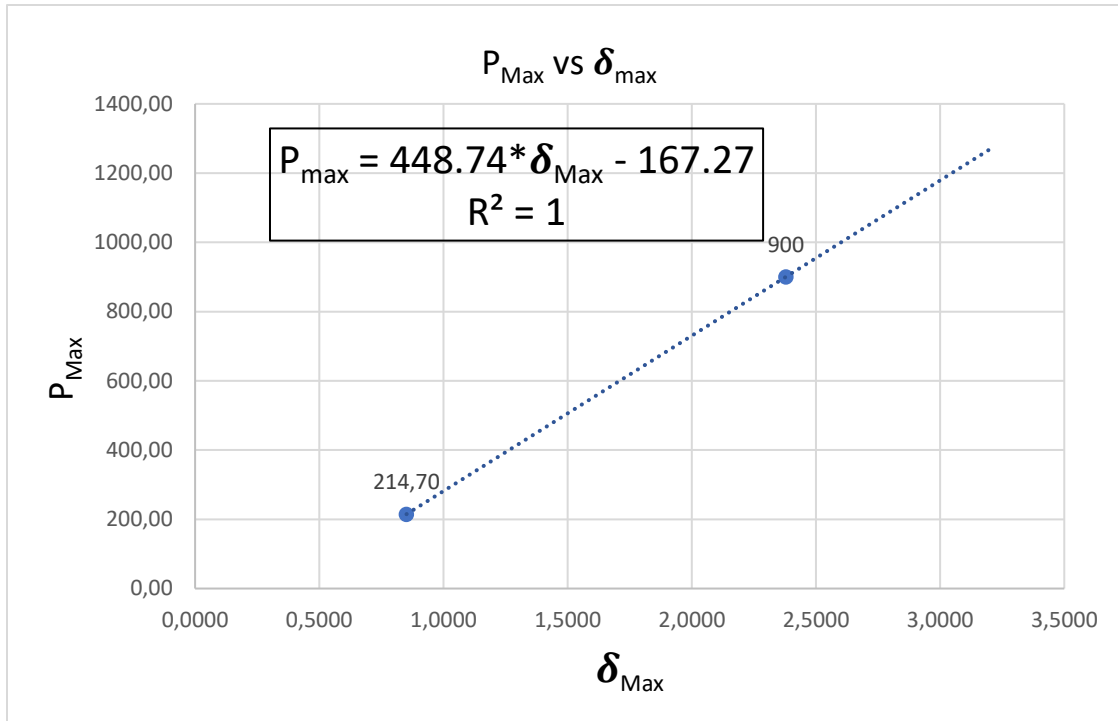
Datos finales del ensayo para el espécimen 2 sin muesca.

Muestra sin entalle N°2	
Numero de ciclos alcanzados	80.000
P_{max} [N]	900
δ_{Max} [mm]	2.4
d_{min} [mm]	0.24
S_{max} [MPa]	25

Con el objetivo de estimar el nuevo desplazamiento para la muestra sin entalla número 3 se relacionan las variables de fuerza máxima arrojada por la maquina MTS Bionix y la deformación máxima. Se construyó el modelo para pronosticar el esfuerzo máximo al cual llegaría el espécimen, ver Figura 12. Esta curva con tendencia lineal tiene la finalidad de predecir cuanto desplazamiento necesito aplicar hasta llegar a un esfuerzo que proporcione la fractura del material.

Figura 12

Modelo lineal para predecir la fuerza máxima.



Como prueba se escoge 3.2 mm de deformación y resolviendo la Eq. (3) se calcula la fuerza máxima para esa deformación.

$$P_{max} = 448.74 * \delta_{max} - 167.27 \tag{3}$$

Bajo estas condiciones de desplazamiento el esfuerzo es igual a 35.24 MPa y P_{max} 1268.7 N, se decide ensayar con estos datos iniciales para la muestra sin entalle número 3, ver Tabla 7.

Tabla 7

Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 3.

Especimen N°3 sin muesca	
Frecuencia	5 Hz
L	25 mm

Especimen N°3 sin muesca	
Área	36 mm ²
Deformación Máxima (δ_{Max})	3.2 mm
Deformación Mínima (δ_{Min})	0.32 mm

Después de realizada la prueba con los parámetros mencionados anteriormente se obtienen los siguientes resultados, ver Tabla 8.

Tabla 8

Datos finales del ensayo para el espécimen 3 sin muesca.

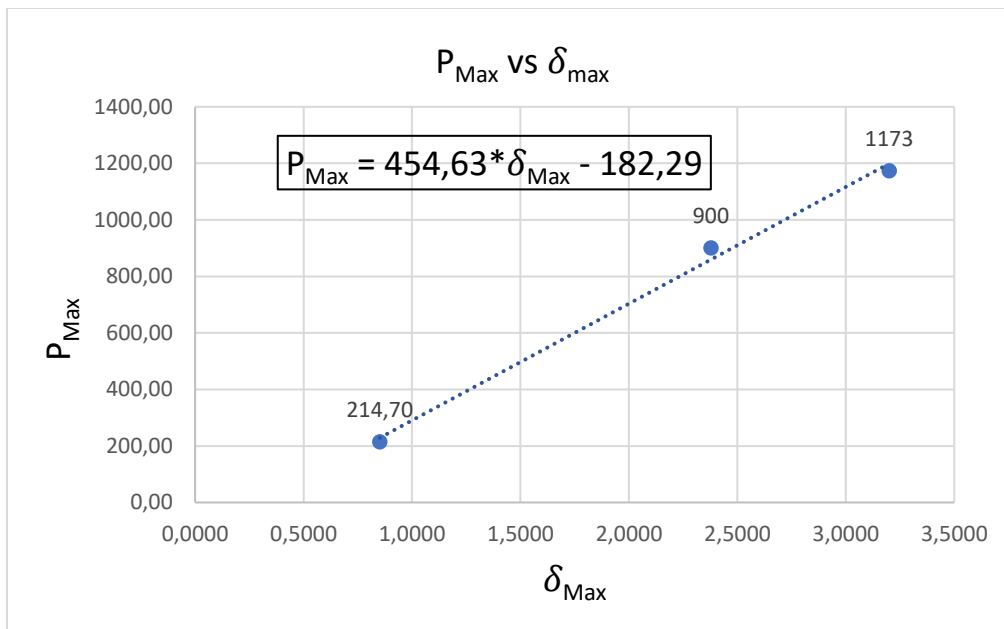
Muestra sin entalle N°3	
Número aproximado de ciclos alcanzados hasta la grieta	66.461
Numero de ciclos alcanzados hasta la rotura total	80.000
S_{max} experimental	33 MPa
P_{max} experimental	1173 N

Los resultados esperados fueron muy buenos ahora se toman estos datos y se actualiza el modelo lineal, ver Figura 13 y se extrae la Eq. (4).

$$P_{Max} = 454,63 * \delta_{Max} - 182,29 \quad (4)$$

Figura 13

Modelo lineal actualizado para predecir la fuerza máxima.



Los datos iniciales para el ensayo número 4 de la muestra lisa se muestran en la Tabla 9. Recalculando con Eq. (4) tenemos las nuevas condiciones a una deformación de 3.6 mm. La predicción da como resultado S_{max} 40.40 Mpa y P_{max} 1454.4 N.

Tabla 9

Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 4.

Especimen N°4 sin muesca	
Frecuencia	5 Hz
L	25 mm
Área	36 mm ²
Deformación Máxima (δ_{Max})	3.6 mm
Deformación Mínima (δ_{Min})	0.36 mm

Después de realizada la prueba con los parámetros mencionados anteriormente se obtienen los siguientes resultados, ver Tabla 10.

Tabla 10

Datos finales del ensayo para el espécimen 4 sin muesca.

Muestra sin entalle N°4	
Número aproximado de ciclos alcanzados hasta la grieta	30.145
Numero de ciclos alcanzados hasta la rotura total	46.700
S_{max}	35 [MPa]
P_{max}	1246 [N]

Se ensayará una nueva muestra a una mayor deformación, los datos iniciales son mostrados en la Tabla 11. La nueva deformación inicial da como predicción S_{max} 47.48 MPa y P_{max} 1727.2 N de acuerdo con Eq. (4).

Tabla 11

Parámetros para la prueba de fatiga uniaxial Onyx sin muesca 5.

Espécimen N°5 sin muesca	
Frecuencia	5 Hz
L	25 mm
Área	36 mm ²
Deformación Máxima (δ_{Max})	4.2 mm
Deformación Mínima (δ_{Min})	0.42 mm

Después de realizada la prueba con los parámetros mencionados anteriormente se obtienen los siguientes resultados, ver Tabla 12.

Tabla 12

Datos finales del ensayo para el espécimen 5 sin muesca.

Muestra sin entalle N°5	
Número aproximado de ciclos alcanzados hasta la grieta	17000
Numero de ciclos alcanzados hasta la rotura total	30000
S_{max}	40 [MPa]
P_{max}	1456 [N]

Con los parámetros iniciales para la muestra N°5 sin muesca se obtuvo un número aproximado de ciclos hasta que llega la grieta mostrada en la Figura 14 y Figura 15 con zoom.

Figura 14

Grieta de la muestra lisa número 5.

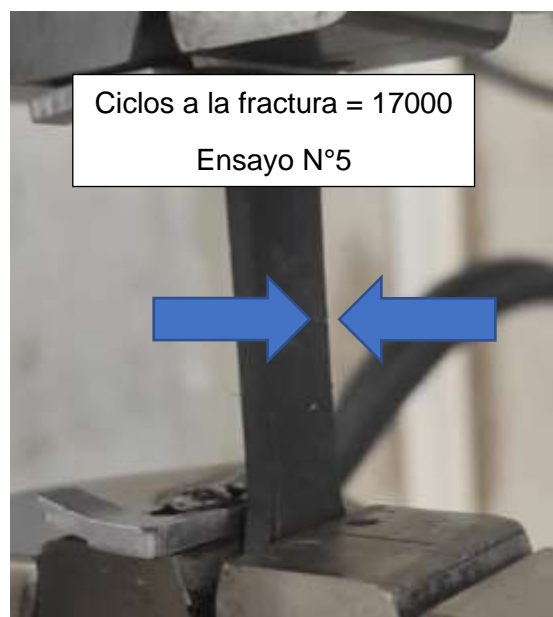
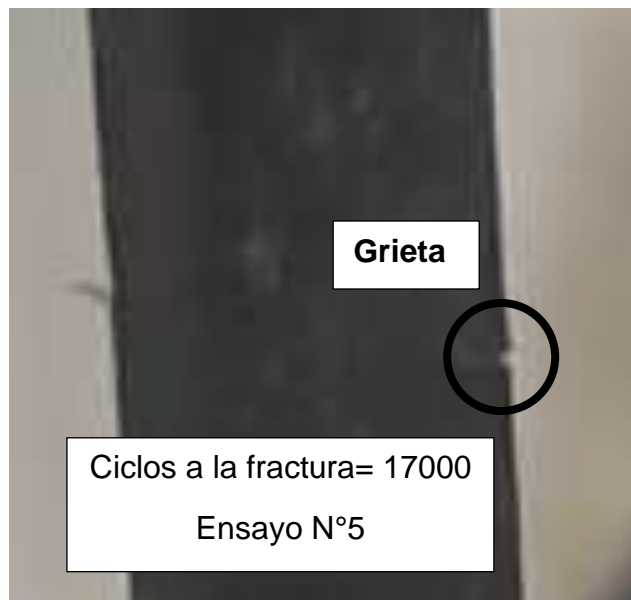


Figura 15

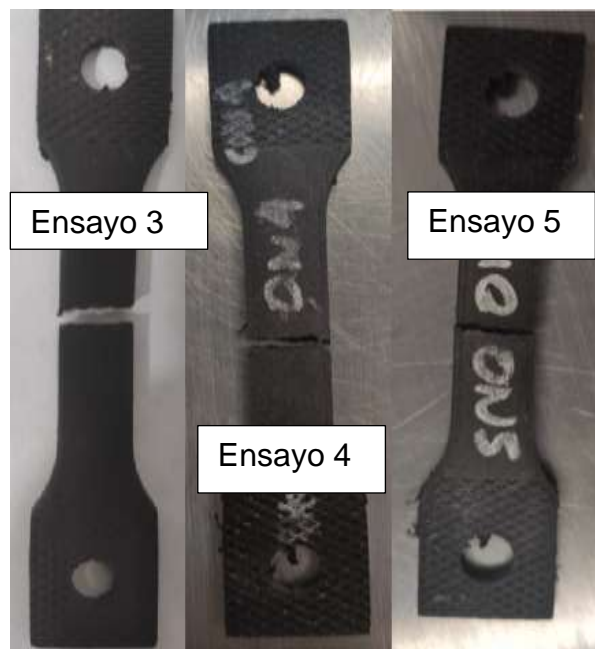
Zoom grieta de la muestra lisa número 5.



En la Figura 16 se muestra la ruptura total de los especímenes sin muesca. Dada la rotura del material se puede deducir la fragilidad de este por la forma de fallo.

Figura 16

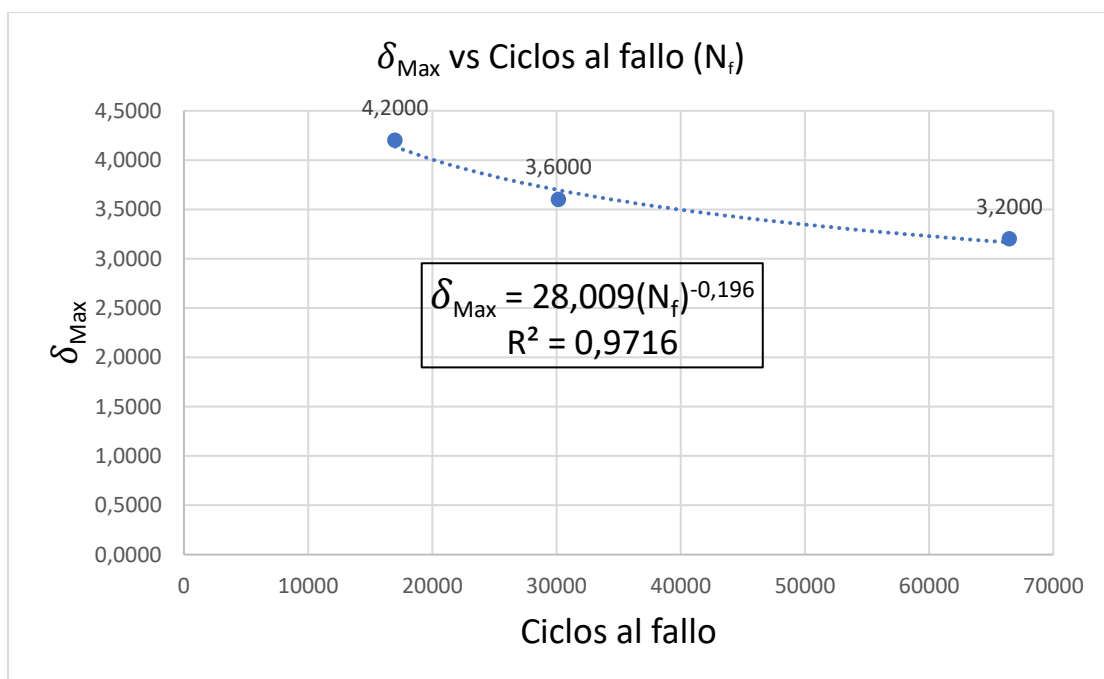
Resultados de los ensayos número 3,4,5 sin muesca.



Se relacionaron dos variables experimentales importantes en la investigación, la deformación máxima y el número de ciclos a la falla y obtener un modelo matemático que estime la máxima deformación a determinado número de ciclos a la falla Figura 17.

Figura 17

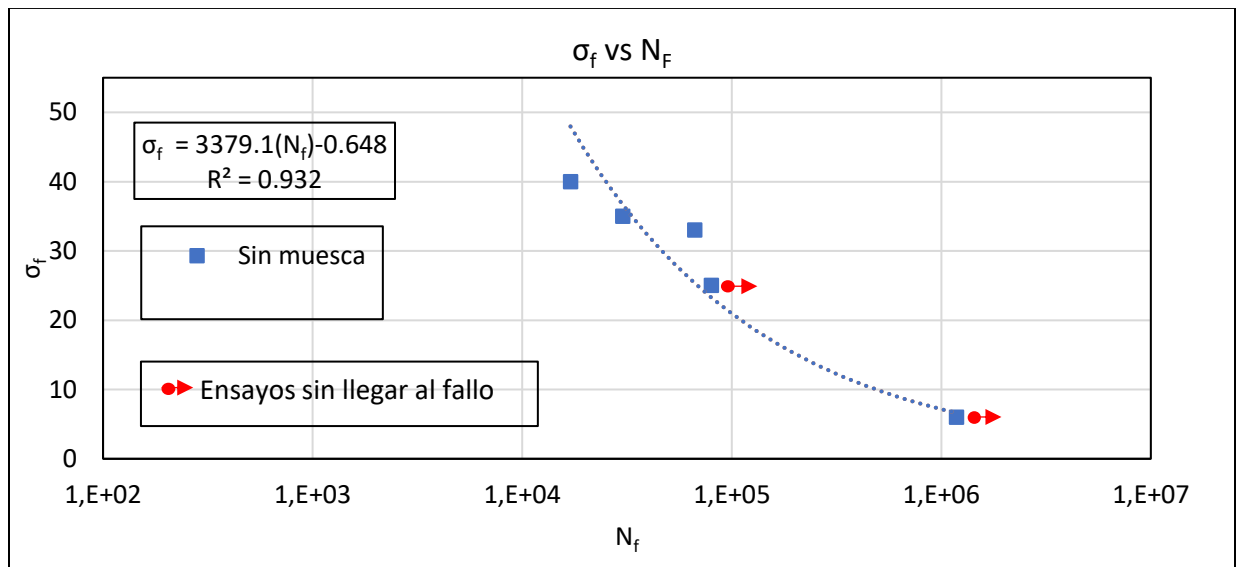
Modelo matemático que predice la máxima deformación a determinado número de ciclos a la falla.



Se construye la curva S-N para el material estudiado sin muesca experimentalmente y se ajustan los datos con el modelo propuesto por Basquin Eq. (1) mostrado en la Figura 18.

Figura 18

Curva S-N experimental Onyx sin muesca y ajustada con el modelo de Basquin.



4.3 Ensayos de fatiga Onyx con muescas

El tipo de muescas que se va a estudiar son entalles en “U” las configuraciones de cada radio se muestra en la Tabla 13 y Figura 19. Para la muesca de radio 0.25 mm se imprimieron solo 2 especímenes debido a que el equipo de impresión 3D tenía fallas.

Tabla 13

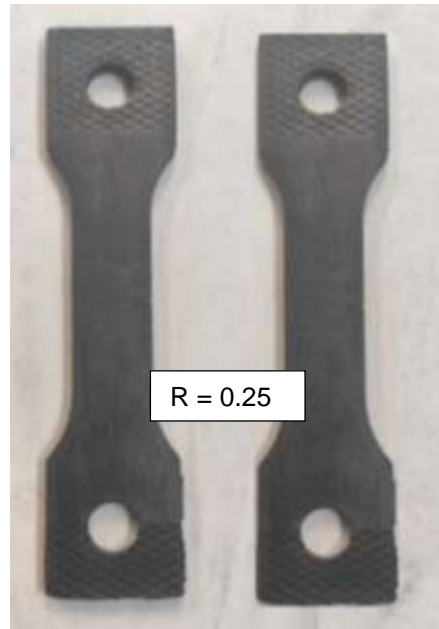
Tamaños de muescas a investigar.

Especímenes con muescas “U”		
Radio de muesca [mm]	Muesca en “U” número	Número de especímenes
0.25	1	2
0.5	2	3
1	3	3
1.5	4	3
2	5	3

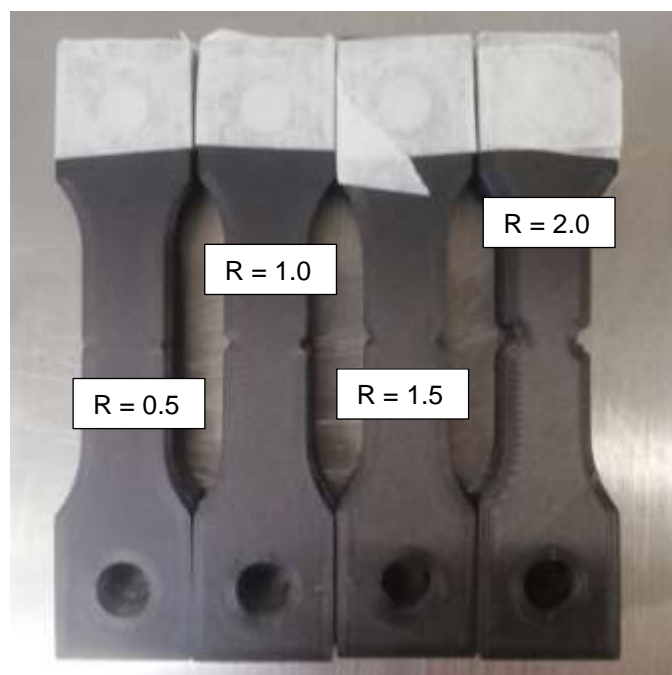
Figura 19

Muestras a investigar: (a) Muestras $r = 0.25$ mm (b) Muestras $r = 0.5$ mm, 1 mm, 1.5 mm y 2 mm.

(a)



(b)



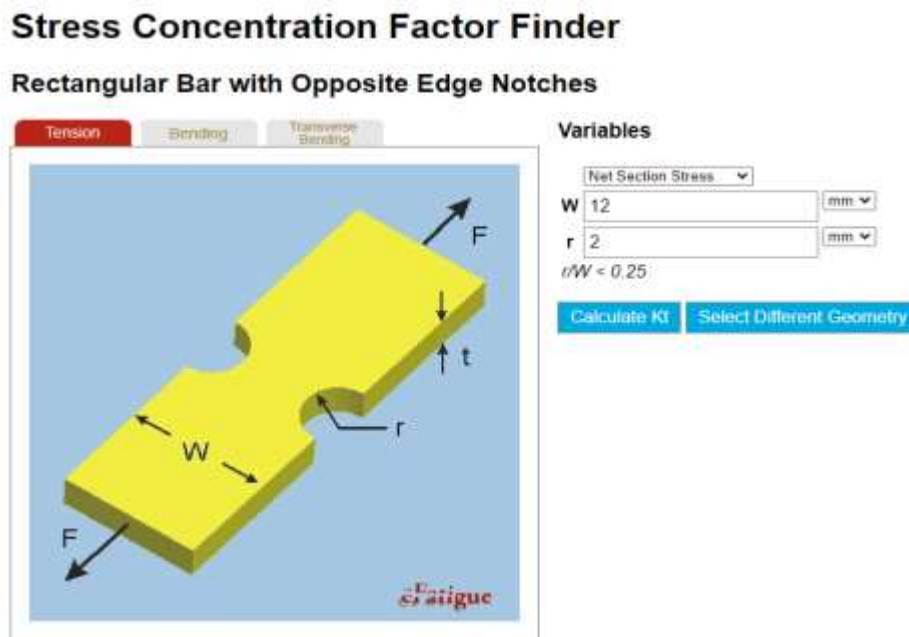
Cuando el espécimen presenta irregularidades la sección transversal disminuye lo que produce una concentración de esfuerzos en la zona donde se encuentra ubicada la muesca. Para el objeto en estudio se emplea un factor K_t que relaciona el esfuerzo máximo en la discontinuidad con el esfuerzo nominal Eq. (5). Este es un factor de concentración de esfuerzos geométrico ya que depende del tipo y geometría de la discontinuidad. Es decir, que no tiene efecto en el valor de K_t las propiedades del material que se hayan utilizado (Budynas & Nisbett, 2008).

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{nominal}}} \quad (5)$$

Con una calculadora de fatiga se puede rápidamente encontrar el factor de concentración de tensión (Socie, s.f.). Se selecciona el tipo de muesca, espécimen y se colocan los datos iniciales para cada configuración de entalle, se tomó el valor de 2mm, ver Figura 20. El resultado del cálculo del concentrador de esfuerzos para la muesca N°5 se muestra en la Figura 21.

Figura 20

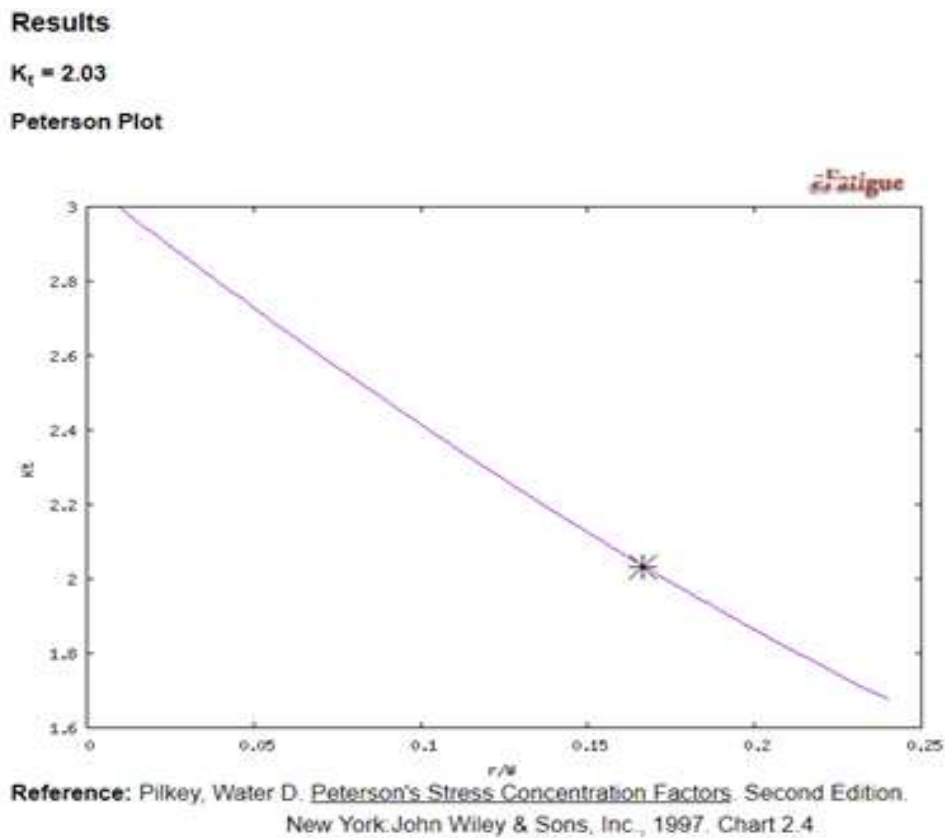
Cálculo de K_t para la muesca con radio de muesca 2 mm.



Nota: Socie, D. F. (s.f.). eFatiga. Obtenido de: <https://efatigue-dev.altair.medias.com/constantamplitude/stressconcentration/#a>

Figura 21

Resultado K_t cálculo muesca N°5



Nota: Socie, D. F. (s.f.). eFatiga. Obtenido de: <https://efatigue-dev.altair.meddiag.com/constantamplitude/stressconcentration/#a>.

Se realiza el cálculo del K_t para cada muesca como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14

Concentrador de esfuerzos para cada tamaño de muesca.

K_t	Muecas radio [mm]	N° de muestra
2.03	2	5
2.27	1.5	4
2.52	1	3
2.78	0.5	2
2.92	0.25	1

Luego de calcular el concentrador de esfuerzos para cada muesca se quiere predecir el número de ciclos a la falla para cada entalle. Para calcular este dato partimos de los datos obtenidos de la curva S-N. Estos resultados son ajustados por la ecuación de Basquin Eq. (6).

$$\sigma_{f-sin\ muesca} = 3379.1 \cdot (N_f)^{-0.648} \quad (6)$$

Con la Eq. (6) el esfuerzo nominal está en función de los ciclos a la falla para una muestra sin muesca. Se escoge el valor de N_f 5000 para comparar los datos, da como resultado un esfuerzo nominal de 13.5 MPa, ver Tabla 15.

Tabla 15

Estimación de esfuerzo para el numero de ciclos a la falla.

N_f	$\sigma_{f-sin\ muesca}$ [MPa]
5000	13.5

Con el fin de predecir la deformación para cada muesca se relacionan los valores de esfuerzo nominal y K_t para hallar el esfuerzo máximo en cada muesca mostrada en la Eq. (5) y calcular el desplazamiento para cada una. Según esta predicción las muescas en los ensayos de fatiga bajo estos parámetros llegarían a fallar cuando alcancen los 5000 ciclos. Los resultados para cada configuración de muesca se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16

Deformación para cada configuración muesca.

K_t	entalle (δ_{MAX}) [mm]	entalle (δ_{min}) [mm]	Muecas radio [mm]	Muesca en "U" número
2.03	1.97	0.197	2.0	5
2.27	2.20	0.220	1.5	4
2.52	2.44	0.244	1.0	3

K_t	entalle (δ_{MAX}) [mm]	entalle (δ_{min}) [mm]	Muecas radio [mm]	Muesca en "U" número
2.78	2.69	0.269	0.50	2
2.92	2.83	0.283	0.25	1

Primero se comenzó con la configuración número 5. El objetivo principal es contar el número de ciclos hasta la falla bajo las condiciones indicadas, ver Tabla 17.

Tabla 17

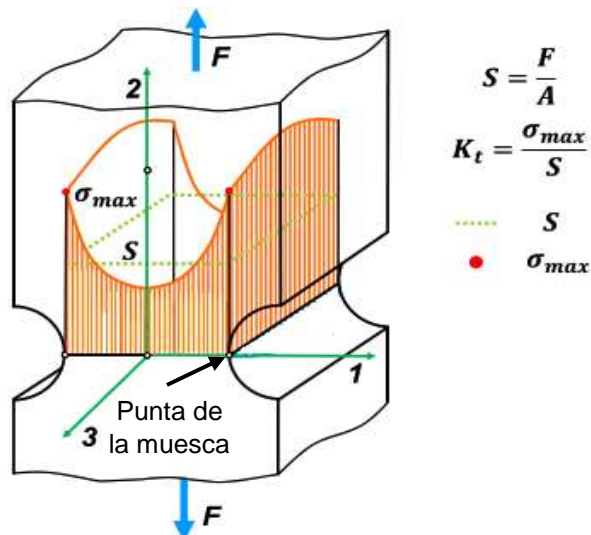
Condiciones para la muesca N°5.

kt	Entalle (δ_{MAX}) [mm]	Entalle (δ_{min}) [mm]	Muecas radio [mm]	Muesca en "U" número
2.03	1.97	0.197	2.0	5

La Interpretación geométrica de las distribuciones de carga con muesca de tipo "U" se muestran en la Figura 22.

Figura 22

Esfuerzo máximo en la punta de la muesca "U" para un espécimen plano.

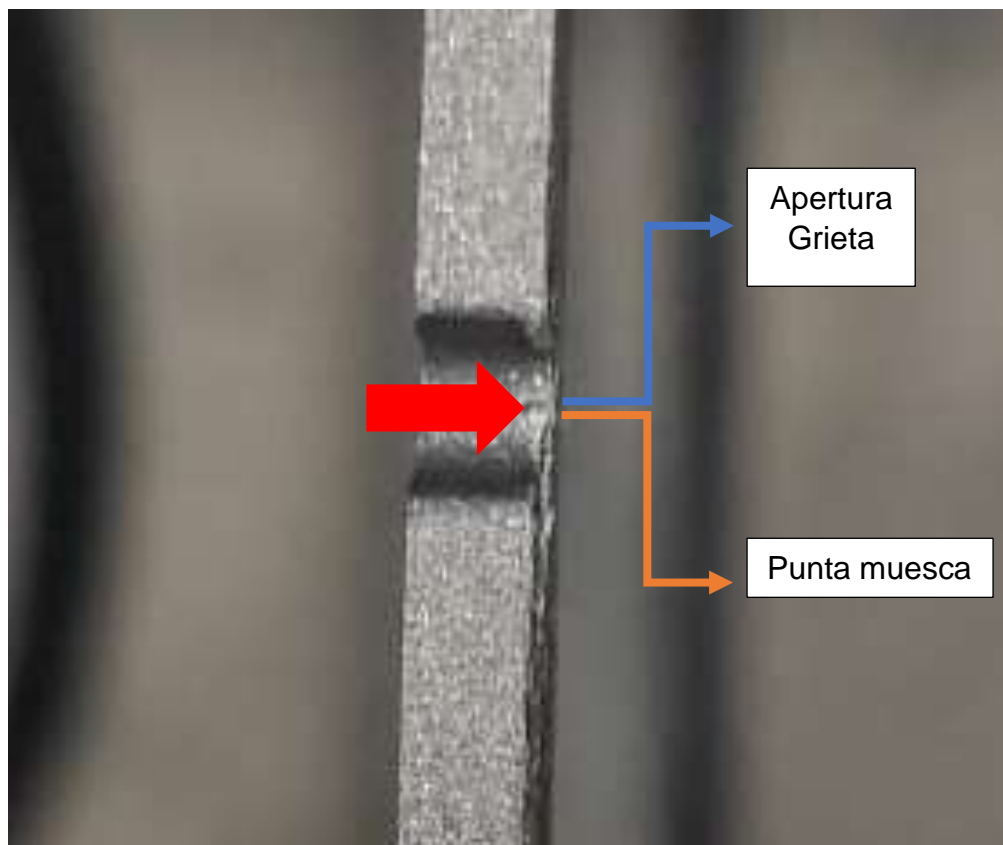


Nota: Ding Liao., S.-P. Z. (2020). Recent advances on notch effects in metal fatigue. *fatigue and fracture of engineering materials and structures*, 638.

Las grietas en los materiales siempre se inician en la punta de la muesca (Ezeh & Susmel, 2020). Se observó durante todo el periodo de prueba que la grieta arranca en la punta de la muesca como se muestra en la Figura 23 donde el valor del esfuerzo es máximo lo que significa que el material falló. ¿Se puede resolver este problema en un caso real? La respuesta es sí, existen estudios los cuales permiten retrasar la rotura total del material. La mecánica de la fractura estudia este fenómeno, pero en este caso no es de nuestro estudio.

Figura 23

Inicio de grieta en la muesca tipo "U".



La falla empieza con las rupturas microscópicas que dan con la apertura de la grieta. A medida que transcurre el tiempo la grieta iba aumentando su tamaño en la Figura 24 se puede observar el crecimiento de esta. Luego recorre toda la parte frontal como se muestra en la Figura 25 y luego se extiende por la zona lateral, ver la Figura 26.

Figura 24

Crecimiento de la grieta en una muesca tipo "U".

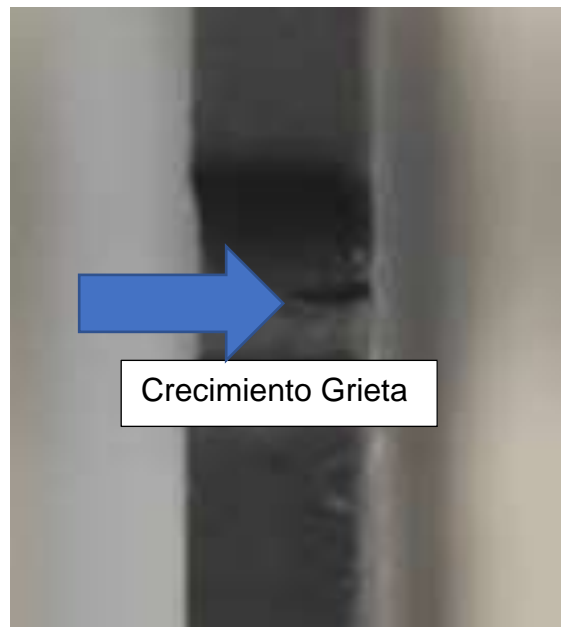


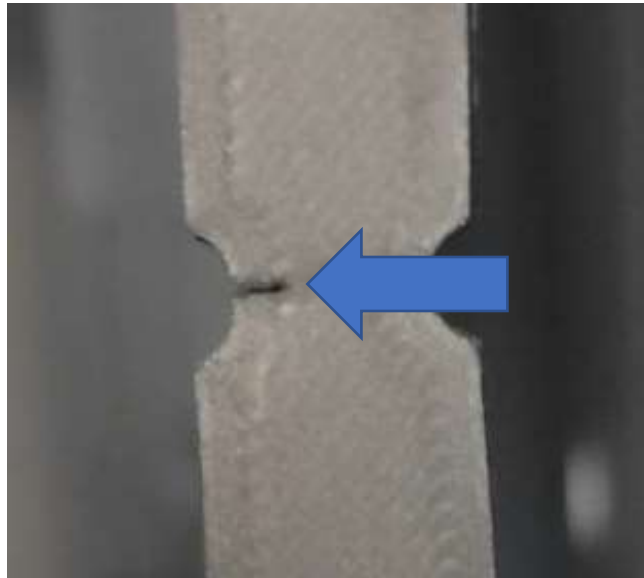
Figura 25

Grieta extendida por la parte frontal de la muesca.



Figura 26

Crecimiento de grieta en la parte lateral del espécimen.



Luego de ejecutar todos los ensayos para cada una de las muescas, se presentan en la Tabla 18 los datos y cálculos obtenidos.

Tabla 18

Datos obtenidos para las configuraciones de las muescas propuestas.

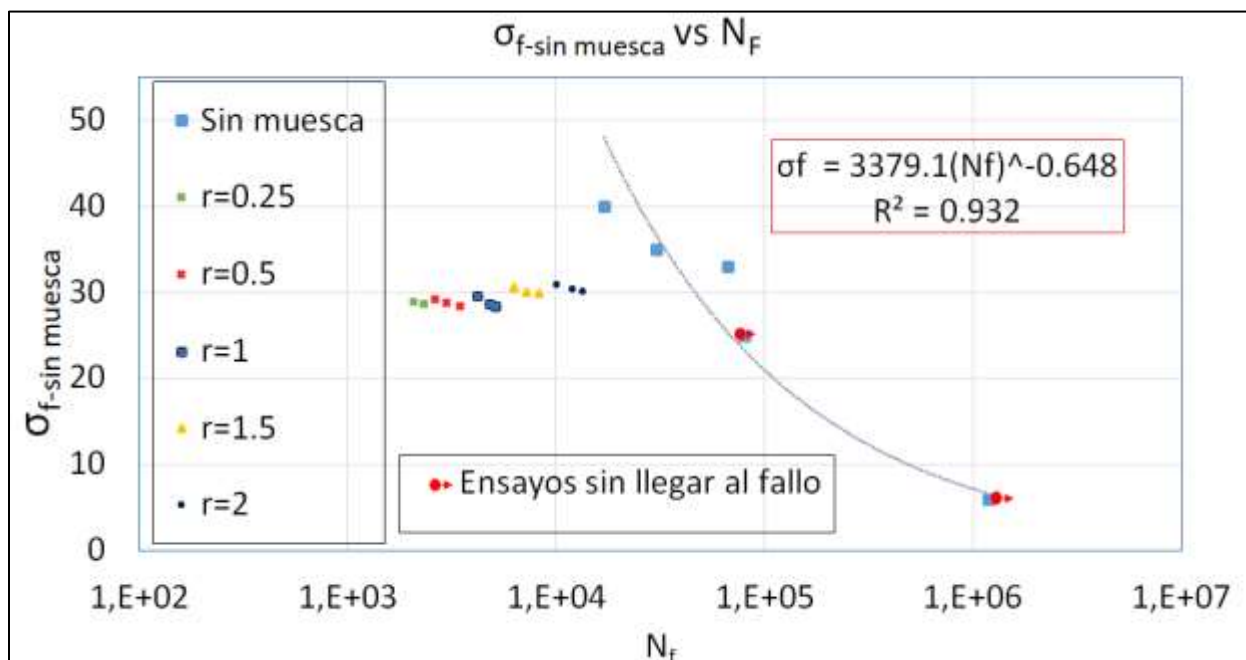
Datos y cálculos obtenidos						
Muesca en "U" número	Número de Ensayos	Radio muesca	N (ciclos) donde se estabiliza la fuerza	Nf (ciclos a la falla)	σ fallo nominal [MPa]	σ fallo con muesca [MPa]
1	1.0	0.25	2266	4914	27.56	28.75
	1.1		2000	4744	27.22	28.41
2	2.0	0.5	2889	6268	26.44	28.85
	2.1		2600	5889	26.92	29.36
	2.2		2397	5990	26.61	29.03
	3.0		3380	7490	23.72	28.47

Datos y cálculos obtenidos						
3	3.1	1.0	3627	7081	23.53	28.23
	3.2		3870	7462	24.58	29.5
4	4.0	1.5	3880	8834	22.58	30.11
	4.1		4502	9065	22.97	30.63
	4.2		4724	8967	23.69	31.59
5	5.0	2.0	5898	10098	20.61	30.92
	5.1		5447	13447	20.11	30.17
	5.2		6125	12000	20.31	30.46

Se construye la curva S-N para cada configuración de muesca mostrada en la Figura 27. Estas curvas se pueden plasmar mejor con un alto número de ensayos para cada configuración de muesca.

Figura 27

Curva S-N para cada configuración de muesca Onyx.



La presencia de irregularidades como los son las muescas aumenta considerablemente el esfuerzo en la cercanía de la discontinuidad del material (Norton, 2011). Los materiales tienen una sensibilidad a la concentración de esfuerzos llamado sensibilidad a la muesca esta sensibilidad depende de las propiedades mecánicas del material como también del tipo y medida de la muesca. Cuando se está en presencia de cargas dinámicas bajo estas condiciones aparece un factor K_f es el factor de concentración de esfuerzo por fatiga Eq. (6) (Budynas & Nisbett, 2008).

$$K_f = \frac{\text{Esfuerzo máximo en la pieza de prueba con muesca}}{\text{Esfuerzo en la pieza de prueba sin muesca}} \quad (6)$$

Peterson redefinió el procedimiento, desarrolló y expuso el concepto de sensibilidad a la muesca Eq. (7) y relaciono los dos factores mencionados anteriormente. (Peterson, 1974).

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (7)$$

Con los datos obtenidos en el laboratorio y las condiciones impuestas a los ensayos se procede a estimar el valor de K_f factor de concentración de esfuerzo por fatiga para cada muesca. Se tomó el valor promedio de los esfuerzos de cada prueba con y sin muesca para el cálculo de K_f . Los resultados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Estimación del factor de concentración de esfuerzo por fatiga.

Muesca en "U" número	σ sin muesca [MPa]	σ máx con muesca [MPa]	K_f
1	27.4	28.6	1.043
2	26.7	29.1	1.091
3	23.9	28.7	1.200
4	23.1	30.7	1.333
5	20.3	30.5	1.500

El valor de K_f siempre será menor o igual al valor de K_t (Norton, 2011). Ahora mediremos la sensibilidad de cada muesca para el material termoplástico Onyx de acuerdo con Eq. (7). Donde la sensibilidad de muesca “ q ” se encuentra en el rango entre cero y uno. Si $q = 0$, entonces, el material no tiene ninguna sensibilidad a la muesca y el valor de K_f será igual a 1. En cambio, si $q = 1$, entonces el material tiene sensibilidad total a la muesca y K_f es igual a K_t . Cuando no se conoce el parámetro de la sensibilidad a la muesca se toma el valor de $K_t = K_f$ o $q=1$. (Budynas & Nisbett, 2008). La Tabla 20 muestra la sensibilidad de muesca para cada configuración.

Tabla 20

Sensibilidad de muesca para cada configuración.

Entalle (δ_{MAX}) [mm]	Entalle (δ_{min}) [mm]	Radio [mm]	Muesca en “U” número	K_f	K_t	q
1,97	0,197	2,0	5	1,50	2,03	0,49
2,20	0,220	1,5	4	1,33	2,27	0,26
2,44	0,244	1,0	3	1,20	2,52	0,13
2,69	0,269	0,5	2	1,09	2,78	0,05
2,83	0,283	0,25	1	1,04	2,92	0,02

Al observar los resultados nos indica que existe una mayor sensibilidad al entalle cuando el radio de muesca aumenta. Se muestra (q vs r) para esta afirmación Figura 28. También se muestra la relación grafica de (K_f vs K_t) Figura 29 y (K_f vs r) Figura 30. La muesca con un valor de sensibilidad de entalla más grande fue la N°5 esto dado a que el factor de concentración a la fatiga aumento. La muestra N°1 tuvo un alto concentrador de esfuerzos, pero una muy baja sensibilidad a la muesca.

Figura 28

Sensibilidad de muesca q vs r radio de muesca.

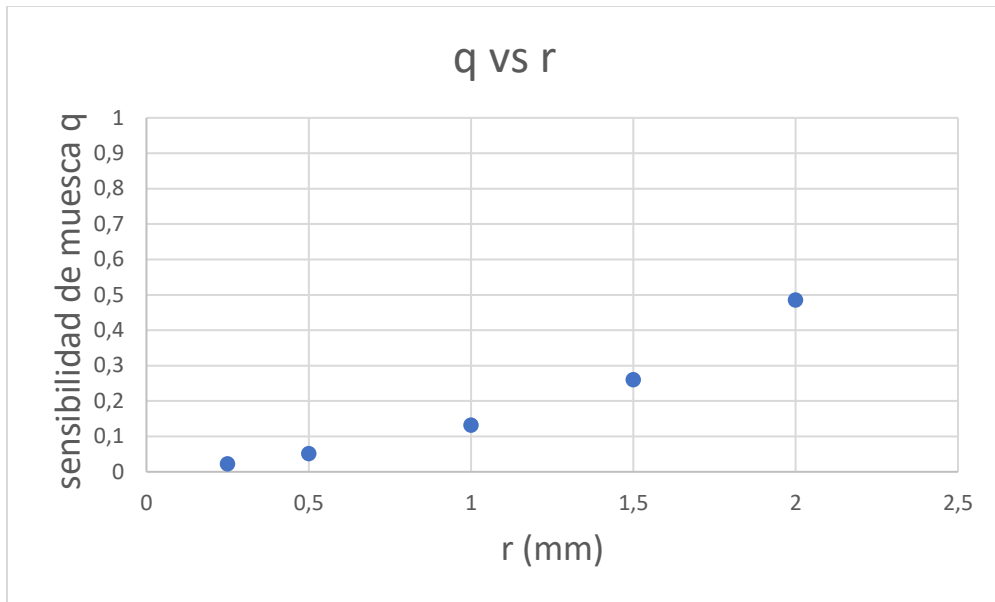


Figura 29

K_f vs K_t.

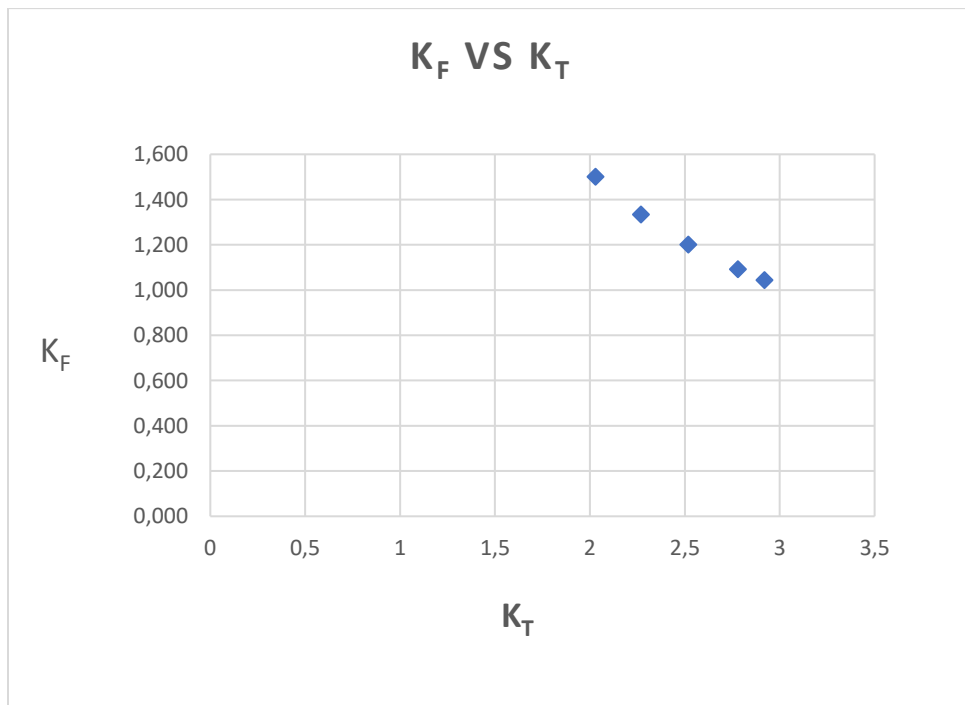
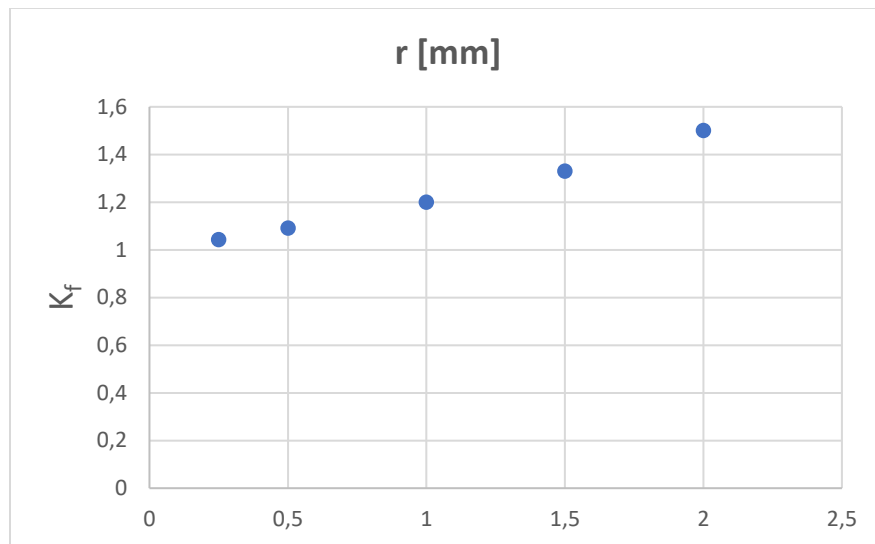


Figura 30*K_f vs r.*

4.4 Análisis fractográfico

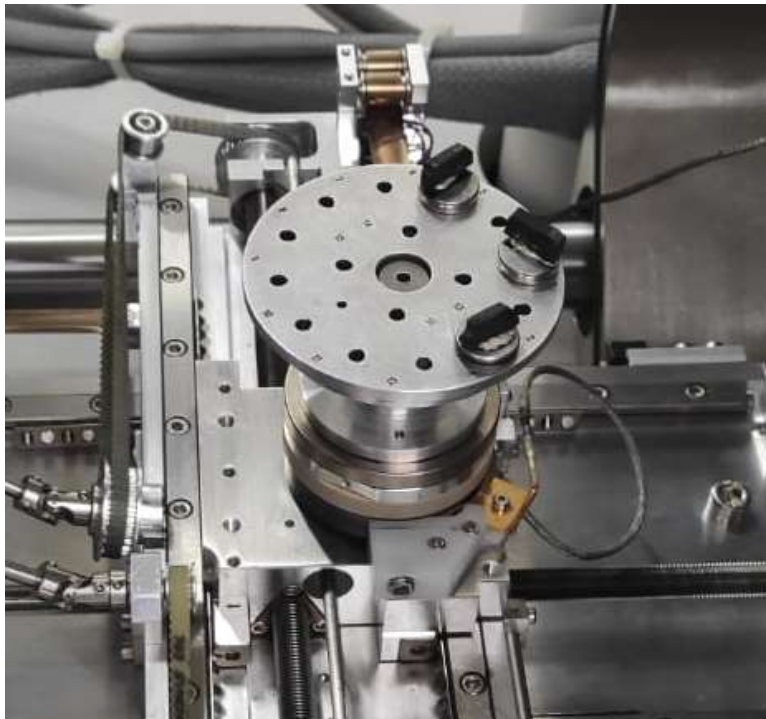
Para la realización de los ensayos se tuvieron que partir las probetas debido a que no fue necesario llevar hasta la rotura total. Se considera que el espécimen ya había fallado cuando apareció la grieta. Para terminar de fracturar la muestra se usó nitrógeno líquido que por su baja temperatura puede partir fácilmente la muestra en la Figura 31.

Figura 31*Nitrógeno líquido aplicado a los especímenes.*

El equipo usado para la microscopia Microscopio Electrónico de Barrido FEG Field Emission Gun QUANTA FEG 650 ubicada en la sede Guatiguará. Las imágenes fueron tomadas con las siguientes características: Alto vacío, voltaje de aceleración:15 y 10 kV. Detector para imágenes: Electrones secundarios SE: Everhart Thornley detector ETD, electrones retrodispersados BSE: Back scattered electrón detector BSED tipo SSD. Las muestras se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón Figura 32.

Figura 32

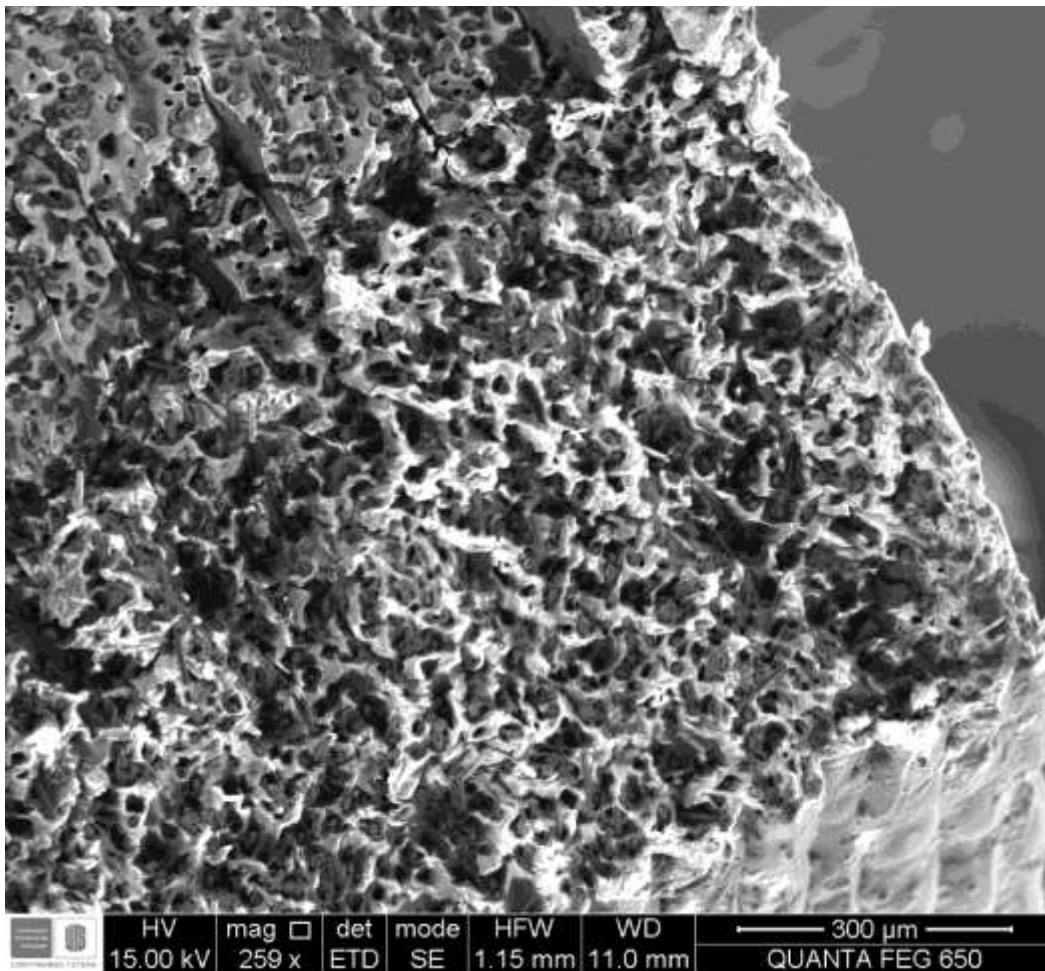
Preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido.



Los especímenes que se estudiaron fueron las muescas con radio 0.25 mm, 1.5 mm y 2 mm. Se observa en la Figura 33 que la fractura del espécimen con radio de muesca de 2 mm es una zona de muchos intersticios pasando el proceso de nucleación y llegar a la fractura de la probeta.

Figura 33

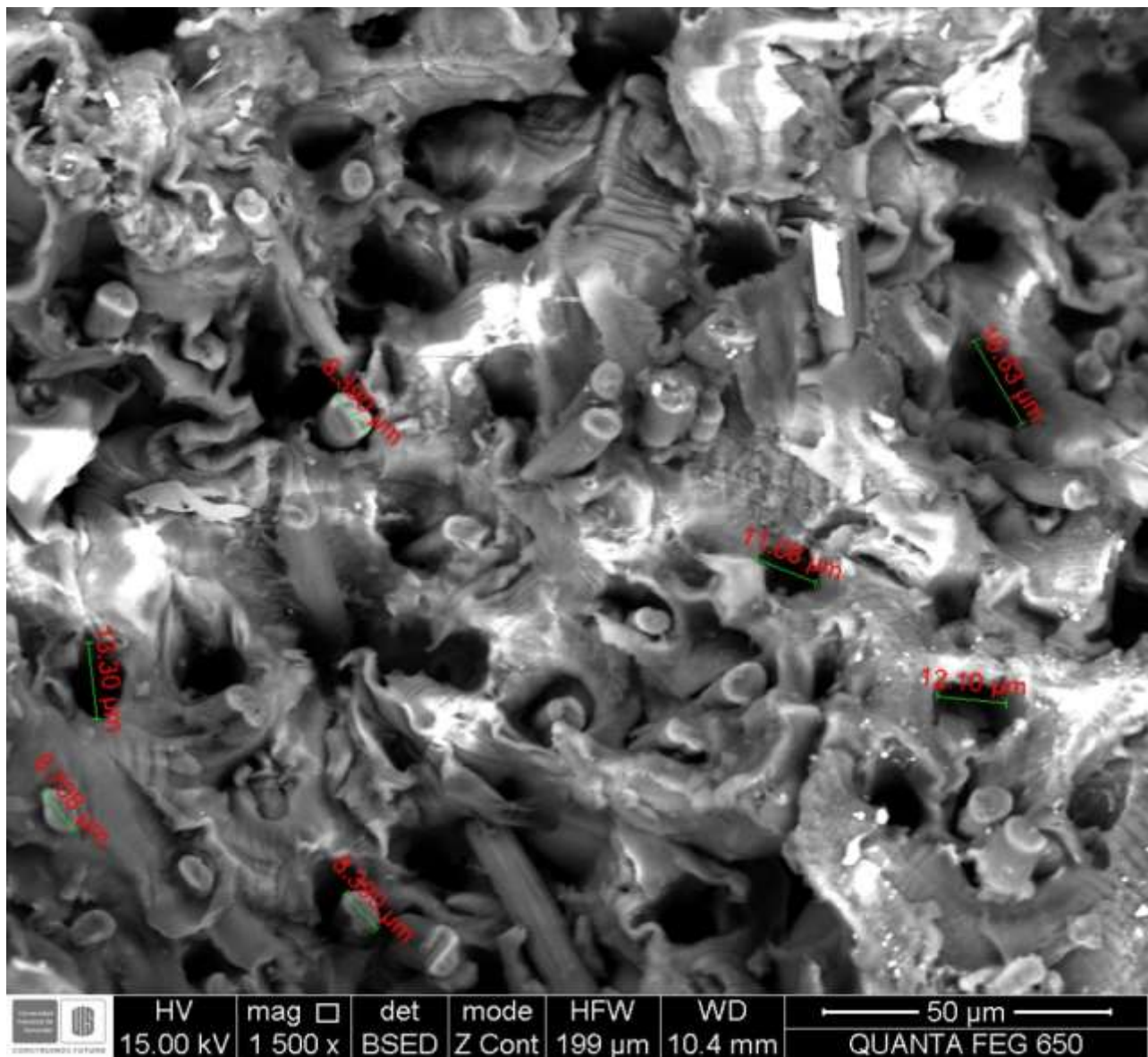
Imagen SEM para el espécimen radio de muesca 2 mm.



Ampliando la Figura 33, se puede examinar que el material Onyx es un material con una matriz de nylon y con fibras de carbono cortas. El diámetro de las fibras de carbono es aproximadamente de 8.4 micras, ver Figura 34. Estas están completamente rotas debido a la carga dinámica aplicada también se puede observar la porosidad del material impreso en 3D con diámetros aproximados a las 12 micras mostrados en la Figura 34. Esta es una desventaja para los materiales hechos con manufactura aditiva porque hace que la resistencia a la fatiga se vea afectada.

Figura 34

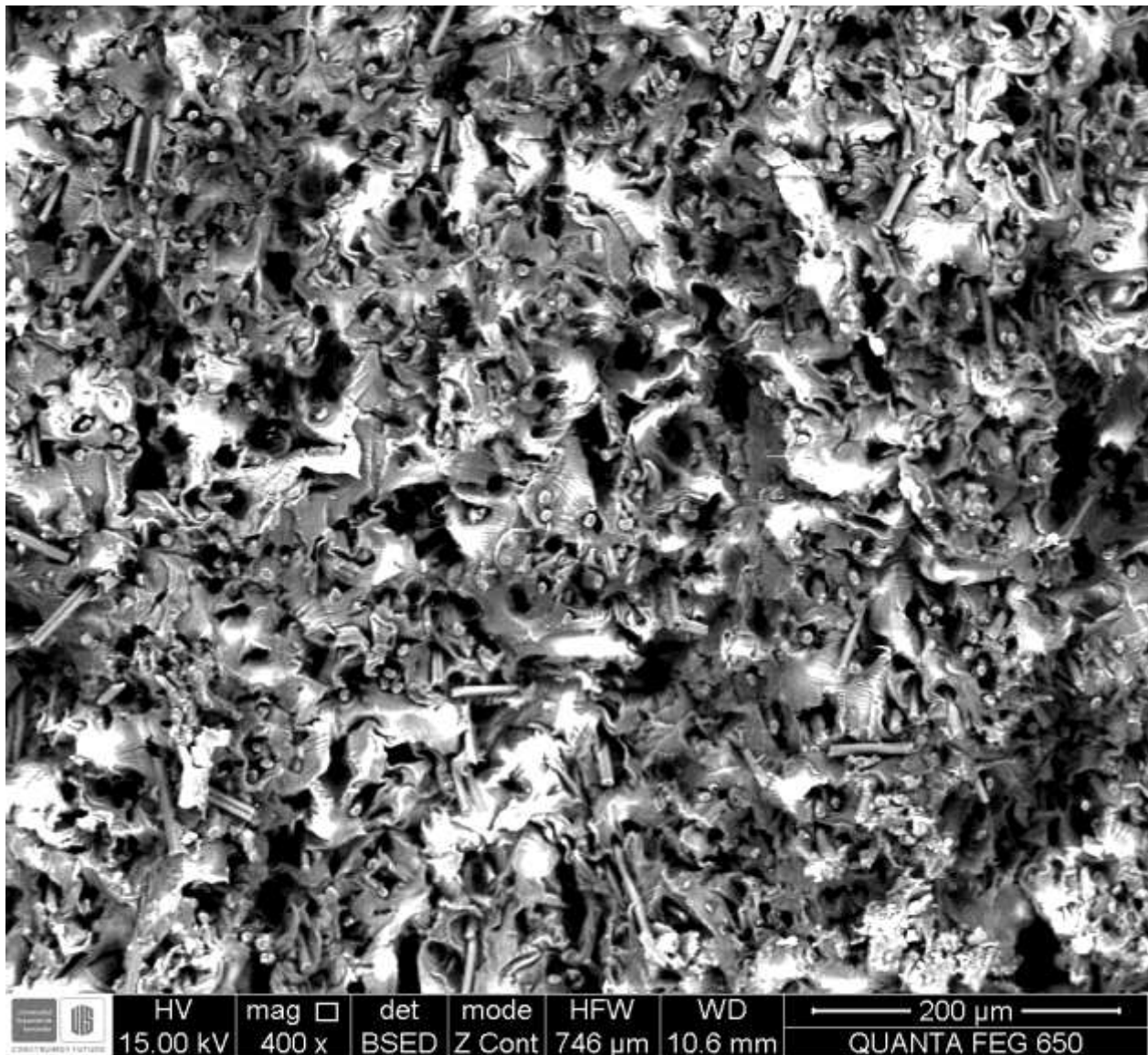
Imagen SEM para el espécimen radio de muesca 2 mm.



En la Figura 35 se examina que la matriz de nylon se ve deformada y algo aplastada debido a las fuerzas que tuvo que soportar hasta que llegó a la fractura.

Figura 35.

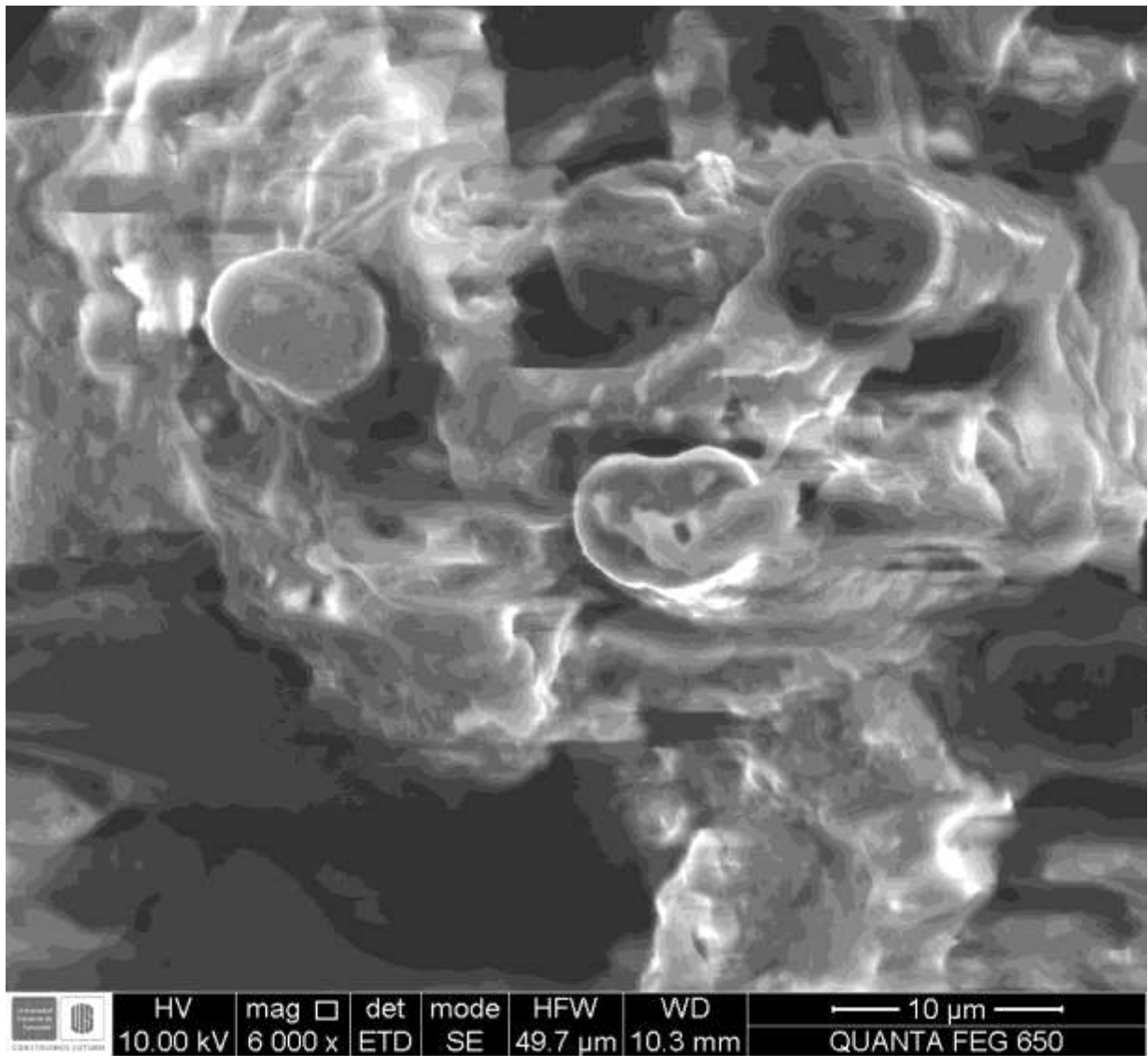
Imagen SEM zona de fractura espécimen con radio de muesca de 0.25 mm.



En la Figura 36 se observa con más detalle las fibras cortas de carbono junto con la matriz de nylon y se observa la deformación plástica hecha por las fuerzas fluctuantes aplicadas, como es un material con una baja plasticidad puede considerarse un material frágil.

Figura 36

Imagen SEM zona de fractura espécimen con radio de muesca de 1.5 mm.



5. Conclusiones

En la prueba de tensión para el material Onyx se examina la curva de esfuerzo vs deformación unitaria se puede concluir que su respuesta mecánica es posiblemente viscoelástica.

Al aumentar el esfuerzo de diseño fuera de los límites del esfuerzo de fluencia S_y da como resultado un desplazamiento mayor que alcanza un máximo valor de 2,4 mm. Este desplazamiento no permitió la creación de una grieta en el espécimen sin muesca N°2 llegando hasta los 80.000 ciclos en la prueba de fatiga uniaxial. En las pruebas sin muesca N°3, 4 y 5 se logró la aparición de una grieta bajo las condiciones de diseño. La falla de cada espécimen obtuvo un numero de ciclos a la falla menor a medida que se aumentaba la deformación. Se puede concluir que este material resiste una gran cantidad de ciclos bajo una frecuencia de 5 Hz y deformaciones diseñadas dadas con su esfuerzo de fluencia llegando a más del millón ciclos.

El diseño para los ensayos de fatiga pasando los límites de la elasticidad llegar a fracturarse y formar una grieta dependiendo de la deformación aplicada. Entonces el número de ciclos a la falla y la deformación al cual está sometido el material son inversamente proporcionales.

Analizando las gráficas construidas de las muestras sin muesca y con los datos que entrego la maquina MTS Bionix fuerza vs ciclos, se observó que empezaba con una fuerza inicial y a medida que pasaba el tiempo esta disminuía hasta permanecer constante durante un largo periodo de tiempo a lo que se le conoce como relajación de tensiones, esta es una característica de los polímeros. Luego de este periodo de relajación el material se fatiga debido a la fluctuación de fuerzas, cae la fuerza y falla el espécimen.

Para las muestras con muesca en la obtención del factor de concentración de esfuerzos K_t dependen solo de la geometría y tamaño de la muesca. Al examinar el K_t para cada configuración

se pudo notar que el valor mayor de este lo obtiene la muesca con el radio más pequeño y el valor menor de K_t lo tiene el radio de muesca más grande. Si tenemos un K_t elevado este producirá una mayor concentración de esfuerzos y esto como consecuencia producirá la falla del material rápidamente. Al finalizar las pruebas se pudo concluir que el número de ciclos a la fractura del material Onyx aumentaba a medida que el radio de muesca aumentaba y viceversa.

Como estamos en presencia de carga dinámica aparece el concentrador de esfuerzo por fatiga K_f para los especímenes con muesca, este valor se elevaba a medida que los radios con muescas crecían. Este factor también se ve relacionado con la sensibilidad a la muesca igual que K_t . La sensibilidad a la muesca aumenta cuando el radio de muesca aumenta, pero K_t disminuye y cuando K_t aumenta la sensibilidad a la muesca disminuye igual que K_f . Si no ocurriera esta relación entre estas variables sería muy difícil de diseñar piezas capaces de soportar un nivel de esfuerzo nominal cuando estén en presencia de muescas.

Se concluye que el Onyx es un material resistente a la fatiga cuando el radio de muesca aumenta por la suavidad del entalle. En cambio, con una muesca pequeña la sensibilidad de entalle disminuye y hay una alta concentración de esfuerzos produciendo la falla del material más rápido que una muesca más grande.

Se pudo comprobar que la grietas en las muescas comienzan en la punta de la muesca debido a que allí es donde se concentra el mayor esfuerzo posible y de la tendencia de la resistencia a la fractura a medida que aumenta el radio de entalle.

Bibliografía

- Basquin, O. (1910). The exponential law of endurance tests. *Proc Am Soc Test Mater*, 10(2), 625-630.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. (Octava edición ed.). México, D. F.: The McGraw-Hill Companies.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., Núñez, P. J., García Plaza, E., García Moreno, I., & Reverte, J. (2019). Additive Manufacturing of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Models: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties. *Composites Science and Technology*, 181, 107688.
- Clegg, R., Duan, K. M., & Cleod, A. (2012). The theory of critical distances and notch fatigue in 6061 aluminum. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 35, 13–21.
- Diaz, J. G. (2022). Comparison of Stress Separation Procedures. Experiments versus Theoretical formulation. *Engineering solid mechanics*, 10, 153-164.
- Ding Liao., S.-P. Z. (2020). Recent advances on notch effects in metal fatigue. *fatigue and fracture of engineering materials and structures*, 638.
- Dixon. (1965). The Up-and-Down Method for Small Samples. *Journal of the American Statistical Association*, 60(312), 967-978.
- Dixon, W., & Mood. (1948). A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. *Journal of the American Statistical Association*, 43, 109-126.
- Dudek, P. (2013). FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(4), 1416.

- Ezeh, O., & Susmel, L. (2020). On the notch fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA). *Journal of Fatigue*, 1-7.
- González, O. A., Pertuz Comas, A. D., & Díaz Rodríguez, J. G. (2020). Monotonic load datasets for additively manufactured thermoplastic reinforced composites. *Data in Brief*, 29, 105295.
- Kenedi, P. (2017). Assessing the Notch Sensitivity of High Strength Wires. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(13), 1-4.
- Leon Becerra, J. S., Díaz Rodríguez, J. G., & González Estrada, O. A. (2020). Damage of continuous fiber reinforced additive manufacturing components. *UIS Ingenierías*, 19(2), 161-176.
- Markforged. (s.f.). *La forja digital*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2020, de <https://markforged.com/materials/plastics/onyx>
- Maurer, J., Jerabek, M., Salaberger, D., Michael, T., Kastner, J., & Major, Z. (2022). Stress relaxation behaviour of glass fibre reinforced thermoplastic composites and its application to the design of interrupted in situ tensile tests for investigations by X-ray computed tomography. *Polymer Testing*, 109.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de Maquinas* (4 ed.). Mexico S.A: Pearson Education.
- Neuber, H. (1958). *Theory of Notch Stresses* (2 ed.). Berlin: Springer Verlag,.
- Neuber, H. (1961). Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress–strain law. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 28, 544–550.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Maquinas* (Cuarta edición ed.). Mexico: Pearson Educación.

- Pertuz, C. A., Díaz, J. G., Meneses, D. O., Niño, Á. N., & León, B. J. (2022). Flexural Fatigue in a Polymer Matrix Composite Material Reinforced with Continuous Kevlar Fibers Fabricated by Additive Manufacturing. *Polymers*, *14*, 3586.
- Pertuz, D., Diaz, S., & Gonzalez, O. (2020). Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique. *Journal of Fatigue*, *130*, 105275.
- Peterson, R. (1974). Stress-Concentration Factors. *John Wiley & Sons*.
- Pilkey, W. D., Deborah, F., & Zhuming, B. (2020). *Peterson's Stress Concentration Factors* (4 ed.). NY: John Wiley & Sons.
- Saleh, M., Al Haron, M., Saleh, A., & Farag, M. (2017). Fatigue behavior and life prediction of biodegradable composites of starch reinforced with date palm fibers. *Int. J. Fatigue*, *103*, 216-222.
- Socie, D. F. (s.f.). *eFatiga*. Obtenido de <https://efatigue-dev.altair.mediag.com/constantamplitude/stressconcentration/#a>
- Taylor, D. (2008). The theory of critical distances. *Eng. Fract. Mech*, *75*, 1696–1705.
- Weighardt, K., Sommerfeld, A., & and Rossmannith, H. (1995). On splitting and cracking of elastic bodies. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, *18*(12), 1371-1405.
- Yang, X. G., Xu, A. H., Wang, J. K., Shi, D. Q., & Huang, J. (2012). A simple method to analyse the notch sensitivity of specimens in fatigue tests. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1009-1016. doi:10.1111/ffe.12053