

Caracterización a la fatiga de aleación de Titanio Ti6Al4V obtenida por fabricación aditiva de
fusión de haz de electrones (EBM)

Freddy Alexander Jiménez Espinosa, Leydy Yinet Gutiérrez Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas
Ingeniero Mecánico, M.Sc, PhD.

Codirector (Opcional)

Abel Antonio Parada Corrales
Ingeniero Mecánico, M.Sc.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo primero que todo a Dios por haberme permitido dado salud para lograr mis objetivos, brindarme una gran familia y amigos.

A mis padres Ángel María Gutiérrez, Nora Emilce Rodríguez por haber brindado la posibilidad de ser un gran profesional y haberme guiado en los momentos difíciles acompañado de mucho amor y cariño.

A mis hermanas por estar ahí conmigo para brindarme su apoyo, amor y comprensión durante todos estos años de estudio.

A mi hijo Juan Sebastián por ser la personita por la cual me levanto a luchar todos los días para lograr mis objetivos, sin importar las dificultades que se me presenten.

A mis dos grandes amores y ejemplos de persistencia, lucha y amor por lo que haces, a ellos gracias por todas esas pequeñas cosas que me pudieron dar mis abuelos Tuto y Nardis.

A mi compañero de proyecto Freddy Alexander Jiménez, por todos estos años de amistad, aventuras, risas y demás, por el trabajo en equipo que nos permite hoy llegar a cumplir ese primer logro.

Por último, a mis amigos de universidad, especialmente a Juan Manuel Jiménez que me brindaron su apoyo en mi formación académica y personal.

A todos ustedes muchas gracias.

Leydy Yinet Gutiérrez Rodríguez

Dedicatoria

Primero que todo dedico esta tesis a Dios por haberme dado la salud y la fuerza para salir adelante y culminar este logro tan importante.

A mi madre Fabiola Espinosa por darme la vida, educación, apoyo incondicional, consejos y comprensión, los cuales me llevaron a ser mejor persona, este título se lo merece más ella por el esfuerzo de ser madre y padre a la vez.

A las dos mujercitas de mi vida, mis sobrinas Sharon y Sara, las cuales me han brindado su amor, estando en todos los momentos de este proceso.

A mis hermanos y demás familiares por brindarme su amistad y ayuda en los momentos difíciles.

A mi novia Cindy Monsalve por brindarme su cariño, apoyándome en los buenos y malos momentos.

A mi compañera de proyecto Leydy Gutiérrez por su amistad durante todos estos años, por su apoyo y por la comprensión que me tuvo a lo largo de la carrera, por soportar mi mal genio y caprichos, estando en las buenas y en las malas.

Por ultimo a mis amigos en especial a Aldemar Ardila porque me demostró que los amigos no solo están en los buenos sino también en los momentos más difíciles.

A todos ustedes infinitas gracias.

Freddy Alexander Jiménez Espinosa

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por guiarnos por el camino del bien, dándonos apoyo y fortaleza en esta etapa tan importante en nuestras vidas

Al profesor Alberto Pertuz por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que nos surgiera, agradecerle por la caridad y exactitud con la que enseñó cada clase, discurso y lección.

Al Instituto Tecnológico Metalmecánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines (AIDIMME), Valencia, España, por conferir las probetas usadas en este proyecto de investigación.

Al Centro Industrial de Mantenimiento Integral CIMI - SENA Servicio Nacional de Aprendizaje por la ayuda suministrada para realizar el maquinado de las probetas.

A los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por el préstamo de la máquina universal Máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02.

A nuestros profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por brindarnos las bases para poder culminar con todas las materias propuestas en el plan de estudios y desarrollar este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Método experimental.....	19
2.1 Material:	19
2.1.1 Aleación de Titanio Ti6Al4V.	19
2.2 Ensayo de tracción:	22
2.3 Ensayo de fatiga por método tradicional	23
2.3.1 Prueba de fatiga controlada por deformación axial..	23
3. Resultados	25
3.1 Resultados del ensayo de tracción	25
3.2 Resultado de ensayo de fatiga por método convencional	27
3.2.1 Carga y descarga..	27
3.2.2 Histéresis.....	30
3.2.4 Tipo de fractura.	35
3.2.5 Metalografía..	36
4 Análisis de resultados	37

4.1 Propiedades mecánicas	37
4.2 Ensayo de fatiga por método convencional	37
4.2.1 Carga o Inmersión.....	37
4.2.2 Histéresis.....	38
4.2.3 Curva de fatiga.....	39
4.3 Morfología	41
5 Conclusiones.....	42
6 Recomendaciones.....	44
7 Referencias bibliograficas.....	45

Lista de Tablas

Tabla 1 Composición química de la aleación de titanio Ti6Al4V. Fuente: (Inc., 2002)	19
Tabla 2 Propiedades físicas de la aleación de titanio Ti6Al4V. Fuente: (Inc., 2002)	20
Tabla 3 Propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti6Al4V. Fuente: (Inc., 2002)	20
Tabla 4 Deformación hallada al 90% de σ_y	25
Tabla 5 Condiciones para el ensayo de fatiga.	25
Tabla 6 Datos de esfuerzo último	26
Tabla 7 Valores de deformación	27
Tabla 8 Cálculos de la prueba de fatiga controlada por deformación ($R = -1$)	32

Lista de Figuras

Figura 1. Muestra de aleación de Titanio Ti6Al4V obtenida por EBM y suministrada por el Instituto Tecnológico Metalmetalico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines (AIDIMME), Valencia, España.....	21
Figura 2 Acotación probeta aleación de titanio Ti6Al4V en milímetros.....	22
Figura 3 Curva esfuerzo versus deformación para una aleación. Fuente: F. P. Reglada, “DISEÑO DE CONSTRUCCIONES METALICAS,” CFGS Constr. Met.	23
Figura 4 Máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02.....	24
Figura 5 Fuerza vs Número de ciclos	29
Figura 6 Fuerza vs deformación Ti6Al4V	31
Figura 7 Curva ϵ_t Vs N	35
Figura 8 Probetas aleación de Titanio Ti6Al4V.	35
Figura 9 Probetas aleación de Titanio Ti6Al4V. Identificación de zona de falla.....	36
Figura 10 Microfractografía de Ti6Al4V	36
Figura 11 Histéresis Ti6Al4V	38
Figura 12 Grafica ϵ_p y ϵ_e vs N	39
Figura 134 Detalle de microfractografía de Ti6Al4V x 200 μm	41
Figura 145 Morfología de Ti6Al4V a 50 μm	42

Lista de Apéndices

Apéndice A Cálculo de tracción	27
Apéndice B Histerias a 122 ciclos y deformación $\pm 0,75$ mm	30
Apéndice C Histerias a 2516 ciclos y deformación $\pm 0,584$ mm	31
Apéndice D Histerias a 7210 ciclos y deformación $\pm 0,5$	31
Apéndice E Cálculos de la prueba de fatiga controlada por deformación ($R = -1$)	32
Apéndice F Datos de la deformación plástica, elástica y total para Ti6Al4V	34
Apéndice G Curva ϵ_t Vs N	35
Apéndice H Curva ϵ_t Vs N	36
Apéndice I Gráfica ϵ_p y ϵ_e vs N	39
Apéndice J Gráfica ϵ vs N y fabricación EBM vs Convencional	40
Apéndice K Detalle de micrografía de Ti6Al4V x 200 μm	41
Apéndice L Morfología de Ti6Al4V a 50 μm	42

(Los apéndices están adjuntos en el CD)

Glosario

σ_{ult} : esfuerzo último del material [Mpa]

σ_{fra} : esfuerzo a la fractura del material [Mpa]

σ_{max} : esfuerzo máximo del material [Mpa]

σ'_f : coeficiente de resistencia a la fatiga [Mpa]

$\epsilon_{máx}$: elongación máxima del material [mm/mm]

ϵ'_f : coeficiente e ductilidad del material

b y c : constantes de fatiga de tensión-compresión

E : módulo de Young [Mpa]

EBM: fabricación aditiva de fusión de haz de electrones

SEM: ensayo de microscopia electrónica de barrido

S : esfuerzo a la fatiga del material [Mpa]

N_f : número de ciclo

Resumen

Título: Caracterización a la fatiga de aleación de Titanio Ti6Al4V obtenida por fabricación aditiva de fusión de haz de electrones (EBM)*

Autores: Fredy Alexander Jiménez Espinosa; Leydy Yinet Gutiérrez Rodríguez **

Palabras clave: Fatiga Plástica, Fatiga de ciclos bajos, histéresis, EMB, Ti6Al4V.

Descripción:

La fabricación aditiva de fusión de haz de electrones (EBM)(Rafi, Karthik, Gong, Starr, & Stucker, 2013a), es un técnica usada para fabricar piezas fundiendo el polvo metálico, capa por capa, con un haz de electrones en alto vacío, generando así una impresión en 3D que permite obtener configuraciones complejas con un grado de confiabilidad mayor a la de los métodos convencionales de fabricación. En esta investigación estudia la caracterización a la fatiga en la zona de ciclos bajos para muestras de aleación de titanio Ti6Al4V obtenida por EBM. Se utilizan probetas cilíndricas mecanizadas bajo la norma ASTM E8(ASTM E8/E8M, 2016), luego estas son sometidas a prueba de tracción, utilizando una maquina universal MTS Bionix® siguiendo el procedimiento propuesto por la norma ASTM E466(Astm, 2010). Los resultados permitieron establecer las condiciones estáticas: esfuerzo último $\sigma_{ult}=1058$ [MPa], de fractura $\sigma_{fr}=1100,2$ [MPa], máximo $\sigma_{max}=1167$ [MPa], a su vez una deformación máxima $\epsilon_{max}=0,033$ [mm/mm]. Los resultados a la fatiga $R=-1$ se realizan a deformación controlada permiten observar curvas de histéresis, donde se puede ver que el material presenta un ablandamiento que da cuenta del efecto Bauschinger(Frederick & Armstrong, 2007), el rango de ciclos a la ruptura se encontró a 14000 ciclos. Estos resultados se graficaron bajo la curva Esfuerzo vs Número de ciclos a la falla ($\epsilon - N_f$) obteniéndose los parámetros de b y A de la ecuación propuesta por Basquin la cual da como resultado $\epsilon = 2,1723N_f^{-0,006}$ (O. H. Basquin, 1990). Finalmente se analiza la relación estructura propiedad, usando ensayo SEM, donde se observar la formación de grietas secundarias perpendiculares a la grieta principal, indicando presencia de varias nucleaciones en diferentes zonas de la probeta, este fenómeno puede ser causado por la morfología que presenta el material, mostrando un posible comportamiento frágil en el material.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director. PhD Alberto David Pertuz Comas, Codirector: M.Sc. Abel Antonio Parada Corrales

Abstract

Title: FATIGUE CHARACTERIZATION OF ALIENATION OF TITANIUM Ti6Al4V
GOT BY ADDITIVE MANUFACTURING OF ELECTRON BEAM MELTING (EBM) *

Autores: Fredy Alexander Jiménez Espinosa; Leydy Yinet Gutiérrez Rodríguez **

Keywords: Plastic Fatigue, Low Cycle Fatigue, hysteresis, EBM, Ti6Al4V.

Description:

Manufacturing additive manufacturing electron beam melting or EMB (Rafi, Karthik, Gong, Starr, & Stucker, 2013). It is a technique used to produce pieces by melting metallic dust layer by layer as an electron beam in a high vacuum, generating a 3D print that allows getting complex settings with a greater degree of reliability than the conventional methods. This research is carried out to study how Fatigue behaves in the low cycles' zone to this alienation, got by EMB technique. To gather the data, it is used mechanized cylindrical specimens on the norm ASTM E8 (ASTM E8 / E 8M, 2016). Those specimens are tensile stressed tested, using a universal machine MTS Bionix, following the proposed procedure by the ASTM E466 norm (ASTM, 2016).

On one hand, the data gathered allows to state static conditions: last effort: $\sigma_{ult}=1058$ [MPa], fracture $\sigma_{frac}=1100,2$ [MPa], maximum $\sigma_{max}=1167$ [MPa], and a maximum deformation $\epsilon_{max}=0,033$ [mm/mm] as well. The fatigue $R=-1$ results are made by controlled deformation and are molded according to the claimed equation by Coffin-Manson (Meggiolaro & Castro, 2004). On the other hand, according to the reported data, it is possible to watch both curved toolpaths of hysteresis and a thickening, which might account for the Bauschinger effect (Federick & Armstrong, 2007). In addition, the cycle range of fracture was found the in 14000 cycles. The data was graphed in the effort curves against the number of fault cycles $\epsilon = 2,1723N_f^{-0,006}$ getting the parameters of b and A stated in the equation by Basquin ($S=ANfb$) (O. H. Basquin, 1990).

Finally, the relation structure-property is analyzed using SEM analysis. It was possible to observe how the secondary rifts perpendicular to the primary rift take form; indicating presence of several nucleation's in different areas of the test specimen. We conclude that phenomena can be caused by the amorphous morphology that present the material, conferring a fragile behavior.

* Bachelor thesis.

** Faculty of Physic-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Advisor: Dr. David Alberto Perutz Comas, PhD, Mechanical Engineer. Advisor: M.Sc. Abel Antonio Parada Corrales

Introducción

La estructura electrónica del titanio permite formar soluciones solidas con otros elementos sustitucionales, con un factor de tamaño atómico del 20 % como el hierro, níquel y cobalto, los cuales son usados para diferentes aplicaciones mecánicas. Desde su inicio se ha calificado como uno de los materiales más ligeros, a pesar de presentar una densidad de $\rho = 4,54 \text{ g.cm}^{-3}$, la cual es el doble que la del aluminio, permitiendo así una excelente relación entre resistencia mecánica/densidad; clasificándolo en uno de los metales con mejor biocompatibilidad, por ende, se hace acreedor de muchas aplicaciones en diferentes ramas de la medicina como prótesis articuladas, implantes dentales, en la industria naval, aeroespacial y automotriz.

Los procesos de fabricación de las diferentes piezas anteriormente mencionadas, pueden ser un poco complejas y costosas por la tecnología de conformación convencional, por esto la industria de manufactura ha buscado diferentes métodos de fabricación de piezas funcionales y de mayor resistencia, entre ellas se encuentra la fabricación aditiva de fusión de haz de electrones (EBM ®). Esta técnica de fabricación aditiva utiliza haz de electrones para fundir selectivamente un lecho de polvo metálico dirigido por el modelo de diseño asistido por computador (CAD) (Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E., 2013) y mejorando las propiedades mecánicas del material como lo son la tenacidad y la resistencia a la corrosión. Una de las aleaciones usadas en la fabricación aditiva EBM es la de titanio Ti6Al4V, ya que es utilizada en el sector tales como la medicina, aeroespacial, marina, entre otras, y presenta alta relación a la resistencia/peso, permitiendo así una mayor confiabilidad.

La fatiga en los materiales es uno de los mayores problemas que han afectado la industria de la manufactura, ya que las piezas siempre estarán expuestas a esfuerzos fluctuantes, produciendo así que su estructura molecular del material presente micro-fracturas que se propagan con el tiempo, las cuales sobrepasara la resistencia del metal alrededor de una pequeña región. Otros de los factores que afectan directamente la propagación progresiva de la fisura son las propiedades mecánicas del material, para esto es necesario analizar este metal bajo ensayos de tracción y fatiga, los cuales sentaran bases para analizar las propiedades mecánicas y así determinar la vida útil de servicio.

Para esto se analizará y detectara las posibles causas y efectos de los resultados adquiridos en las pruebas de fatiga con deformación controlada, permitiendo así el estudio de los inicios de fractura por fatiga elastoplástico de tipo $R = -1$ y un rango de ciclos bajos a la ruptura regidas por la norma ASTM E466 (Astm, 2010), permitiendo observar las curvas de histéresis para un ciclo de carga o inmersión, donde se podrá observar la fase de endurecimiento o ablandamiento que da cuenta del efecto Bauschinger (Frederick & Armstrong, 2007), el cual permitirá realizar un análisis más amplio de las propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti6Al4V obtenido por la fabricación aditiva EBM. Los resultados se modelaran siguiendo la propuesta de Coffin-Manson (Meggiolaro & Castro, 2004), el cual permite normalizar las curvas de Esfuerzo vs Numero de ciclos a la falla ($S-N_f$) obteniéndose los parámetros de b y A de la ecuación propuesta por Basquin ($S = AN_f^b$) (O. H. Basquin, 1990), generando así una curva más confiable a la hora de generarla. Finalmente, se analiza la relación estructura propiedad, permitiendo una investigación microestructura usando MEB y su relación con el comportamiento dinámico observado en los resultados.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar una aleación de Titanio Ti6Al4V obtenida por el método de fabricación aditiva de fusión de haz de electrones (EBM ®), evaluando el comportamiento a la fatiga en la zona de bajo ciclaje.

1.2 Objetivos Específicos

- Obtener datos relevantes acerca de los enfoques teóricos y disciplinares dados al objeto de estudio y aportar argumentos que contribuyan a justificar y definir el alcance de la investigación.
- Determinar experimentalmente la condición estática del material, para el ensayo de fatiga a deformación controlada generadas por la máquina universal MTS Bionix®.
- Analizar los resultados y normalizar la curva esfuerzo- deformación (ϵ_t -N), siguiendo la propuesta de Coffin-Manson.
- Analizar la morfología del material usando el microscopio de barrido electrónico (SEM) con el fin de observar el comportamiento dinámico en los resultados.

2. Método Experimental

2.1 Material:

Para esta investigación se usará aleación de Titanio Ti6Al4V obtenidas por fabricación aditiva de fisión de haz de electrones, a continuación, se puede ver la descripción de este material y el método de fabricación.

2.1.1 Aleación de Titanio Ti6Al4V. Esta aleación fue desarrollada originalmente para aplicaciones ligeras y de alta resistencia en el mercado aeroespacial, debido a que presenta alta resistencia mecánica, buena ductilidad y propiedades uniformes en el material. Debido a estas propiedades y su excelente resistencia a la corrosión es muy utilizado en equipos de procesos químicos, componentes marinos e implantes biomédicos, además su utilización es muy importante en componentes aeroespaciales, trenes de aterrizaje, turborreactores, entre otros gracias a su buen balance de propiedades (Askeland, 1998). El Ti6Al4V es una de las aleaciones más utilizadas debido a sus propiedades mecánicas, buen comportamiento a los tratamientos térmicos y su estructura alfa-beta. A esta aleación se le aplican diferentes tipos de tratamientos, por envejecimiento, recocido, entre otras (Joshi, 2006). La composición química de esta aleación se presenta en la tabla 1. En la tabla 2 y 3 se presentan algunas propiedades físicas y mecánicas respectivamente de esta aleación.

Tabla 1 Composición química de la aleación de titanio Ti6Al4V. Fuente: (Inc., 2002)

COMPOSICION QUIMICA	C	Fe	N2	O2	Al	V	H2 lámina	H2 barra	titanio resto hasta completar el 100%
Análisis típico en %	0,08	0,25	0,05	0,02	5,5-6,76	3,5-4,5	0,015	0,0125	

Tabla 2 *Propiedades físicas de la aleación de titanio Ti6Al4V. Fuente: (Inc., 2002)*

DENSIDAD g/cm ³	PUNTO DE FUSION °C/°F	CALOR ESPECIFICO J/kg.cm	RESISTENCIA ELECTRICA ohm.cm	CONDUCTIVIDAD TERMICA w/m.K
4,42	1649/3000	560	170	7,2

Tabla 3 *Propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti6Al4V. Fuente: (Inc., 2002)*

Resistencia a la tracción MPa	Módulo elástico MPa	Dureza Rockwell C	Ductilidad (Alargamiento antes de rotura)
896	827	36	10%

El método de obtención de las probetas es por fabricación aditiva de fusión haz de electrones (EBM). El haz de electrones se genera dentro de una pistola de electrones a través de un filamento de tungsteno. El filamento se calienta a más de 2000 °C por la corriente del filamento, que permite que los electrones escapen libremente de él. Los electrones emitidos se aceleran en un campo eléctrico, obtenido mediante la aplicación de un alto voltaje de ~ 60 kV entre el filamento y el ánodo, y luego se enfocan por medio de una bobina electromagnética (bobina de enfoque). El haz de electrones enfocado se escanea selectivamente sobre el lecho de polvo con un proceso capa por capa dirigido por un software EBM Control 3.2. (Rafi, Karthik, Gong, Starr, & Stucker, 2013b)

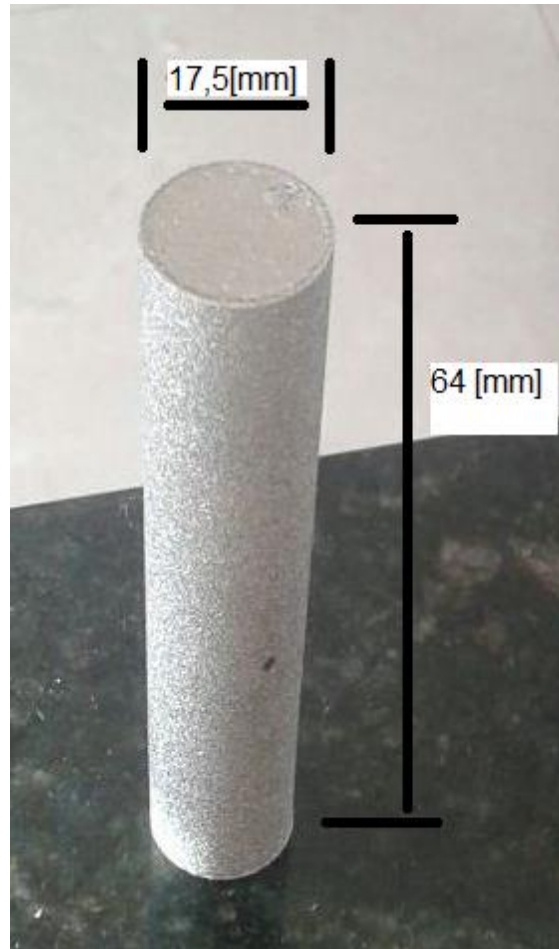


Figura 1. Muestra de aleación de Titanio Ti6Al4V obtenida por EBM y suministrada por el Instituto Tecnológico Metalmetalico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines (AIDIMME), Valencia, España.

2.1.2 Descripción de las probetas. El suministro del material inicialmente es adquirido en forma de varillas, la aleación consta de un diámetro de 17,5 milímetros, con ayuda del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA ubicado en la ciudad de Girón Santander se realiza un maquinado en CNC a las probetas, donde las medidas usadas son las recomendadas por la norma ASTM E8 (ASTM Standard, 2012). En la figura 2 se observan las medidas para la muestra de aleación de titanio. El número de probetas existentes total para los ensayos fue de 20.

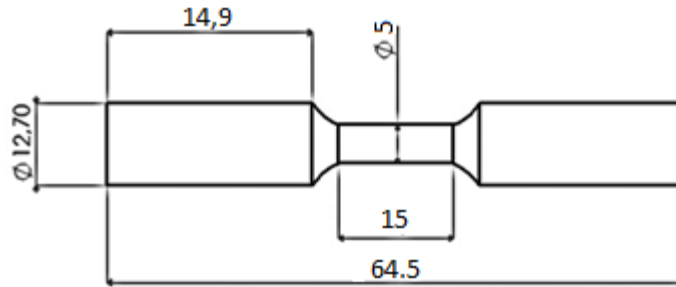


Figura 2 Acotación probeta aleación de titanio Ti6Al4V en milímetros.

2.2 Ensayo de tracción:

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo uniaxial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la misma. El ensayo de tracción se llevó a cabo bajo la norma ASTM E8 (ASTM E8/E8M, 2016) la cual indica las dimensiones de la probeta y las condiciones adecuadas para la prueba, para iniciar se realiza la medición y revisión respectiva de las muestras, se hace el montaje en la máquina y se introduce la velocidad de deformación junto con la frecuencia deseada, a temperatura ambiente. La máquina proporciona datos de fuerza, deformación y tiempo transcurrido en el ensayo. En la figura 3 se puede observar un modelo de la curva de esfuerzo vs deformación, el cual nos lleva a una idea básica de cómo se debería obtener la curva deseada para la aleación estudiada.

Para el ensayo de tracción se utiliza la máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02 de capacidad 25 KN, con una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min a temperatura ambiente, con un rango de 21 a 25 °C (figura 4).

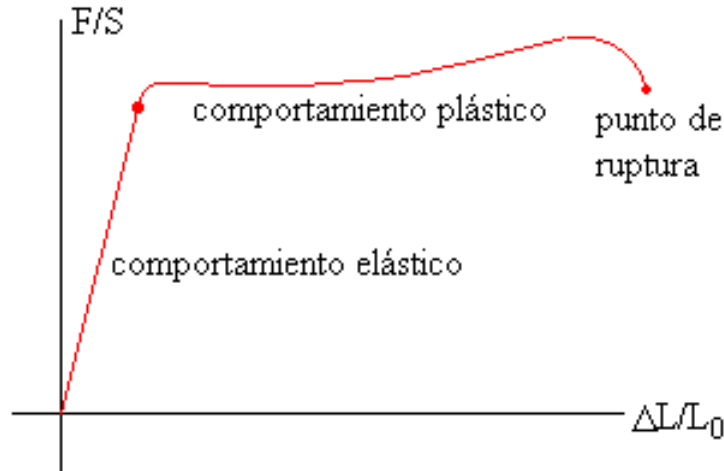


Figura 3 Curva esfuerzo versus deformación para una aleación. Fuente: F. P. Reglada, “DISEÑO DE CONSTRUCCIONES METÁLICAS,” CFGS Constr. Met.

2.3 Ensayo de fatiga por método tradicional

La fatiga es un proceso de degeneración de un material sometido a cargas cíclicas de valores por debajo de aquellos que serían capaces de provocar su rotura mediante tracción. Durante dicho proceso se genera una grieta que, si se dan las condiciones adecuadas crecerá hasta producir la rotura de la pieza al aplicar un número de ciclos suficientes. El número de ciclos necesarios dependerá de varios factores como la carga aplicada, y presencia de entallas. (VENTURA, 2018).

2.3.1 Prueba de fatiga controlada por deformación axial. Este ensayo se realiza siguiendo la norma ASTM-E466 (ASTM, 2002) recomendada para ciclos bajos en fatiga. Para el ensayo de fatiga controlado por deformación axial se utiliza la máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02 de capacidad 25 KN (figura 4).



Figura 4 Máquina universal de ensayos MTS Bionix® Servohydraulic Test Systems Model 370.02.

Primero que todo se inspecciona la maquina universal de ensayos, verificando que el nivel de aceite sea el adecuado, observando que cada implemento esté bien sujeto ya que al momento de realizar la prueba se maneja un nivel de vibración elevado, seguido se realiza el montaje de la muestra, en este caso la probeta en la maquina universal de ensayos teniendo en cuenta el agarre adecuado para estas y se verifica que tenga una buena alineación, la fuerza con la que es sujeta es de 1300 psi.

Para comenzar con el ensayo se ingresan al sistema de control los datos de deformación máxima-mínima registrados en la tabla 4, los cuales se obtienen del ensayo de tracción. Para la primera prueba de fatiga se utiliza la deformación hallada al 90% de σ_{Max} , y así conocer los resultados de la fuerza máxima y mínima suministrados por la máquina MTS Bionix® y seguido a esto, se

usan valores otros tres puntos que corresponden al 80, 70 y 60 % del σ_{Max} , con fin de tener n buen rango de resultados para la construcción de la gráfica ϵ - N_f .

Tabla 4 Deformación hallada al 90% de σ_y .

	σ_{Max} de tracción [MPa]	Fatiga R=-1 [MPa]		Deformación
		$0,9*\sigma_{\text{Max}}$	$0,9*\sigma_{\text{Min}}$	
Ti6Al4V	1076,89	775,94	-925,4	-0,75

Tabla 5 Condiciones para el ensayo de fatiga.

Condiciones para el ensayo	
Tipo de ensayo	Fatiga (bajos ciclos)
Deformación total	1-3 %
Relación de esfuerzos	$S_{\text{max}}/S_{\text{min}}=-1=R$
Velocidad de deformación	$1-5 \times 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$
Frecuencia	0,5 Hz
Temperatura y humedad	Condición ambiente del laboratorio

Una vez establecidos los datos se continua a realizar 12 pruebas, este ensayo se ubicó en la zona de Tensión-Compresión, con una relación de desplazamiento axial de -1.

3. Resultados

3.1 Resultados del ensayo de tracción

Los datos suministrados por el ensayo de tracción son: fuerza, deformación y tiempo de ejecución de la prueba. En la figura 5 se puede observar la gráfica esfuerzo vs deformación unitaria del material; la deformación unitaria se calculó con la división del logaritmo neperiano entre la longitud inicial de la probeta y la deformación real de esta, mientras que el esfuerzo

vendría siendo el coeficiente entre la fuerza axial y el área inicial de la sección reducida de la muestra.

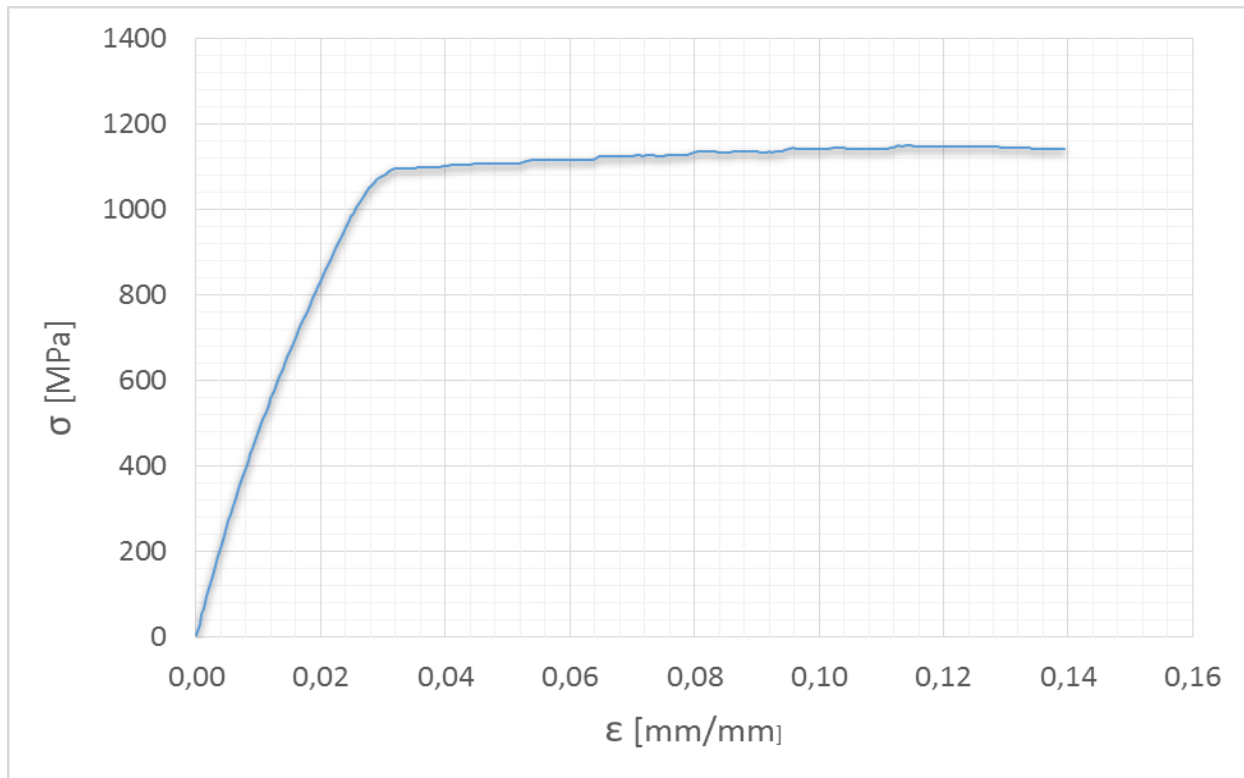


Figura 5. Curva de Tracción de Ti6Al4V. Esfuerzo Vs Deformación

En la tabla 6 se podrá observar los resultados del esfuerzo último experimental para tres muestras diferentes con su respectivo cálculo del porcentaje de error respecto al teórico.

Tabla 6 Datos de *esfuerzo último*

Ti6Al4V	Esfuerzo ultimo [MPa]	Esfuerzo ultimo teórico [MPa]	% de error σ_u
Probeta 1	1076,51	992	7,85
Probeta 2	981,81	992	1,038
Probeta 3	1001,81	992	0,979

Nota: el valor de esfuerzo último teórico fue tomado como referencia de varias investigaciones realizadas para el tipo de aleación usada en esta investigación y con el mismo tipo de fabricación

3.2 Resultado de ensayo de fatiga por método convencional

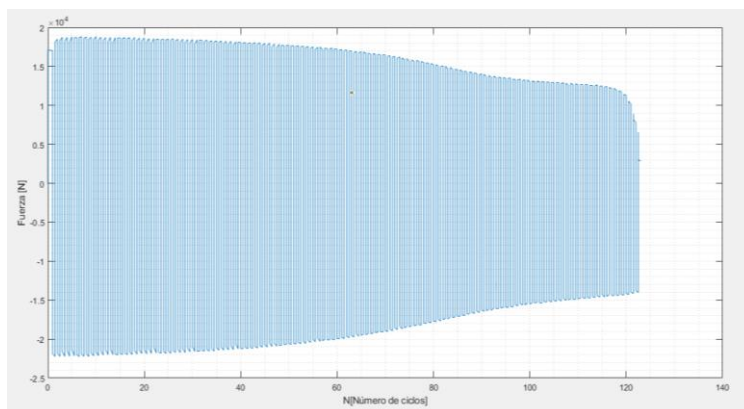
Los datos suministrados en el ensayo de fatiga son: Fuerza axial, desplazamiento, número de ciclos y el tiempo de ejecución de la prueba, con estos datos se pueden obtener las gráficas carga-descarga e histéresis, para un valor determinado de deformación constante a una frecuencia de $f = 0,5$ Hz. En la tabla No 8 se observan los valores calculados para la prueba de fatiga ($R = -1$) con control de deformación que se usaran en la respectiva prueba de fatiga.

Tabla 7 Valores de deformación

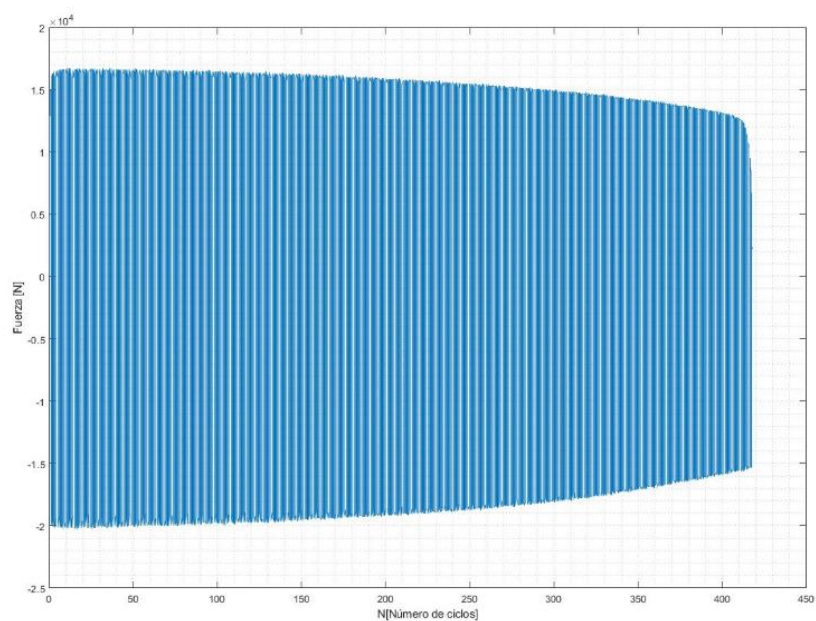
	Deformación [mm]			
Ti6Al4V	+ - 0,75	+ - 0,67	+ - 0,584	+ - 0,5

3.2.1 Carga y descarga. En la figura No 6 se podrá observar la gráfica de fuerza vs ciclos, para cada uno de los puntos tomados en consideración en la realización de la prueba de fatiga ($R = -1$) a una deformación unitaria controlada, en la cual se puede visualizar la variación de la carga y el número de ciclos hasta el momento en el que la probeta falla.

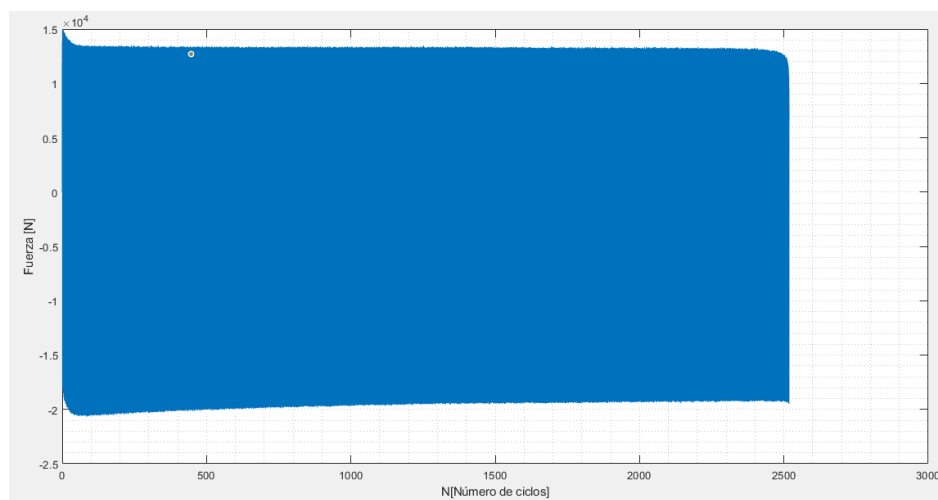
a). 122 ciclos a $\pm 0,75$ [mm]



b) 417 ciclos a $\pm 0,67$ [mm]



c) 2516 ciclos a $\pm 0,584$ [mm]



d) 7210 ciclos a $\pm 0,5$ [mm]

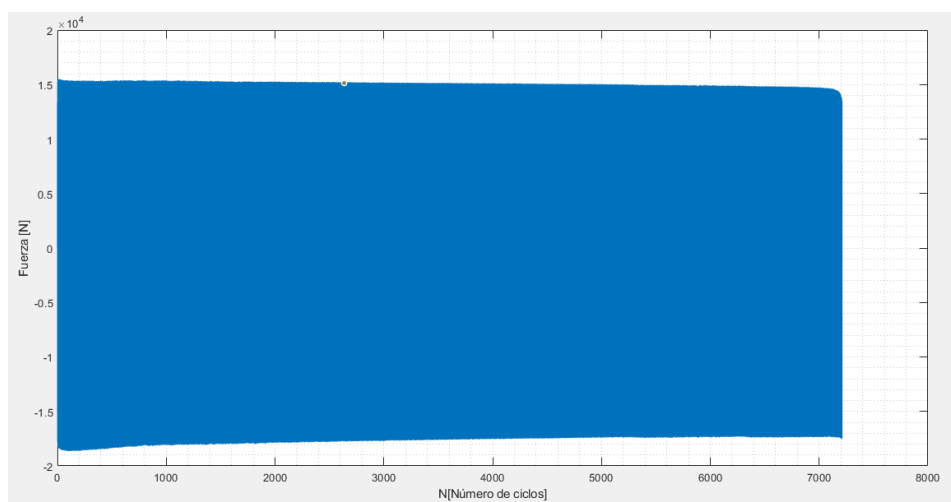
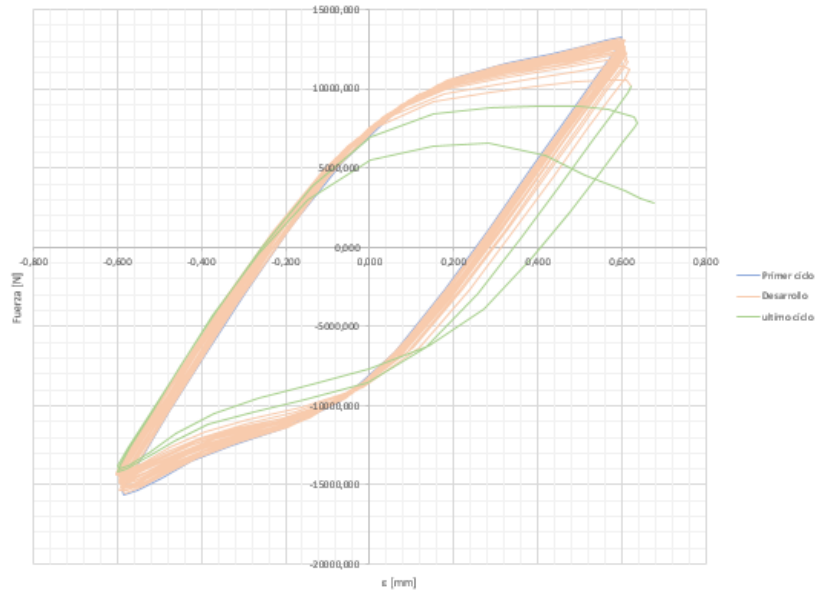


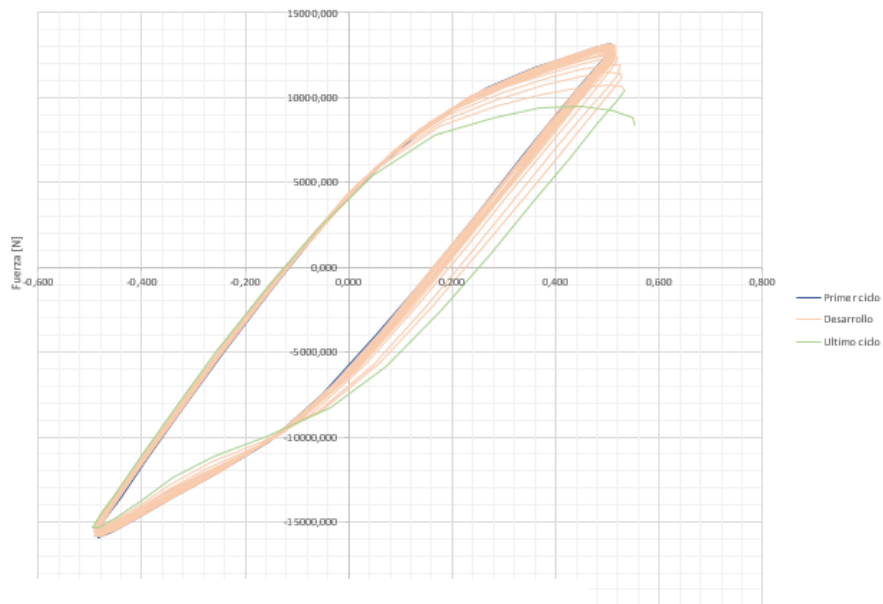
Figura 5 Fuerza vs Número de ciclos

3.2.2 Histéresis. En la siguiente figura se podrá observar el comportamiento del bucle de histéresis, en los diferentes ciclos de carga e inmersión que sufre las probetas para cada uno de las deformaciones mencionas en la tabla 7

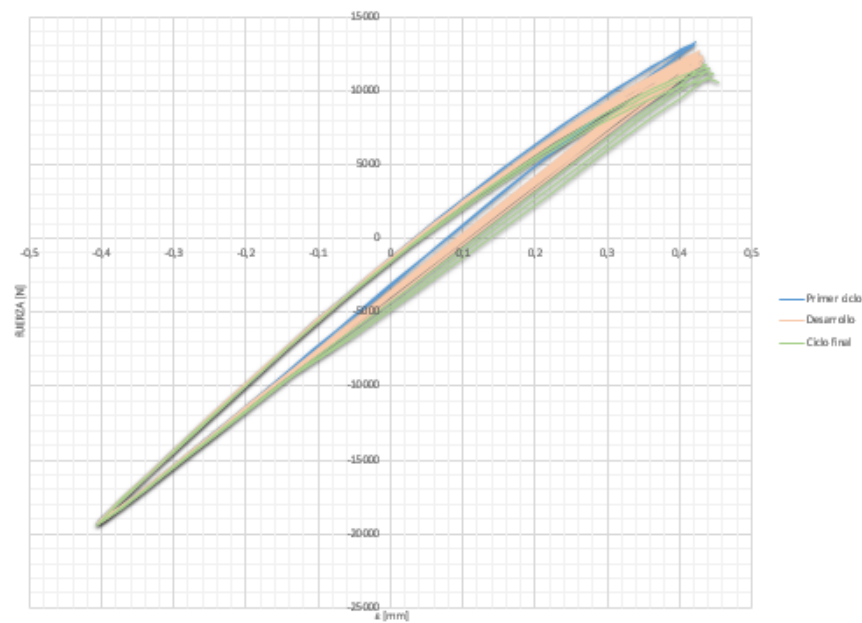
a). 122 ciclos a $\pm 0,75$ [mm]



b) 417 ciclos a $\pm 0,67$ [mm]



e) 2516 ciclos a $\pm 0,584$ [mm]



d) 7210 ciclos a +- 0.5 [mm]

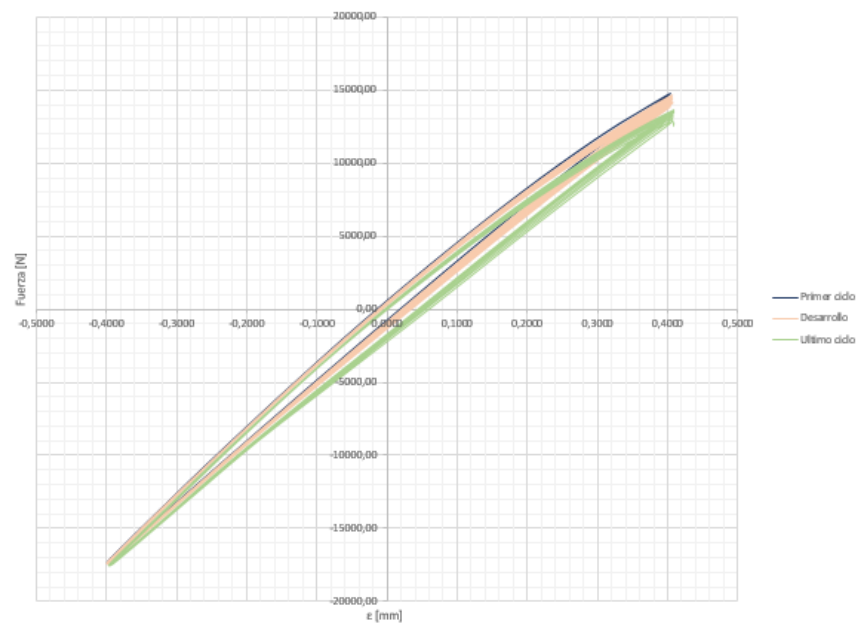


Figura 6 Fuerza vs deformación Ti6Al4V

3.2.3 Resultados ensayo de fatiga en bajo ciclaje. A partir de la histéresis se obtiene la amplitud de la tensión máxima y mínima para cada uno de los ciclos de inmersión hasta que ocurra la falla en el material. En la tabla No 9 se observan los datos obtenidos en cada uno de los ensayos.

Tabla 8 Cálculos de la prueba de fatiga controlada por deformación ($R = -1$)

Ti6Al4V	Deformación [mm]	Prueba	Fmax [KN]	Fmin [KN]	N (número de ciclos)	Área de Sección [mm ²]	Esfuerzo Max [MPa]
Punto 1	(+) 0,75	22	15,49	-21,88	114	19,64	788,86
		18	15,24	-18,18	121	19,64	775,94
		31	15,50	-23,16	225	19,64	789,38
Punto 2	(+) 0,665	19	12,32	-19,24	413	19,64	627,30
		16	11,71	-18,71	416	19,64	596,37
		10	11,74	-18,55	735	19,64	597,67
Punto 3	(+) 0,584	9	11,19	-16,25	1511	19,64	569,79
		3	11,26	-20,66	2515	19,64	573,21
		4	11,28	-17,77	5510	19,64	574,16
Punto 4	(+) 0,5	1	11,90	-19,29	6022	19,64	605,67
		21	11,53	-18,63	7209	19,64	586,94
		15	11,52	-18,20	13334	19,64	586,57

Para la representación de las gráficas $\epsilon-N_f$ y $S-N_f$, existen diferentes modelos que ajustan los datos de tal manera que se pueda obtener un cierto nivel de confiabilidad. En este trabajo de investigación, presentamos el Modelo de Coffin-Manson, que relaciona el rango entre el punto crítico y la vida de inicio de fatiga.

La ecuación de Coffin-Manson es la siguiente:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_p}{2} + \frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c + \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b$$

Para tener una mejor precisión en la estimación de cada una de las curvas bajo las recomendaciones de E739(“Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized

Stress-Life ,” 2009), la cual tiene en cuenta la distribución logarítmica de la vida de fatiga y así poder calcular los parámetros b y A de la ecuación propuesta por Basquin.

Ecuación de Basquin:

$$(S=AN_f^b)$$

Permitiendo así un análisis estadístico de modelo lineal $Y = A + BX$, el cual permite realizar una distribución logarítmica de la vida a fatiga con variación constante en un intervalo de X utilizado en el ensayo y así poder asignar amplitudes de distribución log-normal (dos parámetros) que permiten la estimación de verosimilitud de A y B , las cuales permitirán una mayor precisión a la hora de calcular las constantes de fatiga de tensión-compresión b y c presentes en la ecuación de Coffin-Manson, las cuales se pueden ver en la tabla No. para las muestras usadas en este investigación.

Los ensayos dan bondad para el análisis de los parámetros cíclicos a los se estarán sometiendo el material, en la cual la deformación cíclica de amplitud constante ϵ_p y ϵ_p , el módulo de Young E y el coeficiente de resistencia a la fatiga σ'_f mostrando en la tabla No. 9 como valorables independistas a la hora de evaluar los parámetros que relacionan el endurecimiento o ablandamiento del material con respecto al número de ciclos a los que fallara la muestra, permitiendo así un cálculo más preciso de deformación total a la que se fueron sometida; se muestran en la tabla No 10.

Tabla 9. Datos de constantes b y c usadas en la ecuación de Coffin-Manson

Ti6Al4V	Deformación [mm]	Probeta	N (número de ciclos)	Esfuerzo [MPa]	Área $\bar{\epsilon}$ [mm ²]	RA	b	c
Punto 1	(+/-) 0,75	22	114	788,86	18,78	0,04	-0,05	-0,73
		18	121	775,94	20,59	0,05	-0,05	-0,73
		31	225	789,38	22,56	0,13	-0,05	-0,73
Punto 2	(+/-) 0,665	19	413	627,30	20,16	0,03	-0,03	-0,73
		16	416	596,37	21,16	0,07	-0,03	-0,73
		10	735	597,67	21,20	0,07	-0,03	-0,73
Punto 3	(+/-) 0,584	9	1511	569,79	21,18	0,07	-0,03	-0,73
		3	2515	573,21	20,35	0,03	-0,03	-0,73
		4	5510	574,16	21,24	0,08	-0,03	-0,73
Punto 4	(+/-) 0,5	1	6022	605,67	21,24	0,08	-0,03	-0,73
		21	7209	586,94	20,35	0,03	-0,03	-0,73
		15	13334	586,57	20,59	0,05	-0,03	-0,73

Tabla 10 Datos de la deformación pastica, elástica y total para Ti6Al4V

	Deformación [mm]	Prueba	N (número de ciclos)	$\Delta\epsilon_p$	$\Delta\epsilon_e$	$\Delta\epsilon_t$
Punto 1	(+/-) 0,75	22	114	0,021	0,017	0,038
		18	121	0,022	0,016	0,038
		31	225	0,041	0,016	0,057
Punto 2	(+/-) 0,665	19	413	0,020	0,014	0,034
		16	416	0,056	0,014	0,069
		10	735	0,038	0,013	0,051
Punto 3	(+/-) 0,584	9	1511	0,022	0,013	0,035
		3	2515	0,017	0,013	0,030
		4	5510	0,019	0,012	0,031
Punto 4	(+/-) 0,5	1	6022	0,018	0,013	0,031
		21	7209	0,013	0,012	0,026
		15	13334	0,013	0,012	0,025

A partir de los datos obtenidos mencionados en las tablas No. y usando la ecuación de Coffin-Manson se puede obtener las siguiente graficas de ϵ - N_f y S - N_f

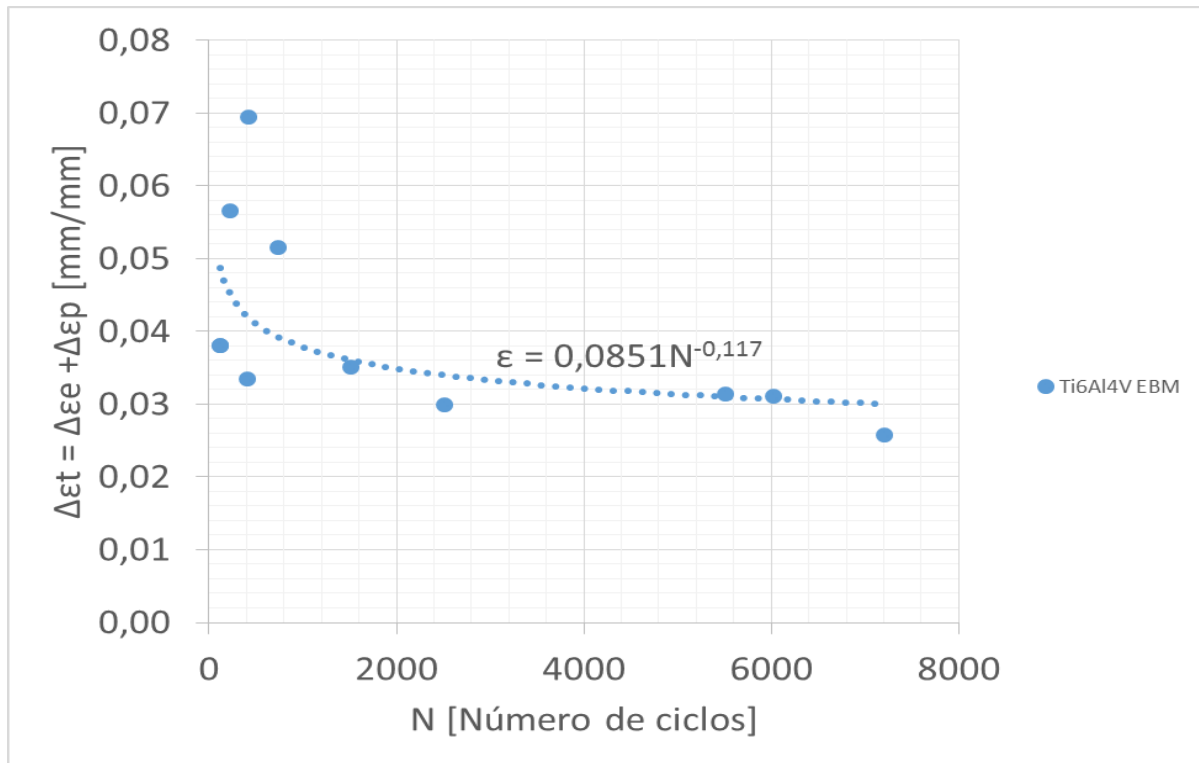


Figura 7 Curva ϵ_t Vs N

3.2.4 Tipo de fractura. En la figura No 10 se puede observar que las muestras presentan una ruptura de aproximadamente 45° y en el área de falla se puede identificar las diferentes zonas para la fatiga a bajo ciclaje.



Figura 8 Probetas aleación de Titanio Ti6Al4V.

Zona 1: nucleación

Zona 2: propagación o avance de la grieta (líneas de playa)

Zona 3: fractura rápida

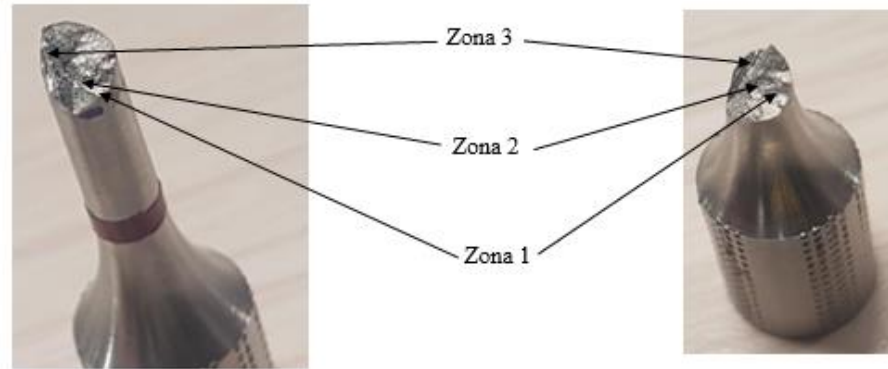


Figura 9 Probetas aleación de Titanio Ti6Al4V. Identificación de zona de falla.

3.2.5 Metalografía. En la figura No.12 se podrá observar una fotografía aumentada a de la morfología de la aleación de titanio Ti6Al4V, en la cual se visualiza en la imagen A que para esta muestra presenta varias nucleaciones ya que se ven varias grietas secundarias con respecto a la imagen B, presentándose este fenómeno debido a la cantidad de ciclos a los cuales fallaron las probetas.

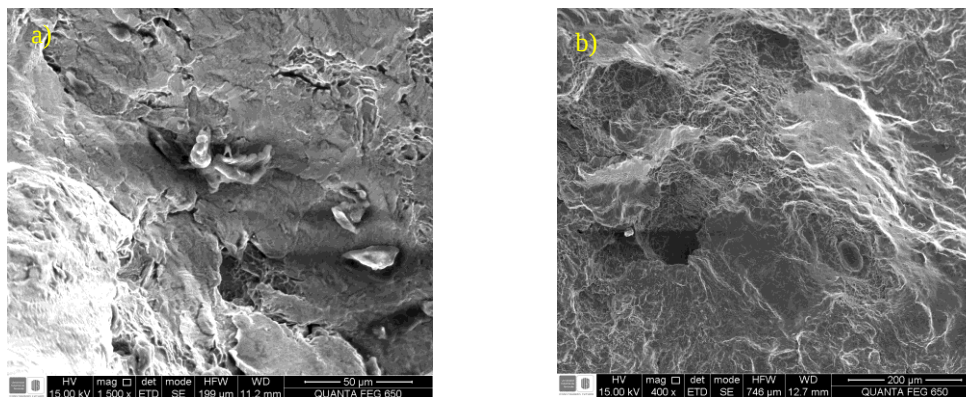


Figura 10 Microfractografía de Ti6Al4V

4 Análisis de resultados

4.1 Propiedades mecánicas

Para la curva esfuerzo-deformación presentada en la figura No. 5 (apartado 3.1), se puede observar que la aleación de titanio Ti6Al4V obtenida por fabricación aditiva de fusión de haz de electrones (EBM), posiblemente presenta un comportamiento de un metal frágil ya que el esfuerzo ultimo $\sigma_u = 1076,56$ [MPa] y el esfuerzo de fluencia $\sigma_y = 1149,31$ [MPa] son valores cercanos, sin embargo, se puede apreciar que este material presenta un alargamiento común de un material dúctil, el cual se le puede atribuido al tipo de fabricación usado en las muestras, puesto que esta técnica de fabricación utiliza haz de electrones para fundir específicamente un lecho de polvo metálico formándose una serie de capas hasta obtener la pieza deseada y esto probablemente ocasiona que los elementos usados para la aleación, no se encuentren distribuidos homogéneamente.

4.2 Ensayo de fatiga por método convencional

4.2.1 Carga o Inmersión. En la figura No. 6 se puede observar un comportamiento de fatiga $R = -1$ con tensión media negativa, el cual indica que el esfuerzo fluctuante a tracción es más pequeño que el esfuerzo fluctuante a compresión, generando así una acumulación en la deformación elástica cíclica, provocando que el material presente un ablandamiento hasta el punto de ruptura.

4.2.2 Histéresis. El comportamiento de fatiga a bajo ciclaje a una relación de esfuerzos $R=-1$ y deformación controlada cíclica constante para la aleación de Titanio Ti6Al4V, presenta un ablandamiento como se puede observar en la figura No. 7, este fenómeno quizás es provocado por la forma que fueron fabricadas las muestras, ya que ésta a la hora de fundir el polvo de lecho metálico no permite que sus elementos no se cohesionen atómicamente produciendo que la estructura molecular de la pieza sea muy porosa.

En la figura No. 11 se pueden observar que el material se está ablandando ya que el efecto Baushinguer indica que la carga aplicada en el primer ciclo es mayor con respecto al último ciclo, producto de la porosidad presente en las probetas, dejando ver que el comportamiento inelástico presente en las muestras es causado por la distribución elástica, el cual supera ciertos valores de la deformación plástica a la tracción generando así un ablandamiento en el material.

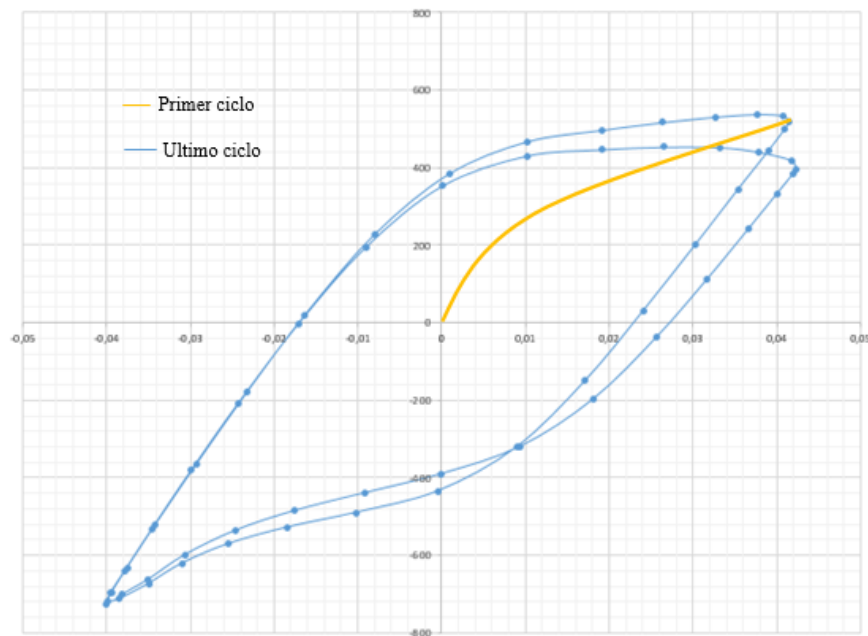


Figura 11 Histéresis Ti6Al4V

4.2.3 Curva de fatiga. En la figura No. 12 se puede observar la distribución de resistencia a la fatiga, en la deformación plástica representada por la línea de color azul se puede apreciar un comportamiento totalmente común comparada con la gráfica teórica propuesta por Coffin-Manson, pero en la deformación elástica representada por la línea de color naranja se observa un pequeño crecimiento, este fenómeno se podría atribuir a la forma como fueron fabricadas las muestras, ya que la fabricación aditiva EBM toma el polvo metálico y lo funde formando capas sobre capas, lo que permite que sus partículas no se cohesionen entre sí, permitiendo que la aleación Ti6Al4V sea más porosa que cuando es fabricada por los medios convencionales.

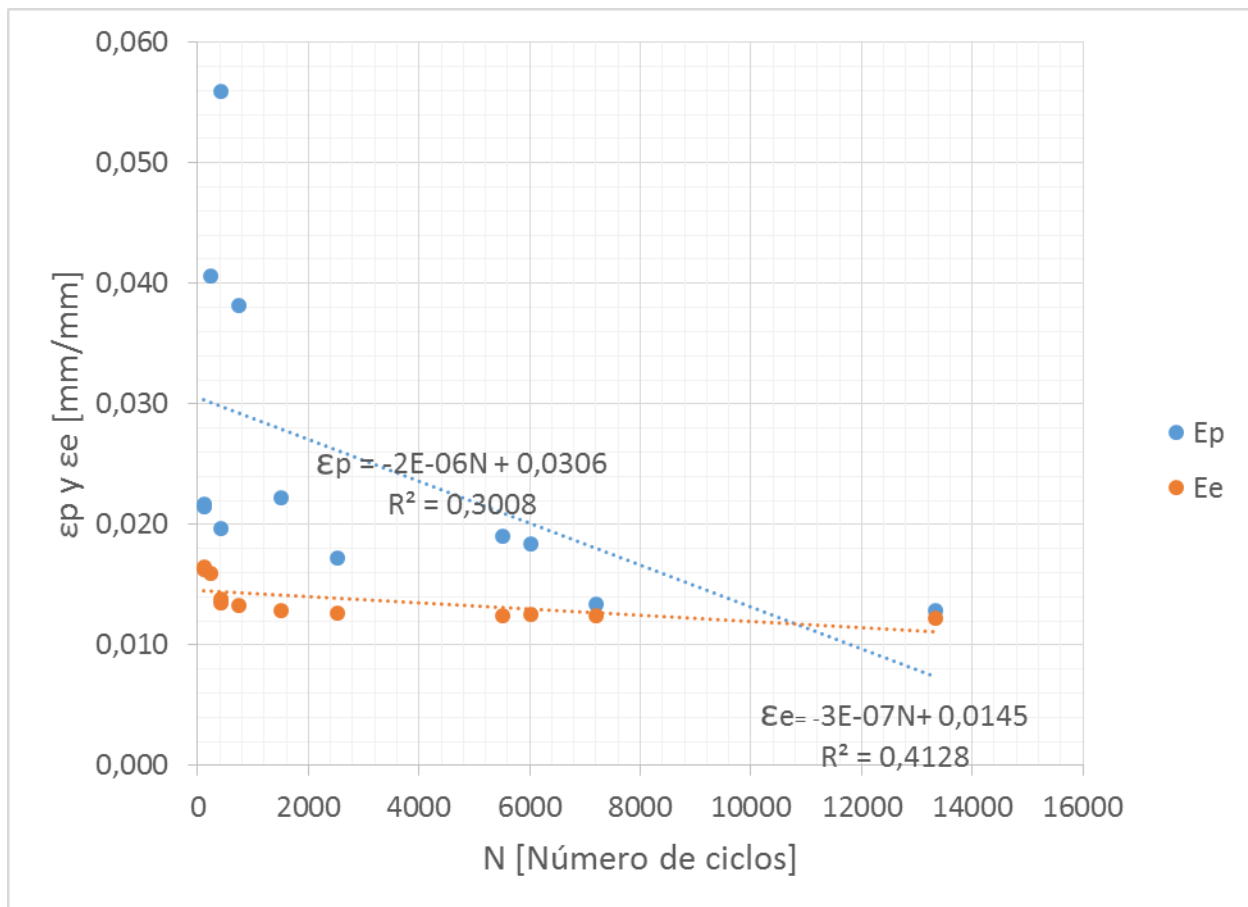


Figura 12 Grafica ϵ_p y ϵ_e vs N

Con los datos de deformación plástica y elástica que sufre las probetas al ser sometidas a fatiga y el número ciclos se realiza una regresión logarítmica usando la ecuación de Coffin - Manson para obtener la curva ϵ_t vs N a los cuales estas muestras fallaron, como se puede observar en la figura No. 8, descrita en el ítem 3.2.3

Al comparar la gráfica de ϵ_t vs N del Ti6Al4V obtenida por EBM (figura No. 8), con la gráfica ϵ_t vs N para el Ti6Al4V fabricados por el método convencional se puede observar que las propiedades a la fatiga fabricadas por EBM de la aleación disminuyen con respecto a la fabricación convencional.

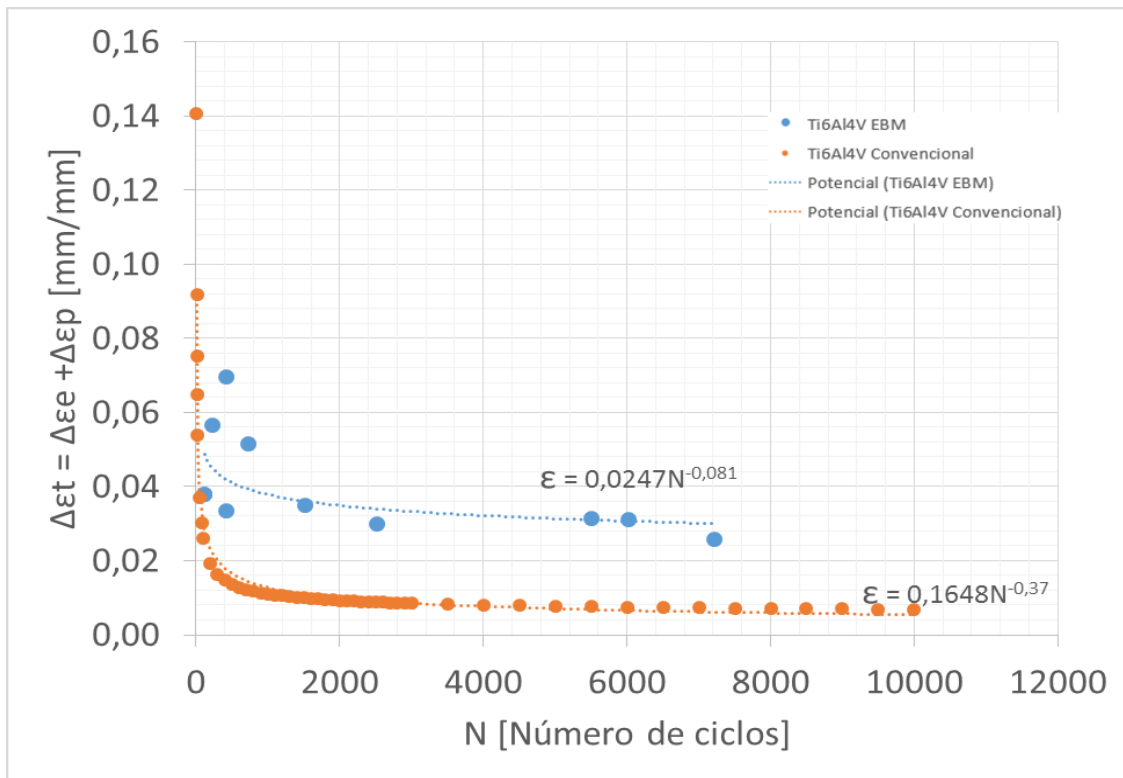


Figura 13 Gráfica ϵ vs N y fabricación EBM vs Convencional

4.3 Morfología

En la figura No. 14 se observan unas grietas secundarias con una cierta profundidad las cuales muestran que el proceso de fatiga cíclico genera entonces aparte de la grieta primaria observada en primer plano unas grietas secundarias como consecuencia de la alta deformación que está sufriendo el material, la grieta nucleada presentada en la superficie crece en forma de estrías perpendiculares al crecimiento de la grieta, alcanzado su punto crítico en el cual la muestra no puede soportar más cargas por inmersión cíclica y presenta una fractura frágil.

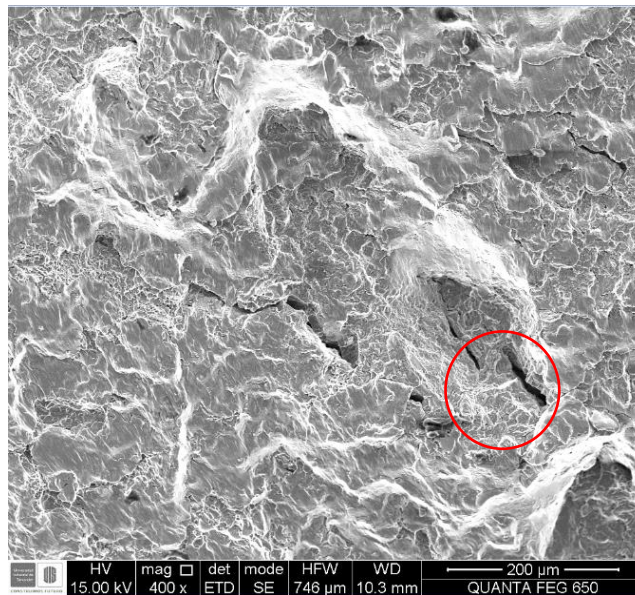


Figura 134 Detalle de microfractografía de Ti6Al4V x 200 μm

En la figura No. 15 para la morfología de la aleación Ti6Al4V se puede evidenciar como se generan diferentes grietas secundarias perpendiculares a la grieta número 1, debido a que a la hora de cargar y descargar las muestras de manera cíclica se presentan variadas nucleaciones. Además, observamos una estructura muy deformada indicando que es un material amorfo confiriéndole así un comportamiento frágil.

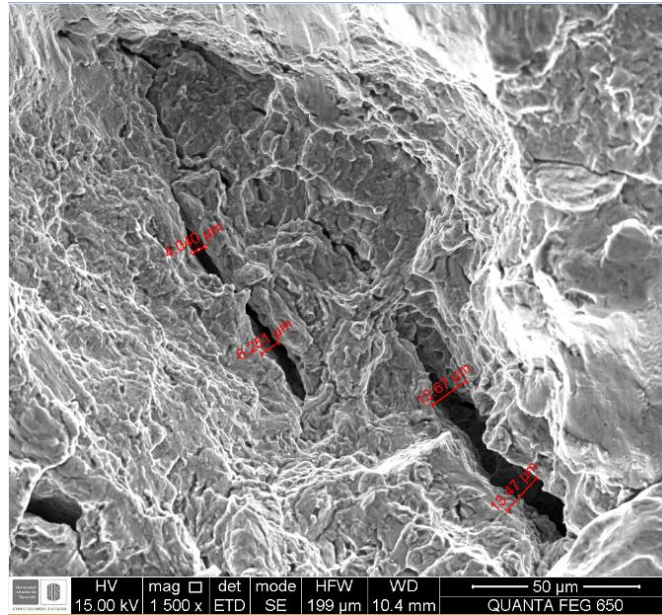


Figura 145 Morfología de Ti6Al4V a 50μm

5 Conclusiones

- Por medio del análisis del modo de fallo del material se concluyó que la aleación de titanio Ti6Al4V presento un comportamiento frágil de tal manera que fue posible identificar las zonas de falla en el área de fractura de las probetas.
- Por medio del análisis realizado en el ensayo de tracción se puede concluir que el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo ultimo son muy próximos, lo cual indica que este material es frágil, pero a su vez este presenta un alargamiento debido a que las probetas fueron fabricadas por EBM, provocando la formación de diferentes tamaños de grieta y por esta razón se genera dicha propiedad.
- En la histéresis de la aleación Ti6Al4V se puede observar que esta presenta una tendencia común de los materiales metálicos frágiles, los cuales tienden a ablandarse a la hora

de ser sometidos a diferentes cargas de inmersión, este fenómeno posiblemente se le puede atribuir a la forma cómo fueron obtenidas las probetas usadas en esta investigación, ya que la fabricación aditiva por fusión de haz de electrones se encarga de fundir el polvo metálico formando capa sobre capa el cual no permite que las partículas se cohesionen entre si generando que el material tenga un comportamiento de un material metálico frágil.

- Al momento de realizar la regresión logarítmica de los datos obtenidos por la ecuación de Coffin-Manson, se puede observar que la curva de deformación elástica toma una tendencia creciente que se le atribuye a que el material presentan unas micro fracturas a medida que se somete a una deformación cíclica controlada y también a la forma como este fue manufacturado, pues la fabricación aditiva EBM realiza una fundición de polvo metálico por fusión de haz de electrones, lo que hace que el material presente una porosidad mayor con respecto a los otros tipos de fabricación convencional.
- Fue posible construir las curvas de fatiga en la zona de ciclos bajos $\mathcal{E} = 2,1723N_f^{-0,006}$ a partir de la ecuación de Coffin-Manso usando los datos adquiridos por medio de los ensayos de fatiga por el método convencional, se tuvo un comportamiento proporcional ya que a medida que aumenta el número de ciclos crece la deformación.
- En la microfractografía se puede observar que la morfología de las probetas falladas por fatiga cíclica se presentan unas grietas secundarias a partir de la nucleación y esto es debido a la alta deformación que está sufriendo el material, a aparte de ello se puede ver que la muestra presenta uno lóbulos que forman una estructura amorfa, lo cual le confiere un comportamiento frágil a las probetas.

6 Recomendaciones

- Se recomienda mayor cantidad de ensayos por cada prueba con el fin de obtener mayor confiabilidad en los resultados en los ensayos de tensión-compresión.
- Realizar pruebas de SEM, usando probetas en las cuales se pueda observar la porosidad del material, con fin de conocer su espesor y así ver cómo afecta los resultados en la prueba de fatiga.
- Utilizar más probetas en la prueba estáticas con fin de conocer las propiedades mecánicas del material y poder definir la condición de deformación a la cual actúa este material.
- Construir la curva de fatiga completa incluyendo la fatiga en bajos y altos ciclos.

Referencias Bibliograficas

- Astm. (2010). Standard test method for constant amplitude of force controlled fatigue testing of acrylic bone cement materials. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/F2118-03R09.2>
- ASTM. (2002). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. *Test, 03*, 4–8. <https://doi.org/10.1520/E0466-07.2>
- ASTM E8/E8M. (2016). Specification ASTM E8. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- ASTM Standard. (2012). E3-01e1 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. *ASTM*, 1–40. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Frederick, C. O., & Armstrong, P. J. (2007). A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. *Materials at High Temperatures*. <https://doi.org/10.3184/096034007x207589>
- Meggiolaro, M. A., & Castro, J. T. P. (2004). Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions. *International Journal of Fatigue*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.10.003>
- Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013a). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0>
- Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013b). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872–3883. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0658-0>
- Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (. (2009). In

Statistical Analysis of Fatigue Data. <https://doi.org/10.1520/stp29332s>

O. H. Basquin, "The exponential law of endurance tests," Proc. Am. Soc. Test. Mater., vol. 10, no. 2, pp. 625–630.