

Influencia del tratamiento térmico post fabricación empleando una aleación de titanio (Ti-6Al-4V), producida mediante tecnologías de fabricación aditiva por fusión de haz de electrones (EBM)

David Alfeiro Rocha Lizarazo, Joan Andrés Coulson Sánchez

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas

Ingeniero Mecánico, MSc, PhD.

Codirector

Abel Antonio Parada Corrales

Ingeniero Mecánico, MSc.

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

2019

Dedicatoria

Ésta meta alcanzada es en honor a la paciencia, dedicación y el esfuerzo inagotable de mis
grandiosos padres.

Mis más sinceros agradecimientos por el apoyo incondicional, por los consejos y recuerdos
que quedan de un grupo de desconocidos. Al final son las mejores personas con las que he
podido compartir un sin número de experiencias; las cuales me han ayudado en mi formación
como persona, y, que a la vez he podido alcanzar mis metas propuestas; de corazón ¡muchas
gracias!

A mis hermanos, quienes siempre han estado ahí para escucharme, aconsejarme y brindarme
su apoyo. Por los disgustos y peleas, las cuales nos han fortalecido cada día. ¡Muchas gracias!

En honor a mi tío Eduardo, por su incondicional cariño y apoyo; por él que jamás olvidare su
ejemplo de un hombre luchador entregado a la vida y al amor de hermosa familia.
Eternamente agradecido.

A mi familia que ha crecido con el pasar del tiempo, los llevo en mi corazón; junto a todos
sus esfuerzos, consejos y apoyo. Aunque sea un ingrato, no los olvido, siempre están
presentes en mis decisiones. A ustedes ¡muchas gracias!

David Alfeiro Rocha Lizarazo

¡Si lo sueñas, es posible!

Federico Moccia

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía.

A mi madre, Margarita, por haberme forjado como la persona que soy actualmente, por su incondicional apoyo en todo momento.

A mis hermanos: Karina y Cadir, porque quiero ser un buen ejemplo para ustedes, aprendan a luchar por sus sueños que con perseverancia todo se puede.

A mis abuelos: Iván y Rosario, por sus consejos y palabras que me han ayudado a crecer como persona y luchar por lo que quiero.

A mis tíos: Carlos, Iván, Liana y Catalina, por estar siempre dispuestos a ayudarme y apoyarme cuando más los necesite.

A mis primas: Vanessa, Laura y Melissa, por su apoyo, cariño y por estar en los momentos más importantes de mi vida.

A mi compañero de proyecto, David, por trabajar mano a mano para la finalización de nuestro proyecto.

A mis amigos: Bayrón, Víctor, Alejandro, Daniel y Camilo, por su constante apoyo emocional, a donde yo este, siempre contarán conmigo.

Finalmente, a todas aquellas personas, que han conformado parte de mi formación todos estos años.

Joan Andrés Coulson Sanchez

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos los espacios, los materiales y el personal. A nuestro director de proyecto Alberto David Pertuz Comas por las accesorias dadas para la realización del proyecto. A la profesora Martha Niño por facilitarnos el préstamo de laboratorio de hornos. A la profesora Elcy Córdoba por el préstamo del material refractario. Al compañero Sair Castellanos Rangel por los servicios prestados en el maquinado de muestras para los ensayos. Al doctor Fernando Viejo y la Ingeniera Sthefany Duran por los materiales y asesoría en el desarrollo de la preparación metalográfica. Al laboratorio de microscopia, sede Guatiguará por los servicios prestados.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción.....	18
1 Objetivos.....	23
1.1 Objetivo General	23
1.2 Objetivos Específico.....	23
2 Marco Metodológico	24
2.1 Obtención de material.....	24
2.2 Tratamientos térmicos	25
2.3 Ensayo de tracción	29
2.4 Microscopia óptica y ensayo de rayado.....	32
2.4.1 Preparación metalográfica.	32
2.4.2 Ataque químico.	33
2.4.3 Microscopia óptica.	34
2.4.4 Ensayo de rayado.....	34
2.5 Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	35
3 Resultados y Discusión.....	36
3.1 Ensayo de tracción	36
3.1.1 Punto de fluencia.	39
3.1.2 Modulo de Young.....	40
3.1.3 Resistencia a la tracción y rotura.....	40
3.1.4 Resiliencia y Tenacidad.....	41
3.1.5 Reducción de área y Elongación.	41

3.2 Ensayo de rayado	42
3.3 Microscopia óptica	44
3.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	47
4 Conclusiones.....	49
5 Recomendaciones.....	50
Referencias Bibliográficas.....	52
Apéndices	55

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Typical mechanical properties for Ti6Al4V</i>	25
Tabla 2. <i>Typical physical properties for Ti6Al4V</i>	26
Tabla 3. <i>Rango de temperaturas de las fases alotrópicas de la aleación Ti-6Al-4V</i>	27
Tabla 4. <i>Datos utilizados en el Diseño Térmico</i>	29
Tabla 5. <i>Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V sin tratamiento térmico</i>	38
Tabla 6. <i>Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V con recocido a 740 [C]</i>	38
Tabla 7. <i>Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V con recocido a 920 [C]</i>	39
Tabla 8. <i>Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V con recocido a 1070 [C]</i>	39
Tabla 9. <i>Tiempo de calentamiento</i>	56
Tabla 10. <i>Iteración de la temperatura superficial para obtener el tiempo de homogenización para la temperatura crítica de 740 C</i>	60
Tabla 11. <i>Iteración de la temperatura superficial para obtener el tiempo de homogenización para la temperatura crítica de 920 C</i>	61
Tabla 12. <i>Iteración de la temperatura superficial para obtener el tiempo de homogenización para la temperatura crítica de 1070 C</i>	61

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> (a) Dimensiones iniciales de las probetas obtenidas por EBM. (b) Mecanizado final probetas.	25
<i>Figura 2.</i> Horno tubular Carbolite CTF 12/65/550.	28
<i>Figura 3.</i> Diagrama Térmico de los Recocidos. Nota: se asume una temperatura ambiente (T amb) de 25 [C].	29
<i>Figura 4.</i> Maquina universal MTS Bionix Servohydraulic Test System de 25 kN de capacidad.	30
<i>Figura 5.</i> Muestra de prueba de tensión redonda estándar de 12,5 mm [0,500 pulg.] Y ejemplos de muestras de tamaño pequeño proporcionales a la muestra estándar. Adaptado de ASTM. (2016). Standard test methods for tension testing of metallic materials metric. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16A	31
<i>Figura 6.</i> Dimensiones de la probeta determinadas según la norma ASTM E8/E8M-16a.	31
<i>Figura 7.</i> Muestras después del ensayo de tracción.	32
<i>Figura 8.</i> (Izquierda). Probeta antes de encapsular. (Derecha). Después de encapsular en resina epoxi.	33
<i>Figura 9.</i> Pulidora automática BUEHLER MetaServ™ 250 Twin.	33
<i>Figura 10.</i> microscopio óptico invertido BUEHLER Viewmet.	34
<i>Figura 11.</i> Tribómetro BRUKER UMT (Universal Mechanical Tester) Tribolab.	35
<i>Figura 12.</i> Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650.	36
<i>Figura 13.</i> Curvas Esfuerzo vs Deformación unitaria del Ti-6Al-4V sin y con tratamiento a diferentes temperaturas.	37
<i>Figura 14.</i> Curva Esfuerzo vs Deformación de probeta 13 sin tratamiento térmico.	40

<i>Figura 15.</i> Curvas Esfuerzo vs Deformación unitaria interpuestas	42
<i>Figura 16.</i> Graficas de Fuerza normal vs penetración para las muestras sin y con recocido a 740, 920 y 1070 [C]. Nota: Los valores representados en el eje de las abscisas (Penetración), difieren ya que es la posición de la herramienta de trabajo (Punta de diamante Vickers).....	43
<i>Figura 17.</i> Graficas de Fuerza de fricción vs fuerza normal para las muestras sin y con recocido a 740, 920 y 1070 [C].....	44
<i>Figura 18.</i> Resultados de microscopía óptica con un acercamiento visual de 100x	45
<i>Figura 19.</i> Resultados de microscopía óptica con un acercamiento visual de 1000x	46
<i>Figura 20.</i> Microscopia electrónica de barrido (SEM) a la aleación Ti-6Al-4V a las probetas tratadas y no tratadas térmicamente.	48
<i>Figura 21.</i> Ensayo Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS).....	49
<i>Figura 22.</i> Esquema de transferencia de calor.	56
<i>Figura 23.</i> Iteración de la temperatura superficial de la probeta a temperatura crítica 1070 C.	62
<i>Figura 24.</i> Iteración de la temperatura superficial de la probeta a temperatura crítica 920 C.	62
<i>Figura 25.</i> Iteración de la temperatura superficial de la probeta a temperatura crítica 740 C.	63
<i>Figura 26.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P220 con un aumento de 50x.	64
<i>Figura 27.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P220 con un aumento de 100x.	64
<i>Figura 28.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P220 con un aumento de 200x.	65
<i>Figura 29.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P320 con un aumento de 50x.	66

<i>Figura 30.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P320 con un aumento de 100x.	66
<i>Figura 31.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P320 con un aumento de 200x.	67
<i>Figura 32.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P400 con un aumento de 50x.	68
<i>Figura 33.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P400 con un aumento de 100x.	68
<i>Figura 34.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P400 con un aumento de 200x.	69
<i>Figura 35.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P600 con un aumento de 50x.	70
<i>Figura 36.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P600 con un aumento de 100x.	70
<i>Figura 37.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P600 con un aumento de 200x.	71
<i>Figura 38.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 50x.	72
<i>Figura 39.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 100x.	72
<i>Figura 40.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 200x.	73
<i>Figura 41.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1500 con un aumento de 50x.	74

<i>Figura 42.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1500 con un aumento de 100x.	74
<i>Figura 43.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1500 con un aumento de 200x.	75
<i>Figura 44.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P2000 con un aumento de 50x.	76
<i>Figura 45.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P2000 con un aumento de 100x.	76
<i>Figura 46.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P2000 con un aumento de 200x.	77
<i>Figura 47.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P4000 con un aumento de 50x.	78
<i>Figura 48.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P4000 con un aumento de 100x.	78
<i>Figura 49.</i> Preparación de la superficial con papel lija de denominación P4000 con un aumento de 200x.	79
<i>Figura 50.</i> Preparación de la superficial con pasta de diamante de 1 micra de tamaño de grano con un aumento de 200x.....	80
<i>Figura 51.</i> Presencia de un poro en la preparación metalográfica con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 100x en la probeta con recocido a 740 C.....	80
<i>Figura 52.</i> Probeta con recocido a 740 C después del ataque químico con un aumento de 100x.	81

Lista de Apéndices

Apéndice A. Cálculo del tiempo de homogenización.....	55
Apéndice B. Apéndice B. Procedimiento y resultados de preparación metalográfica	63

Resumen

Título: Influencia del tratamiento térmico post fabricación empleando una aleación de titanio (ti-6al-4v), producida mediante tecnologías de fabricación aditiva por fusión de haz de electrones (EBM).*

Autores: David Alfeiro Rocha Lizarazo, Joan Andrés Coulson Sánchez.**

Palabras clave: Aleación de titanio Ti-6Al-4V, Tratamiento térmico, Fusión de haz de electrones (EBM)

Descripción

En este proyecto se estudio la microestructura de varias muestras de aleación de Titanio, Ti-6Al-4V fabricada por la nueva tecnología aditiva, se compararon unas probetas que se mecanizaron teniendo presente la norma correspondiente para su posterior ensayo de tracción (ASTM E8/E8M), a las que se les aplico un tratamiento térmico (recocido) en una atmosfera controlada con un gas inerte (argón), a sus diferentes fases que se presentan en los siguientes rangos de temperatura; fase α (entre 700 y 882°C), fase $\alpha+\beta$ (entre 882 -1032°C) y fase β ($\geq 1032^\circ\text{C}$), esta nueva tecnología aditiva en la parte final del proceso, el polvo que se adhiere al objeto permanece en las cavidades internas donde se puede quemar o se dispara, teniendo como resultado una estructura no uniforme, desequilibrada por lo que se quiere observar su microestructura y si las propiedades mecánicas presentadas son aceptables de la forma en la que se obtiene; el estudio de la microestructura se realizó mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) y microscopio óptico y se determinaron las propiedades mecánicas de las muestras mediante los ensayos de tribología (rallado),y tracción. Luego de aplicar el tratamiento térmico y preparar la superficie de las muestras por metalografía, se evidencia en la microestructura de la probeta sin tratar térmicamente y tratadas usando recocido a 740 y 920 [C] una microestructura amorfa, se obtiene inicialmente una fase α formada a lo largo de los límites del grano β , donde a medida que se incrementa la temperatura se obtiene un aumento de la fase β y la fase α cambia de placas delgadas a agujas alargadas formando la cesta o microestructura Widmanstätten donde se aprecia claramente en la muestra tratada térmicamente a 1070 [C]. El recocido influyó en las propiedades mecánicas de la aleación de titanio, como punto de fluencia, módulo de Young y resiliencia aumentaron, mientras la resistencia a la tracción y rotura, tenacidad, reducción de área y elongación disminuyeron. Además, se observó en la gráfica esfuerzo contra deformación unitario a mayor temperatura de recocido menor ductilidad en el material.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingeniería físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: PhD. Alberto David Pertuz Comas, Codirector: MSc. Abel Antonio Parada Corrales

Abstract

Title: Influence of post-manufacturing heat treatment using a titanium alloy (ti-6al-4v), produced by additive manufacturing technologies by electron beam fusion (EBM).*

Authors: David Alfeiro Rocha Lizarazo, Joan Andrés Coulson Sánchez.**

Keywords: Ti-6Al-4V Titanium Alloy, Heat Treatment, Electron Beam Fusion (EBM)

Description

This project studies the microstructure of several samples of Titanium alloy Ti-6Al-4V manufactured by this new additive technology, some specimens that were machined with the corresponding standard in mind for their subsequent testing of (ASTM E8/E8M), to which a heat treatment (annealing) is applied in an atmosphere controlled with an inert gas (argon), to its different phases that occur in the following temperature ranges; phase α (between 700 and 882C), phase $\alpha+\beta$ (between 882-1032C) and phase β 1032C), this new additive technology at the end of the process, the dust that attaches to the object remains in the internal cavities where it can be burned or fired, resulting in a non-uniform structure, unbalanced so that it wants to observe its microstructure and whether the mechanical properties presented are acceptable in the way it is obtained; the study of the microstructure was performed using the scanning electron microscope (SEM) and optical microscope and the mechanical properties of the samples were determined by tribology (scratch), and traction tests. After applying the heat treatment and preparing the surface of the samples by metallography, it is evident in the microstructure of the untreated specimen thermally and treated using annealed 740 and 920 [C] an amorphous microstructure, an amorphous microstructure is initially obtained, a phase α formed along the boundaries of the grain β , where as the temperature increases you get an increase in the phase β and the phase α changes from thin plates to elongated needles forming the basket or microstructure Widmanstätten where it is clearly seen in the m We are heat treated at 1070 [C]. The annealing influenced the mechanical properties of titanium alloy, such as creep point, Young's module and resilience increased, while tensile and tear strength, toughness, area reduction and elongation decreased. In addition, the graph was observed to stress against unit deformation at higher temperature of annealing lower ductility in the material.

* Degree Project

** Faculty of Physicalmechanical Engineering.. Mechanical Engineering School . Director: PhD. Alberto David Pertuz Comas, CoDirector: MSc. Abel Antonio Parada Corrales

Introducción

El titanio es el noveno elemento y el séptimo metal más abundante sobre la corteza terrestre, se encuentra en la parte central de la tabla periódica, más concretamente en el bloque d, es conocido como un elemento de transición, las características son tener parcialmente lleno el orbital d, elevada dureza, puntos de fusión y ebullición altos, por tener una densidad menor al acero es un metal ligero, su estructura cristalina a temperatura ambiente es hexagonal compacta (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2019).

Fue descubierto en 1790 por el reverendo William Gregor, un geólogo aficionado, que encontró titanio en una arena negra (ilmenita – FeTiO_3) en las playas de Cornualles en Inglaterra, aunque 5 años después un químico alemán, Martin Heinrich Klaproth, reconoció un dióxido del mismo metal en el mineral de rutilo (TiO_2) y lo llamó al elemento “titanio” en honor a los titanes, sin embargo, sus intentos de aislar el metal fracasaron. En 1910, un químico estadounidense M.A. Hunter, quien se encontraba en busca de un metal con un punto de fusión alto para filamentos eléctricos, logro extraer el elemento del mineral, aunque el punto de fusión era bajo para los filamentos previstos, este acontecimiento marco el nacimiento de la industria del titanio. La alta pureza del titanio obtenida del proceso hunter contribuyó en gran medida a la aceptación de este, especialmente en la industria del polvo de titanio. En 1930, Anto Eduard Van Akel y Jan Hendrik de Boer logran extraer un titanio con una pureza del 99,995% mediante el proceso de yodo. Alrededor de la década de 1930, el doctor Wilhelm Kroll inventó el primer método industrial viable a gran escala para reducir el titanio, el cual lleva su nombre, en lugar de usar sodio como agente reductor, el proceso Kroll emplea magnesio.

El titanio atrajo la atención del Departamento de Defensa de EE. UU. en 1946 como la mejor respuesta a los problemas de diseño de aviones de alto rendimiento. Kathleen L. Housley, en su libro “Black sand, the History of Titanium”(Titanium Association International, 2016b),

destacó que alrededor de la década de 1950 se llevaba una extensiva investigación de alrededor de 3000 aleaciones de titanio, reveló que el titanio y sus aleaciones tienen una baja resistencia a fenómenos de fluencia en caliente con respecto a su alto punto de fusión, aunque en esos momentos en la industria de la aviación el porcentaje de titanio en una aeronave era de aproximadamente del 90%. Este hallazgo, junto con el cambio de perspectiva en el sector aeronáutico, provocó una disminución en el interés acerca del titanio en el campo de la ingeniería, cediéndolo a aplicaciones donde se emplean combinaciones de propiedades únicas(Bolzoni, 2011).

Debido a la guerra fría entre Estados Unidos y la Unión Soviética, ayudó a sentar las bases para el desarrollo de un mercado internacional competitivo. Los estadounidenses se enfocaron en las aplicaciones de titanio para la industria aeroespacial, mientras los soviéticos se centraron en la producción de submarinos.

Desde finales de la década de 1950, se resalta la resistencia a la corrosión del titanio permitiendo ser un candidato para usos industriales. En 1959, se instaló tubería de titanio en intercambiadores de calor de plantas de energía enfriados con agua de mar, debido a este éxito, los fabricantes de titanio buscaron aplicaciones industriales, tales que, en 1971, la primera planta de energía en utilizar condensadores de superficie tubular de titanio entró en funcionamiento y en 1975, esta fue la aplicación industrial de más rápido crecimiento. La industria de procesamiento químico lo emplea para intercambiadores de calor, equipos de flujo de proceso y recipientes. Para la industria del petróleo y el gas, es crucial en la exploración y producción en alta mar y el procesamiento de hidrocarburos. También es usado en productos de consumo, desde monturas de gafas, joyas, como material arquitectónico, partes de autos, en palos de golf hasta en bicicletas. El titanio mejora la calidad de vida individual cuando se usa para implantes médicos y dentales, dispositivos protésicos, anteojos e incluso en sillas de ruedas livianas. Para el 2006 se estimaron los envíos mundiales en más de 60.000 toneladas

métricas de las cuales al menos el 50% se utilizó en aplicaciones distintas a la aeroespacial. (Titanium Association International, 2016b)

La aleación Ti-6Al-4V es la más empleada en la industria aeronáutica con el tratamiento térmico de recocido para la fabricación de estructuras y motores de aviones, ya que sus propiedades pueden ser optimizadas mediante este; las aplicaciones varían entre los componentes estructurales como el fuselaje, las alas o el tren de aterrizaje hasta los componentes estáticos como conductos de escape, marcos de ventanillas o uniones críticas de aletas verticales al fuselaje y los componentes móviles como discos y paletas de compresores de baja presión.(Bolzoni, 2011). En las aplicaciones relacionadas con la industria química y ambientes corrosivos se utiliza en el sector de generación de energía y en particular, para la fabricación de álabes de turbinas de vapor y en el sector del transporte naval.(Singh, Gabbitas, & Zhang, 2013).

En la industria biomédica, son muy utilizadas como implantes biomédicos, tales como dentales, ortopédicos, debido a sus buenas propiedades mecánicas y químicas, además de ser un material con una alta biocompatibilidad y buena osteointegración (una rápida y buena capacidad de ser parte de los huesos y los otros tejidos humanos.), el elemento titanio y la aleación Ti-6Al-4V llegaron a ser los primeros materiales en ser empleados y que aún se usan pero debido a los efectos de citotóxicos a largo plazo se han desarrollado otras aleaciones como Ti-13Nb-13Zr son completamente biocompatibles.(Jung, Semboshi, Masahashi, & Hanada, 2013). En cuanto a la industria automovilística esta aleación es empleada en diversas partes como ejes, muelles de suspensión, sistemas de escape (Titanio) y válvulas o rotores de turbocompresores. En el deporte es muy bien aceptado por la relación peso/resistencia, obteniendo equipos más ligeros, un bajo módulo de Young y una alta resistencia a la corrosión.(Froes, Friedrich, Kiese, & Bergoint, 2004).

El titanio no se ha podido llevar a nivel de producción industrial debido al alto precio de obtención y fabricación, por lo que se han desarrollado una gran variedad de procedimientos de elaboración de metales convencionales para formar, mecanizar y unir titanio y sus aleaciones, tales como en la soldadura se realiza fácilmente en el vacío, pero es necesario eliminar los gases reactivos (incluidos oxígeno, nitrógeno y aire), las más comunes son la soldadura por medio del proceso de gas inerte de tungsteno (TIG) usando protección de gas argón y el gas inerte de metal (MIG) (Titanium Association International, 2016a), aunque también encontramos sinterización selectiva por láser (SLS), sinterización de metal directa por láser (DMLS), sinterización selectiva por calor (SHS), fusión selectiva por láser (SLM), entre otras tecnologías de fabricación aditiva, en este proyecto se obtuvieron 12 probetas de un convenio con Instituto Tecnológico Metalmecánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines (AIDIMME), una aleación de titanio Ti-6Al-4V por medio de una de las nuevas tecnologías de fabricación aditiva, fusión de haz de electrones (EBM).

Una de las grandes ventajas de estas tecnologías de fabricación aditiva es la obtención de piezas de geometría compleja o piezas especiales, a su vez una de las desventajas es la dificultad para una producción industrial de bajo costo y grandes cantidades de piezas, por lo que se justifica el empleo de estos métodos cuando la pieza es pequeña y de menor producción, más sentido va a tener el empleo de estas tecnologías de fabricación aditiva. La fusión por haz de electrones (EBM), se inicia con la elevación de la temperatura del polvo hasta el punto de fusión entre 400 y 1000°C dependiendo del material, ello implica mejores propiedades mecánicas y microestructurales, además de ausencia de oxidación al fundir el polvo en atmósfera de vacío, se destaca por la capacidad de procesar cualquier material conductor eléctrico y por último no tiene problemas de reflexión en el material fundido como ocurre en las tecnologías láser, además esta tecnología es la de mayor productividad que las otras tecnologías aditivas basadas en láser (Blasco & Martínez, 2015).

Se estudiará una posible solución al aplicar un tratamiento térmico en un proceso de fabricación o transformación de masa que se obtiene de una materia prima. Este tratamiento térmico modificara sus propiedades mecánicas sin variar su composición química, debido a que este método de fabricación da como resultado un material bastante poroso, lo que implica propiedades mecánicas inferiores. Este método se caracteriza por tener altos costos en la preparación de la materia prima, baja velocidad de producción, buena calidad superficial y precisión dimensional.

Con el fin de estudiar la microestructura de una aleación de Titanio Ti-6Al-4V antes y después de la aplicación de varios tratamientos térmicos, los cuales se seleccionan de acuerdo con una temperatura entre sus fases alotrópicas como: la fase α en el rango 700°C y 882°C, la fase α/β entre los 882°C y los 1030°C y la fase β mayor a los 1030°C (Torreblanca, 2016).

Por medio de ensayos de dureza y tracción se podrá comparar las propiedades mecánicas de esta aleación de titanio Ti-6Al-4V antes y después de la aplicación de los tratamientos térmicos sobre probetas de esta aleación, de acuerdo con la norma correspondiente a cada ensayo.

Se evaluará por medio de ensayo tribológico a las probetas de una aleación de titanio (Ti-6Al-4V), para conocer si hay algún cambio en su resistencia al rayado mediante el análisis experimental utilizando una máquina de tribología a las probetas modificadas y no modificadas por los tratamientos térmicos, porque este método es sencillo, versátil y económico de usar en condiciones controladas de laboratorio.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar la influencia del tratamiento térmico sobre una aleación de titanio (Ti-6Al-4V), producida mediante tecnologías de fabricación aditiva por fusión de haz de electrones (EBM).

1.2 Objetivos Específico

Modificar la microestructura sin variar la composición química de una aleación de titanio (Ti-6Al-4V), fabricada por las nuevas tecnologías aditivas, fusión de haz de electrones (EBM) mediante un tratamiento térmico a diferentes temperaturas, posteriormente se enfriará en una atmosfera controlada de un gas noble (argón).

Determinar la influencia del tratamiento térmico (recocido) en las propiedades mecánicas de una aleación de titanio (Ti-6Al-4V) obtenida por las nuevas tecnologías aditivas, fusión de haz de electrones (EBM).

Evaluar la resistencia al rayado de las superficies no modificadas y modificadas estructuralmente de una aleación de titanio (Ti-6Al-4V) por un tratamiento térmico, estudiando sus propiedades en un ensayo tribológico (rayado).

Establecer la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas utilizando métodos metalográficos y un ensayo de tribología antes y después de la modificación microestructural de la aleación de titanio (Ti-6Al-4V).

2 Marco Metodológico

2.1 Obtención de material

Al contribuir con la misión social de la Universidad Industrial de Santander y fortalecer los lazos entre instituciones educativas se suministran 12 probetas de la aleación de titanio (Ti 6Al 4V) de un convenio entre la Universidad Industrial de Santander con el Instituto Tecnológico Metalmecánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines (AIDIMME) en Valencia, España. Estas muestras se entregaron en forma cilíndrica de 108 mm de longitud y 14 mm de diámetro. (ver figura 1(a)).

El material se fabricó con un método innovador llamado fusión por haz de electrones (EBM), el cual es una técnica de fabricación aditiva que aplica una sucesión de capas metálicas en base a un diseño asistido por computadora. La temperatura del polvo se eleva hasta el punto de fusión, luego con un haz de electrones se produce la geometría de la pieza previamente diseñada por computadora, eliminando la necesidad de un procesamiento posterior y acabado.

Inicialmente se eligió la tracción como la manera de caracterizar las muestras, por lo que se prepararon las probetas en un torno de control numérico computarizado (CNC), para obtener un mejor acabado superficial y una alta precisión en las dimensiones de las probetas dadas según la norma ASTM E8/E8M-16^a(ASTM, 2016) (ver figura 1(b)).

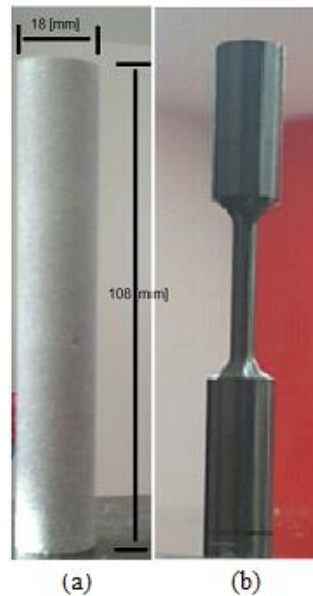


Figura 1. (a) Dimensiones iniciales de las probetas obtenidas por EBM. (b) Mecanizado final probetas.

2.2 Tratamientos térmicos

Inicialmente se planteó buscar información sobre las propiedades comerciales de la aleación Ti-6Al-4V, se encontraron en la página web AZO Materials (ver tabla 1)(U.S. Titanium Industry Inc., 2002), con estos datos, las dimensiones de la probeta y las propiedades físicas de material (ver tabla 2), se realizó una simulación de transferencia de calor para determinar el tiempo en alcanzar la temperatura de la fase ($T_{\text{crítica}}$) y el tiempo necesario al cual la probeta se encuentra a la misma temperatura en cualquier fracción de esta.

Tabla 1. *Typical mechanical properties for Ti6Al4V.*

Property	Minimum	Typical Value
Tensile Strength MPa (ksi)	897 (130)	1000 (145)
0.2% Proof Stress MPa (ksi)	828 (120)	910 (132)

Elongation Over 2 Inches %	10	18
Reduction in Area %	20	
Elastic Modulus GPa (Msi)		114 (17)
Hardness Rockwell C		36
Specified Bend Radius <0.070 in x Thickness		4.5
Specified Bend Radius >0.070 in x Thickness		5.0
Welded Bend Radius x Thickness	6	
Charpy, V-Notch Impact J (ft.lbf)		24 (18)

Nota: Adaptado de U.S. Titanium Industry Inc. (2002). Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5. Retrieved August 8, 2019, from Titanium Information Group. website: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>.

Tabla 2. *Typical physical properties for Ti6Al4V.*

Property	Typical Value
Density g/cm ³ (lb/ cu in)	4.42 (0.159)
Melting Range °C±15°C (°F)	1649 (3000)
Specific Heat J/kg.°C (BTU/lb/°F)	560 (0.134)
Volume Electrical Resistivity ohm.cm (ohm.in)	170 (67)
Thermal Conductivity W/m.K (BTU/ft.h.°F)	7.2 (67)

Mean Co-Efficient of Thermal Expansion 0-100°C /°C (0-212°F /°F)	8.6x10 ⁻⁶ (4.8)
Mean Co-Efficient of Thermal Expansion 0-300°C /°C (0-572°F /°F)	9.2x10 ⁻⁶ (5.1)
Beta Transus °C±15°C (°F)	999 (1830)

Nota: Adaptado de U.S. Titanium Industry Inc. (2002). Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5. Retrieved August 8, 2019, from Titanium Information Group. website: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>.

Se realizaron tres tratamientos térmicos, todos recocidos con el fin de modificar las propiedades mecánicas, disminuir las tensiones internas de las probetas y equilibrar la microestructura que se halla alterado por el proceso de fabricación. Los tratamientos térmicos se llevaron a cabo en un horno tubular marca Carbolite CTF 12/65/550 (figura 2), con atmosfera controlada de argón en el laboratorio de hornos de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará. La aleación Ti-6Al-4V normalmente se encuentra a temperatura ambiente en su fase α/β (alfa/beta), se puede encontrar en tres fases a elevar su temperatura en los rangos mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Rango de temperaturas de las fases alotrópicas de la aleación Ti-6Al-4V

Fase	Rango de temperatura [°C]
α	700 - 882
α/β	882-1032
β	>1032

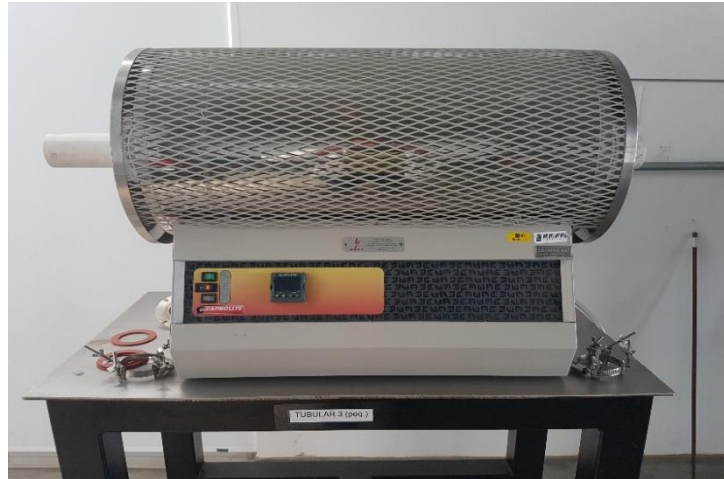


Figura 2. Horno tubular Carbolite CTF 12/65/550.

En 1958, Apraiz mencionó en su libro tratamientos térmicos, se suele hacer el recocido de 20° - 40° por encima de la temperatura crítica (p 79). De lo anterior se opta por las siguientes temperaturas críticas para obtener la aleación Ti-6Al-4V en cada una de sus fases; fase α a 740°C], fase α/β a 920°C] y fase β a 1070°C]. Las condiciones para realizar la etapa de calentamiento dependieron de la capacidad del horno, por lo tanto, la máxima velocidad de calentamiento disponible era de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$] ($300^{\circ}\text{C}/\text{h}$]), el tiempo de sostenimiento calculado fue de 2 horas para garantizar la uniformidad de la temperatura en la probeta. Para el enfriamiento lento, se programó para las muestras un tiempo de 12 horas hasta llegar a los 100°C , en donde posterior se apagó el horno. En la figura 3 se puede observar el diagrama térmico y en la tabla 4 se pueden ver cada uno de los valores utilizados.

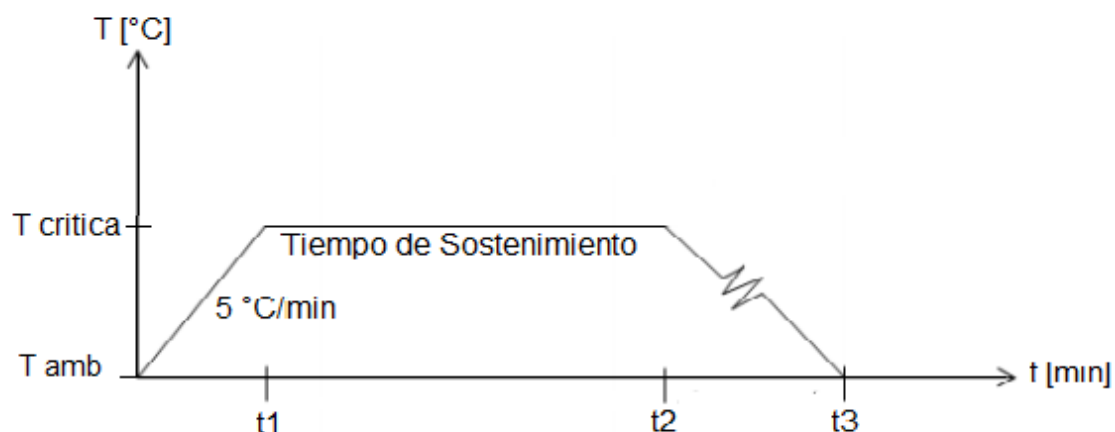


Figura 3. Diagrama Térmico de los Recocidos. Nota: se asume una temperatura ambiente (T_{amb}) de 25 [C].

Tabla 4. Datos utilizados en el Diseño Térmico.

$T_{critica}$	$t1$	$t2$	$t2-t1$	$t3-t2$
[°C]	[min]	[min]	[min]	[min]
740	143	263	120	720
920	179	299	120	720
1070	209	329	120	720

2.3 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó en el laboratorio de ensayos mecánicos en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, usando la norma ASTM E8/E8M–16a (ASTM, 2016) en una máquina universal MTS Bionix Servohydraulic Test System de 25 kN de capacidad (ver figura 4) a una velocidad de avance de 1,5 mm/min. En la sección 6.4.2 de la norma (ver figura 5) encontramos las medidas estandarizadas de las cuales empleamos para realizar una regresión lineal al aplicar la ley de Hooke, donde se obtiene el diámetro de la probeta para dimensionar la (ver figura 6). Las siguientes ecuaciones empleadas son la deformación y esfuerzo axial respectivamente:

Ecuación 1. Deformación axial

$$\delta = \frac{P * L}{A * E}$$

Ecuación 2. Esfuerzo axial

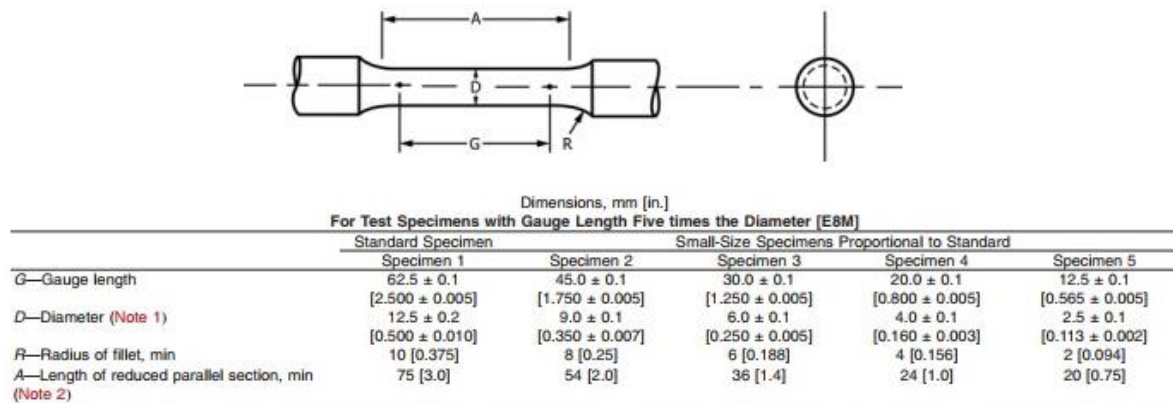
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde P es la capacidad de la máquina de tracción, L es la longitud de trabajo (cuello de la probeta), A es el área de la sección transversal (área mínima de la sección normal a la fuerza aplicada) y E es el módulo de elasticidad de Young de la aleación Ti-6Al-4V.

Los datos obtenidos en el ensayo de tracción son la fuerza axial aplicada, el tiempo de aplicación y la deformación respecto a la fuerza máxima axial aplicada sobre la muestra. En la figura 7 se observa las probetas modificadas y no modificadas después de la prueba de tracción.



Figura 4. Maquina universal MTS Bionix Servohydraulic Test System de 25 kN de capacidad.



NOTE 1—The reduced parallel section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center (controlling dimension).

NOTE 2—If desired, the length of the reduced parallel section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gauge length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gauge length.

NOTE 3—The gauge length and fillets may be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the force shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

NOTE 4—On the round specimens in Figs. 8 and 9, the gauge lengths are equal to four [E8] or five times [E8M] the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 [E8] or 5-to-1 [E8M] ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

NOTE 5—The use of specimens smaller than 6-mm [0.250-in.] diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

NOTE 6—For inch/pound units only: Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit easy calculations of stress from loads, since the corresponding cross-sectional areas are equal or close to 0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in.², respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these five diameters do not result in correspondingly convenient cross-sectional areas and multiplying factors.)

Figura 5. Muestra de prueba de tensión redonda estándar de 12,5 mm [0,500 pulg.] Y ejemplos de muestras de tamaño pequeño proporcionales a la muestra estándar. Adaptado de ASTM. (2016). Standard test methods for tension testing of metallic materials metric. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16A.

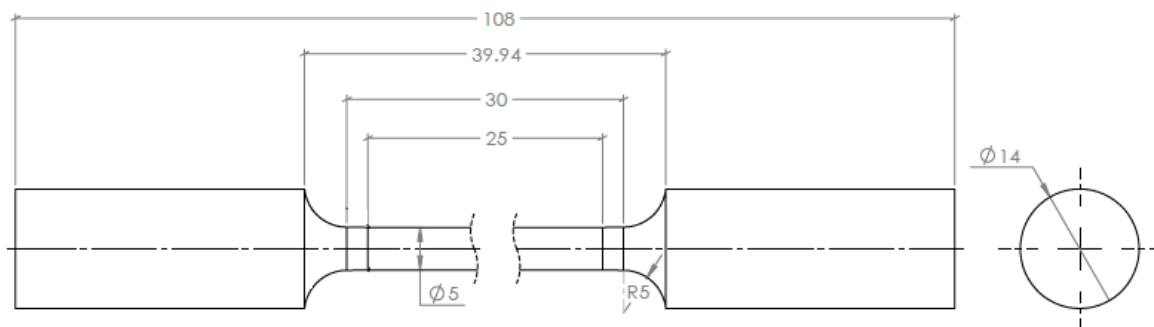


Figura 6. Dimensiones de la probeta determinadas según la norma ASTM E8/E8M-16a.



Figura 7. Muestras después del ensayo de tracción.

2.4 Microscopia óptica y ensayo de rayado

2.4.1 Preparación metalográfica. Para la preparación metalográfica inicialmente se cortaron 4 cilindros de 5 mm de diámetro con 10 mm de longitud, a partir de las probetas usadas en el ensayo de tracción, se empleó parte de la sección de la longitud de trabajo de la probeta (ver figura 8). Se aplicó la norma ASTM E3-11 (ASTM International, 2017), la cual tiene como objetivo principal preparar las probetas para observar los elementos y estructura de diferentes metales y aleaciones por medio de un microscopio óptico. Seguidamente se encapsularon las muestras en una resina epoxi para aumentar el área de trabajo (ver figura 8), manteniendo la condición de dos caras paralelas, posteriormente se realizó el proceso de desbaste con papel abrasivo de tamaño de grano P150, 220, 320, 400, 600, 1200, 1500, 2000 y 4000, finalizando el pulido con pasta de diamante de 1 micrómetro en pulidora automática BUEHLER MetaServ™ 250 Twin (ver figura 9) hasta tener una superficie tipo espejo.

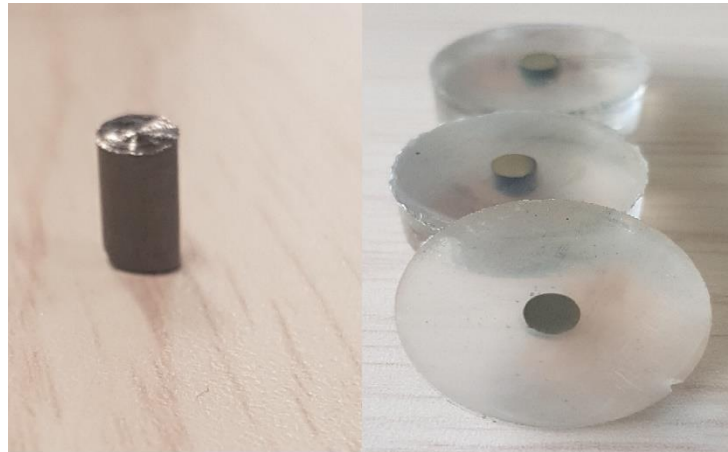


Figura 8. (Izquierda). Pobreta antes de encapsular. (Derecha). Después de encapsular en resina epoxi.



Figura 9. Pulidora automática BUEHLER MetaServ™ 250 Twin.

2.4.2 Ataque químico. Para el ensayo metalográfico se realizó un ataque químico a las muestras una vez alcanzada la superficie tipo espejo, siguiendo la norma ASTM E 407-07 (ASTM, 2015) durante 30 segundos con reactivo Kroll (92 ml H₂O + 6 ml HNO₃ + 2 ml HF) con lo cual se puede apreciar la microestructura de la aleación de titanio en sus diferentes fases alcanzadas mediante el recocido.

2.4.3 Microscopia óptica. La caracterización de la aleación Ti-6Al-4V tratadas y no tratadas térmicamente, se realizaron en un microscopio óptico invertido BUEHLER Viewmet (ver figura 10) en el laboratorio de metalografía en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, para apreciar el tamaño y límite del grano en las muestras.



Figura 10. microscopio óptico invertido BUEHLER Viewmet

2.4.4 Ensayo de rayado. El ensayo de rayado se realizó en un Tribómetro BRUKER UMT (Universal Mechanical Tester) Tribolab (ver figura 11) en el laboratorio de metalografía en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, se utilizó la norma ASTM D 7027- 13 (ASTM, 2017) con una punta de diamante en forma de Vickers, aplicando una carga progresiva de 0 a 100 [gf] en una longitud de rayado de 2 [mm] y a una velocidad de 0,017 [mm/s].



Figura 11. Tribómetro BRUKER UMT (Universal Mechanical Tester) Tribolab.

2.5 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Con el fin de estudiar la morfología se tomaron muestras de 5 mm de diámetro con aproximadamente 10 mm de alto inmediatamente de la sección donde ocurrió la fractura en la prueba de tracción, se ubicaron sobre un stubs metálico con cinta adhesiva de carbón en un microscopio electrónico de barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 (ver figura 12) en el laboratorio de microscopia de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguará, en la cual se tomaron imágenes a alto vacío y un voltaje de aceleración de 15 kV con el detectores de imágenes Electrones secundario (SE), para observar la morfología y el detector Electrones retro-dispersados (BSE), para observar variaciones de composición.

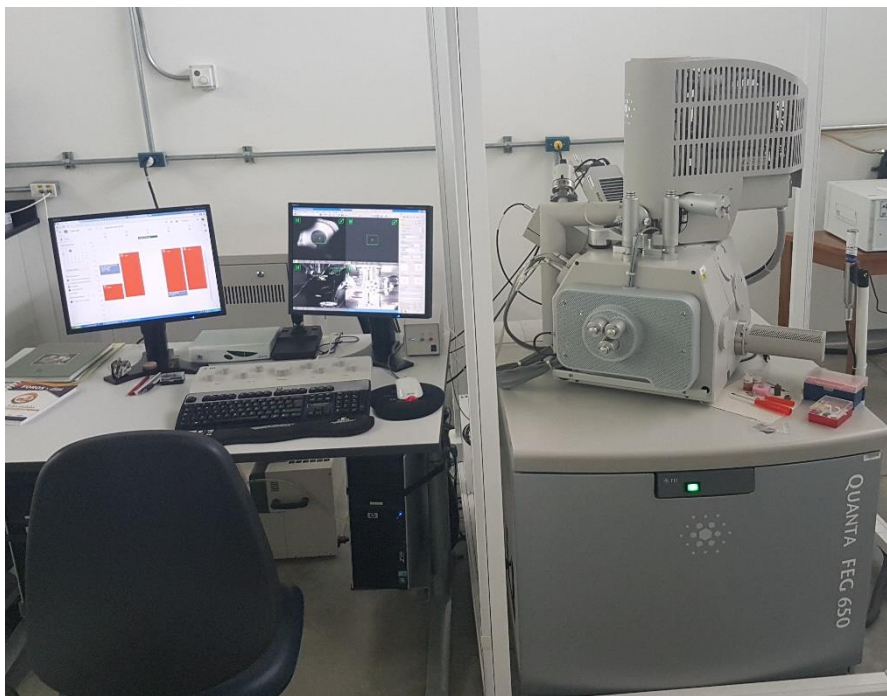


Figura 12. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650.

3 Resultados y Discusión.

En el siguiente apartado se planteará el procedimiento del estudio de los resultados obtenidos en las diferentes formas de caracterizar la aleación Ti-6Al-4V no modificada y modificada por un tratamiento térmico (Recocido).

3.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción suministro los datos de tiempo transcurrido, carga y desplazamiento axial de la aleación Ti-6Al-4V modificadas y no modificadas por un tratamiento térmico. En la figura 13 se observa las gráficas de esfuerzo vs deformación unitaria de las probetas sin tratamiento,

con tratamiento térmico a 740, 920 y 1070 [C]. El esfuerzo es la relación entre la carga axial y el área transversal inicial de la sección reducida de las probetas y la deformación unitaria es la relación entre el desplazamiento axial y la longitud inicial de las muestras.

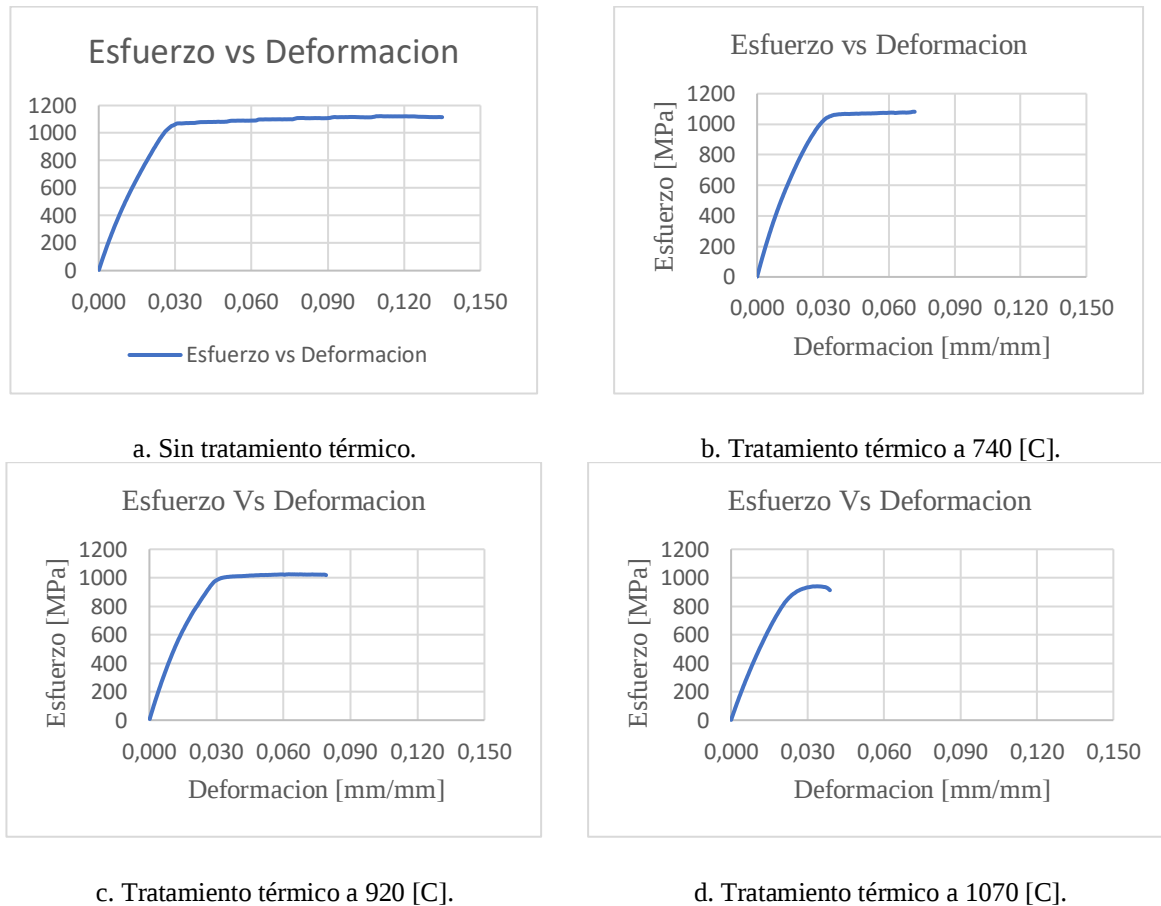


Figura 13. Curvas Esfuerzo vs Deformación unitaria del Ti-6Al-4V sin y con tratamiento a diferentes temperaturas.

Usando los procedimientos de la norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2016) y de las curvas de esfuerzo vs deformación de la aleación de Ti-6Al-4V sin y con recocido a 740, 920 y 1070 C, se determinan las propiedades mecánicas mostradas en las tablas 5,6,7 y 8 respectivamente.

Tabla 5. *Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V sin tratamiento térmico.*

Propiedad	Probeta		Promedio	Unidad
	13	5		
Punto de fluencia	596,6	699,7	648,2	MPa
Módulo de Young	52	47,7	49,9	GPa
Resistencia a la tracción	1122,6	1069,9	1096,2	MPa
Resistencia de rotura	1115,1	1057,5	1086,3	MPa
Resiliencia	4,2	6,2	5,2	MPa
Tenacidad	134,6	119	126,9	MPa
Reducción de área	4,2	9,8	7,0	%
Elongación	10,5	10,0	10,2	%

Tabla 6. *Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V con recocido a 740 [C].*

Propiedad	Probeta			Promedio	Unidad
	9	2	21		
Punto de fluencia	454,8	528,1	541,7	508,2	MPa
Módulo de Young	50,7	50,5	49	49,8	Gpa
Resistencia a la tracción	1048,6	1113,0	1081,6	1081,1	MPa
Resistencia de rotura	1046,6	1111,2	1081,3	1079,7	MPa
Resiliencia	2,3	3,3	3,5	3	MPa
Tenacidad	44,2	72,6	62,7	59,8	MPa
Reducción de área	2,6	1,3	7,2	3,7	%
Elongación	8,7	6,2	9,6	8,2	%

Tabla 7. *Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V con recocido a 920 [C].*

Propiedad	Probeta			Promedio	Unidad
	17	18	38		
Punto de fluencia	473,5	526,7	473,4	491,2	MPa
Módulo de Young	47,2	46,8	47,7	47,2	Gpa
Resistencia a la tracción	1008,0	1032,6	1024,5	1021,7	MPa
Resistencia de rotura	1004,3	1028,1	1018,3	1016,9	MPa
Resiliencia	2,6	3,4	2,6	2,9	MPa
Tenacidad	58,7	91,9	67,4	72,7	MPa
Reducción de área	4,0	8,5	5,9	6,1	%
Elongación	7,1	8,2	7,9	7,7	%

Tabla 8. *Propiedades mecánicas del Ti-6Al-4V con recocido a 1070 [C].*

Propiedad	Probeta			Promedio	Unidad
	11	26	29		
Punto de fluencia	417,1	681,5	467,4	522	MPa
Módulo de Young	48,5	45,6	47,1	47,1	GPa
Resistencia a la tracción	940,0	945,9	915,7	933,8	MPa
Resistencia de rotura	912,6	930,4	898,6	913,9	MPa
Resiliencia	2	6	2,5	3,5	MPa
Tenacidad	25,8	81,3	19,7	42,3	MPa
Reducción de área	3,9	7,2	6,6	5,9	%
Elongación	3,3	9,8	3,3	5,5	%

3.1.1 Punto de fluencia. Para materiales dúctiles, el inicio de la fluencia no está caracterizado por una porción horizontal de la curva deformación vs esfuerzo. En el numeral 7.7.1 de la norma correspondiente se emplea la gráfica esfuerzo vs deformación donde primero

se traza la línea OA (línea proporcional), a continuación, se dibuja una línea recta mn paralela a OA a una distancia del 2% de la deformación total de la probeta, donde el intercepto con la gráfica se nombra punto r y este es el valor del punto de fluencia (ver figura 14). El recocido a 1070 [C] presenta un mejor comportamiento al punto de fluencia entre las probetas tratadas térmicamente, aunque disminuyó con respecto a las probetas no tratadas térmicamente.

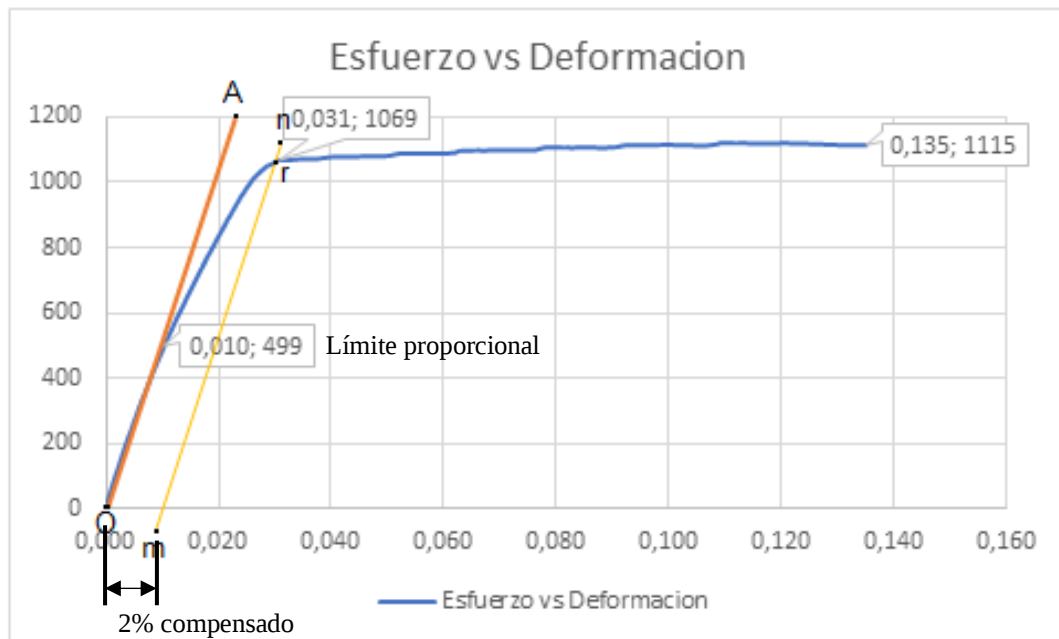


Figura 14. Curva Esfuerzo vs Deformación, método de compensado.

3.1.2 Modulo de Young. En la gráfica esfuerzo vs deformación es la pendiente de la zona proporcional y se calcula como el cociente de la diferencia del esfuerzo con respecto a la deformación unitaria hasta el límite proporcional de la muestra. La probeta con recocido a 740 y 1070 [C] presenta el mayor y menor módulo de Young respectivamente.

3.1.3 Resistencia a la tracción y rotura. Resistencia a la tracción se define como el valor máximo de la curva esfuerzo vs deformación unitaria (punto a carga máxima) y el de rotura como el valor del esfuerzo al cual la probeta falla. La aleación Ti-6Al-4V sin y con recocido a

740, 920 y 1070 [C] presentan una resistencia a la tracción y rotura decreciente a medida que aumenta la temperatura del tratamiento térmico.

3.1.4 Resiliencia y Tenacidad. En la curva esfuerzo vs deformación unitaria, la resiliencia se determina con el cálculo del área bajo la curva de la zona elástica y tenacidad se determina con el cálculo del área bajo toda la curva.

El tratamiento térmico redujo la zona elástica, una reducción en la capacidad de absorber energía cuando se deforma elásticamente, siendo el recocido a 1070 [C] el de mayor resiliencia entre las probetas tratadas térmicamente. A su vez se presenta una disminución en su tenacidad debido a la fragilidad que presentaron.

3.1.5 Reducción de área y Elongación. La reducción de área es la diferencia de área inicial y final dividida entre el área inicial, igualmente la elongación es el cociente de la longitud final menos la inicial con la inicial dadas en porcentaje.

En la figura 15 se observan las curvas de esfuerzo vs deformación para las probetas sin y con tratamiento térmico (TT) a 740, 920 y 1070 [C], se aprecia que la probeta sin tratamiento térmico presenta una mayor elongación es decir presenta una mayor ductilidad comparada con las probetas tratadas térmicamente, además las probetas con recocido a 1070 [C] muestran un comportamiento de muy baja fragilidad.

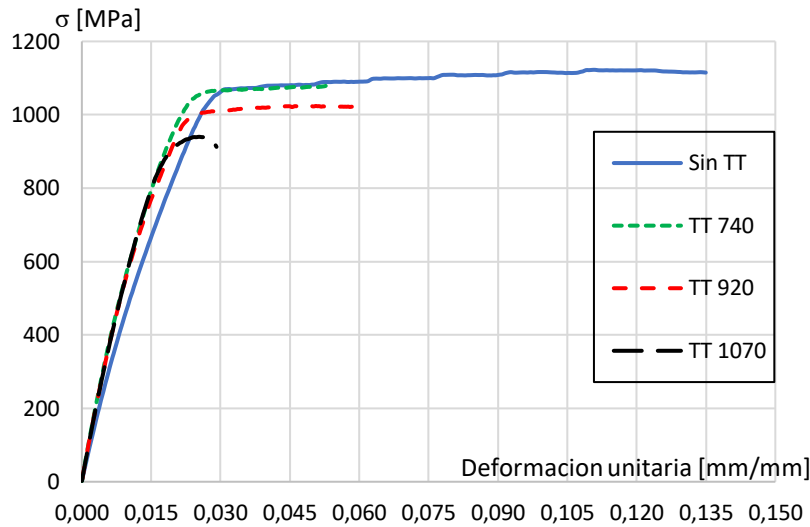


Figura 15. Curvas Esfuerzo vs Deformación unitaria de las probetas sin y con tratamiento térmico sobrepuestas.

3.2 Ensayo de rayado

En el ensayo de rayado se empleó la superficie preparada por metalografía debido a la magnitud de la fuerza usada en el ensayo, para fuerzas menores a 1Kgf se considera un ensayo micro por lo que requiere de una superficie preparada, en el ensayo de rayado se empleó una fuerza de 100 gf. Los resultados obtenidos por el tribómetro Bruker UMT son el coeficiente de rozamiento, la fuerza normal aplicada en cada instante de la prueba en [gf], la profundidad de la penetración permitida por la aleación Ti-6Al-4V en [μ m] y fuerza de fricción en [gf].

En la figura 16 se observan las diferentes penetraciones a cada muestra tratada y no tratada térmicamente, donde la muestra con recocido a 1070 [C] (ver figura 16-d) presenta una mayor penetración con respecto a la muestra no tratada térmicamente (ver figura 16-a), es decir tiene una menor dureza. La muestra que obtuvo menor penetración, es decir mayor dureza es la muestra tratada térmicamente a 920 [C].

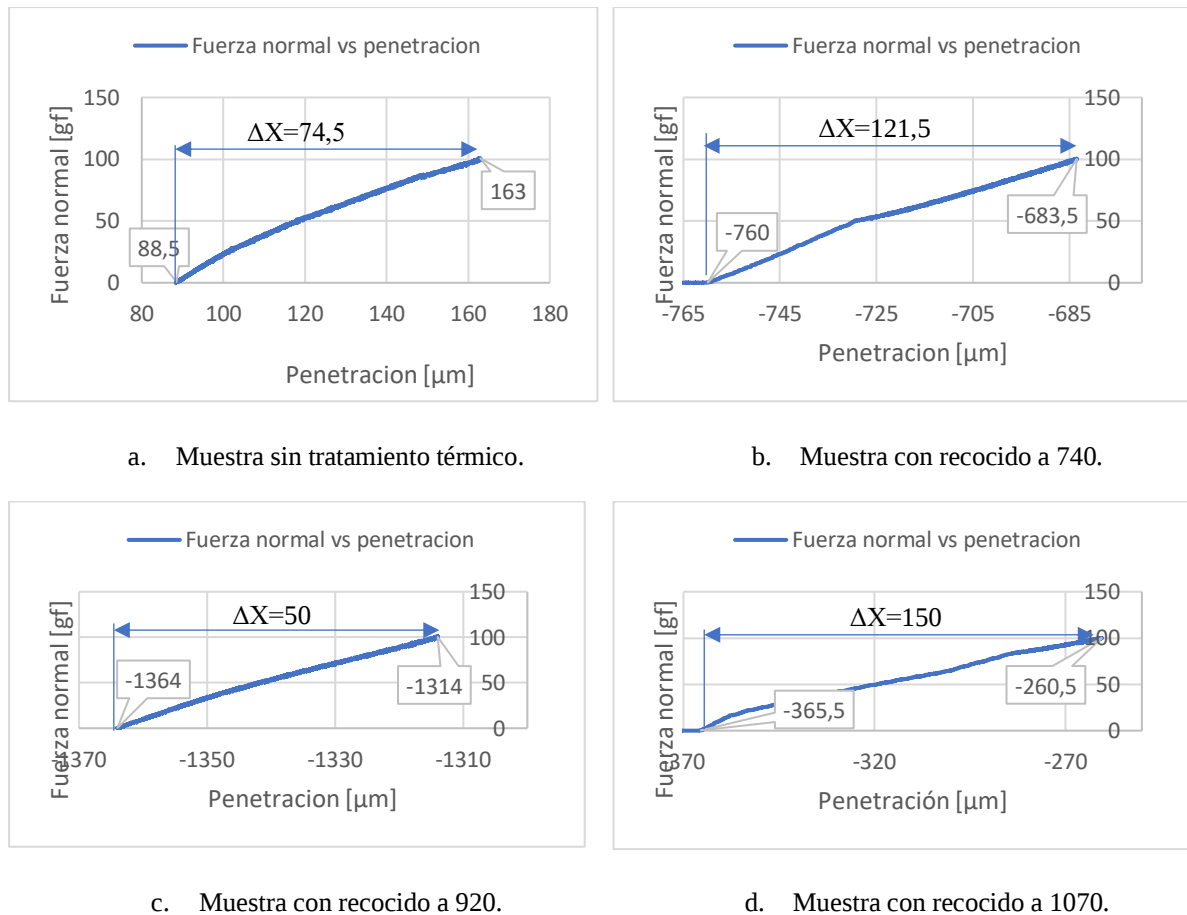


Figura 16. Graficas de Fuerza normal vs penetración para las muestras sin y con recocido a 740, 920 y 1070 [C]. Nota: Los valores representados en el eje de las abscisas (Penetración), difieren ya que es la posición de la herramienta de trabajo (Punta de diamante Vickers).

En la figura 17, se grafica el comportamiento de fuerza de fricción con respecto a la fuerza normal donde se aprecia al inicio de cada gráfica un pico representativo del inicio de deslizamiento, continuo de un comportamiento variable, se presume, es debido a la irregularidad (poros) de la aleación Ti-6Al-4V fabricada por fusión de haz de electrones (EBM).

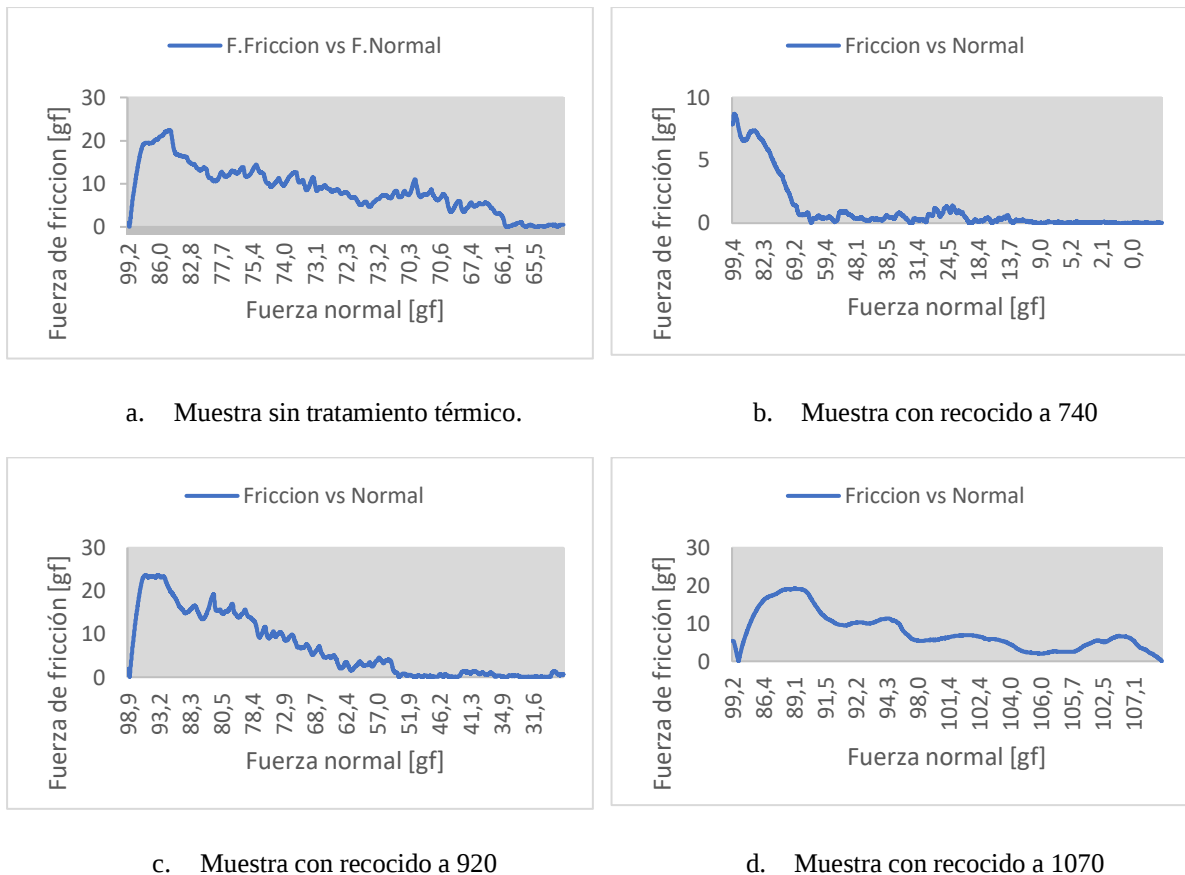
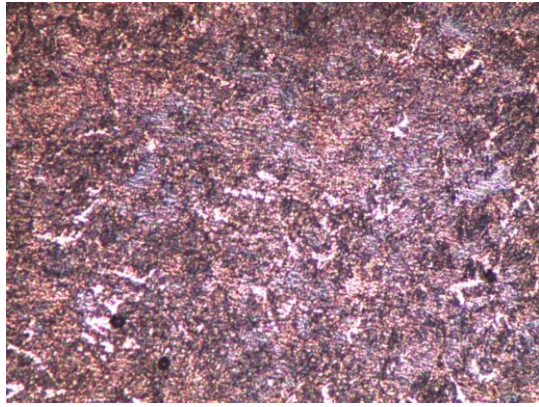


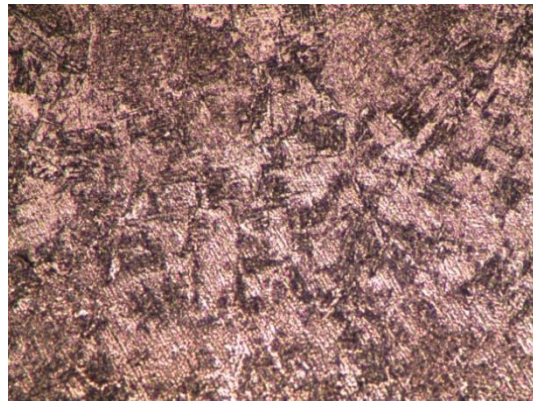
Figura 17. Graficas de Fuerza de fricción vs fuerza normal para las muestras sin y con recocido a 740, 920 y 1070 [C].

3.3 Microscopia óptica

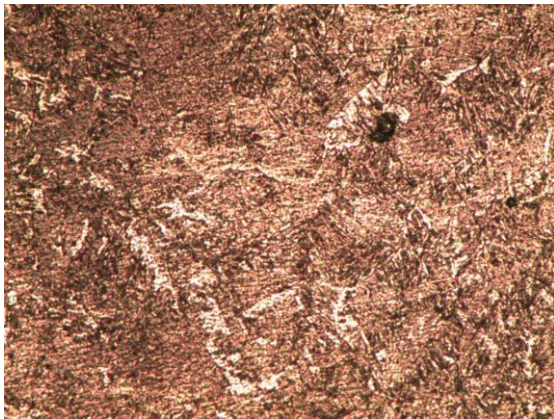
En este ensayo de microscopia óptica se empezó a realizar una vez las superficies de las probetas se atacarán químicamente, a continuación, se realiza la observación con un aumento ocular de 10x y un objetivo de 10x obteniendo una ampliación visual de 100x (ver figura 18), al no poder apreciar claramente la microestructura de las probetas sin recocido, recocido a 740 C y recocido a 920 C se realiza una observación con un aumento visual de 1000x (ver figura 19).



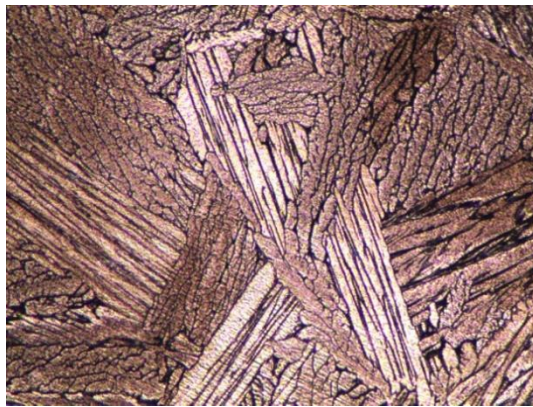
a. Probeta sin tratamiento térmico.



b. Probeta con recocido a 740 C

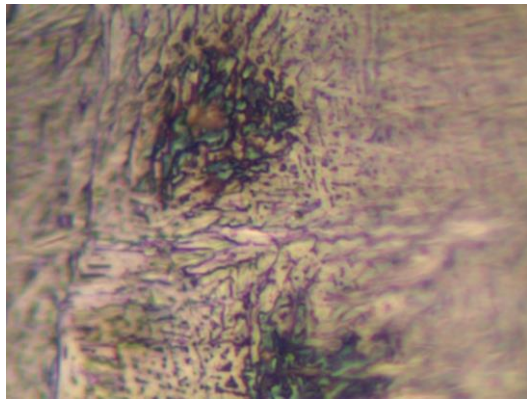


c. Probeta con recocido a 920 C

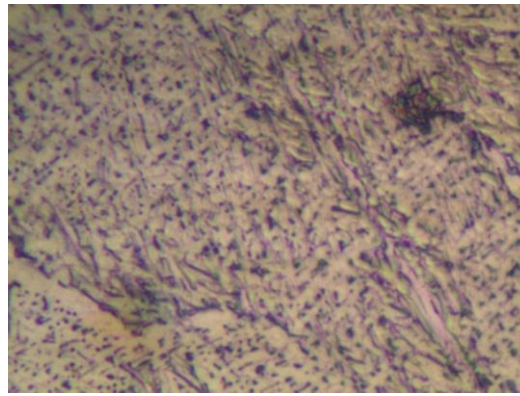


d. Probeta con recocido a 1070 C

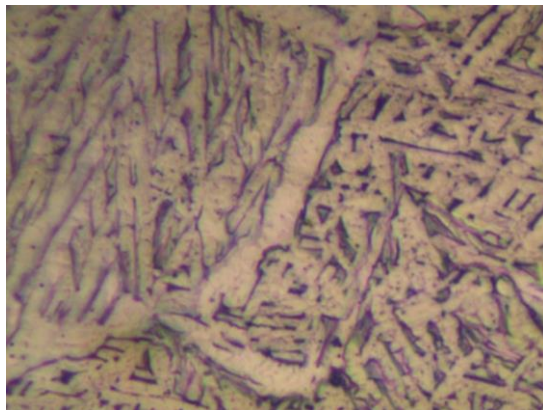
Figura 18. Resultados de microscopía óptica con un acercamiento visual de 100x



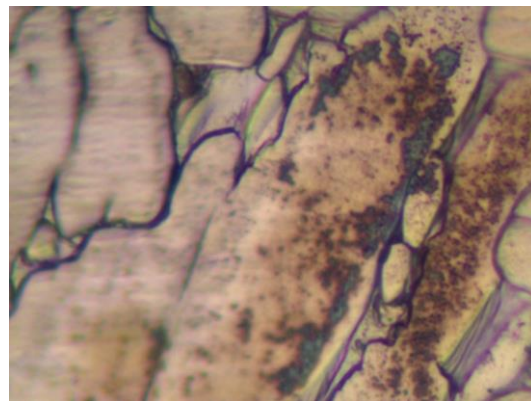
a. Probeta sin tratamiento térmico.



b. Probeta con recocido a 740 °C



c. Probeta con recocido a 920 °C



d. Probeta con recocido a 1070 °C

Figura 19. Resultados de microscopía óptica con un acercamiento visual de 1000x

Los pequeños granos poliédricos equiaxiales se obtienen de aleaciones α , al igual de aleaciones tipo α/β , en una matriz de fase β con enfriamiento lento se transforma en una mezcla de fase α/β de morfología característica llamada de cesta, formada por agujas de Widmanstätten (ver figura 18, d). La cantidad de fase β aumenta con la temperatura. (Gil Mur, Francisco Javier, Manero Planella, José M^a, Rodríguez Rius, Daniel, Aparacio Bádenas, Conrado, Doménech, Albert Andrés, Arandés Salvadó, Pep Miquel, Planell Estany, 2001a)

Se puede apreciar que a temperaturas superiores a β transus (1040 °C), los granos de fase α nuclea a los límites de granos de β y crecen en forma de lámina, al enfriar lentamente se obtiene una morfología totalmente de cesta o de Widmanstätten, se aprecia la fase β rodea la

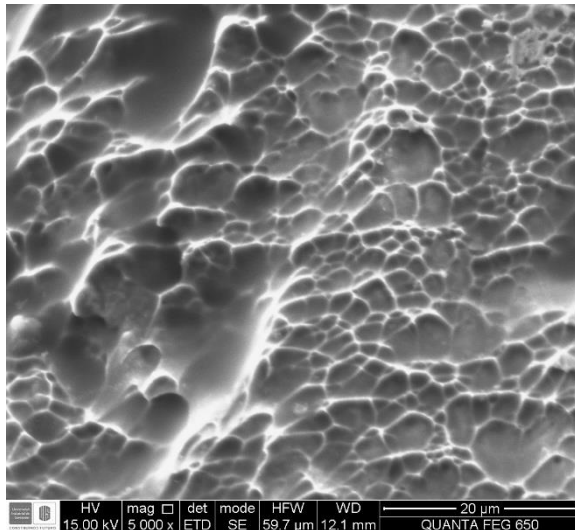
fase α , donde las partes oscuras pertenecen a la fase β y las partes claras corresponden a la fase α (ver figura 19, probeta con recocido a 1070 C).(Gil, Ginebra, & Planell, 1999)

En la aleación Ti-6Al-4V se debe evitar el enfriamiento rápido desde la fase β , ya que se genera la transformación martensítica obteniendo fragilidad. La velocidad de enfriamiento es el parámetro más importante que determina las fases y la morfología. La separación y el grosor del límite de grano de fase α disminuyen con el aumento de velocidad de enfriamiento.(Nicoletto, Maisano, Antolotti, & Dall’aglio, 2017)

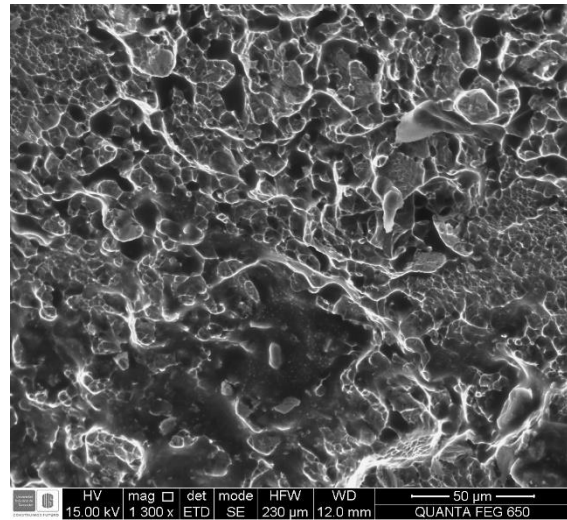
3.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

En la figura 20-d se puede observar regiones brillantes correspondientes a la fase α , formando una estructura típica de Widmanstätten o también llamada de cesta, mientras que las regiones delgadas oscuras entre las placas α son de fase β . En la microestructura de Widmanstätten, la fase α se forma a lo largo de los límites de grano β , la estructura está presente dentro de los granos β anteriores.(Hussein, 2014)

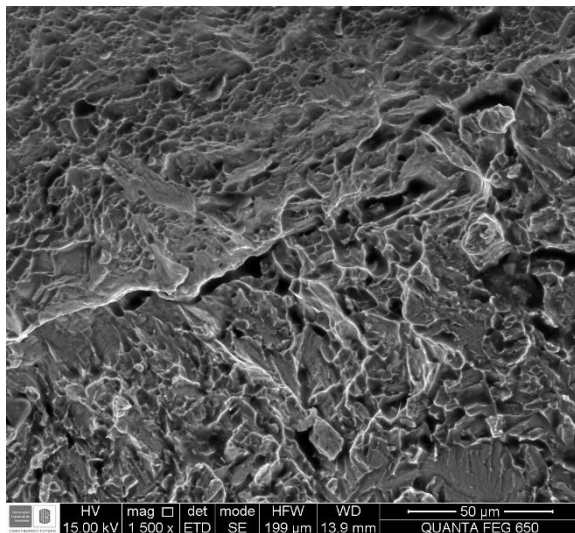
En la probeta sin tratamiento térmico (ver figura 20-a) se puede observar una microestructura amorfa granular y laminas delgadas donde se distinguen la fase α en laminas delgadas como límite de la fase β . En la probeta con recocido a 740 [C] (ver figura 20-b) se aprecia un cambio de la microestructura donde la fase α se encuentra en una matriz de fase β , a su vez el tamaño de las láminas es menor y en menor cantidad. Por último, en la probeta con recocido a 920 C (ver figura 20-c) se observa una estructura amorfa, en comparación con la probeta sin tratar térmicamente, las láminas delgadas han crecido un poco más, aunque la fase β ha aumentado su tamaño.



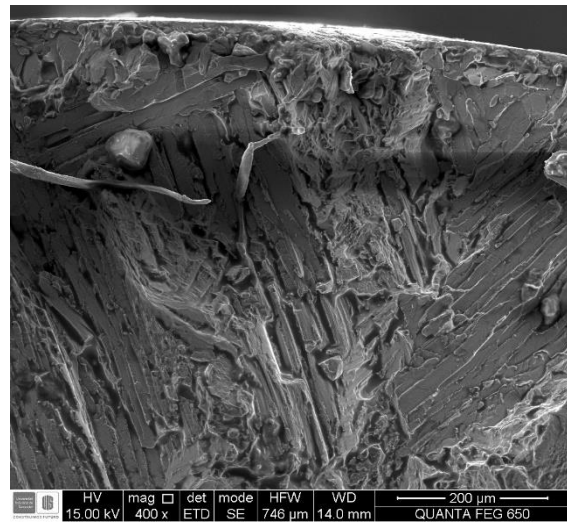
a. Probeta sin tratamiento térmico.



b. Probeta con recocido a 740 °C



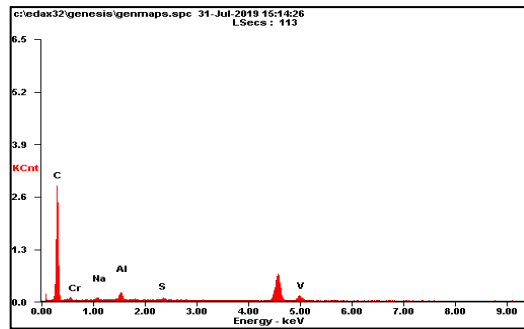
c. Probeta con recocido a 920 °C



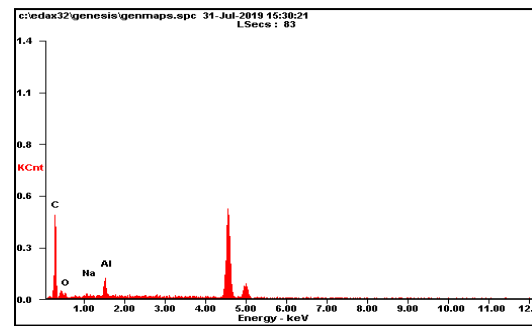
d. Probeta con recocido a 1070 °C

Figura 20. Microscopia electrónica de barrido (SEM) a la aleación Ti-6Al-4V a las probetas tratadas y no tratadas térmicamente.

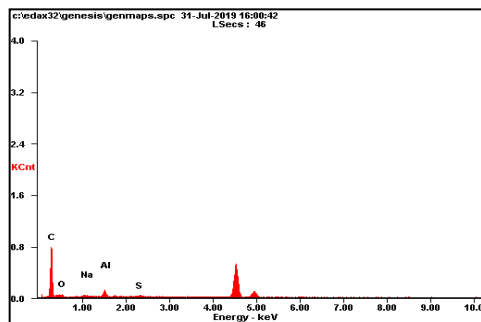
Además, se realizó el ensayo de espectrometría de dispersión de energía de rayos x, con el fin de observar si se modificó químicamente la aleación de Ti-6Al-4V al aplicar los tratamientos térmicos a las muestras (ver figura 21)



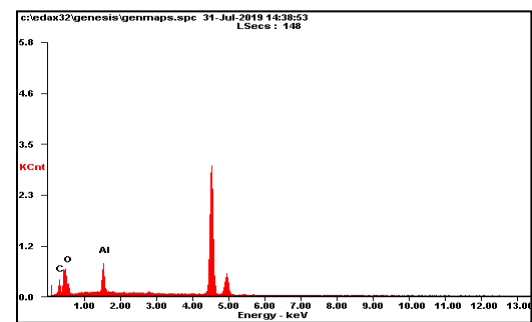
a. Probeta sin tratamiento térmico.



b. Probeta con recocido a 740 °C



c. Probeta con recocido a 920 °C



d. Probeta con recocido a 1070 °C

Figura 21. Ensayo Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS)

4 Conclusiones

Luego de aplicar el tratamiento térmico y preparar la superficie de las muestras por metalografía, se evidencia en la microestructura de la probeta sin tratar térmicamente y tratadas usando recocido a 740 y 920 [°C] una microestructura amorfa, se obtiene inicialmente una fase α formada a lo largo de los límites del grano β , donde a medida que se incrementa la temperatura se obtiene un aumento de la fase β y la fase α cambia de placas delgadas a agujas alargadas formando la cesta o microestructura Widmanstätten donde se aprecia claramente en la muestra tratada térmicamente a 1070 [°C].

El recocido influyó en las propiedades mecánicas de la aleación de titanio, aunque el módulo de Young es aproximadamente el mismo, mientras la resistencia a la tracción y rotura, tenacidad, punto de fluencia, resiliencia, reducción de área y elongación disminuyeron por el aumento de la fragilidad en el material. Además, se observó en la gráfica esfuerzo contra deformación unitario a mayor temperatura de recocido menor ductilidad se presenta en el material.

Al analizar los resultados obtenidos de fuerza normal aplicada con respecto a la fuerza de fricción, se grafica donde se obtiene un comportamiento variable del coeficiente de fricción, se supone es debido a las irregularidades superficiales del material obtenido por las nuevas tecnologías de fabricación adictiva. En las gráficas de fuerza normal vs penetración se ven influenciadas las muestras por el recocido, las tratadas térmicamente a 740 y 1070 [C] presentan una menor dureza y resistencia al rayado superficial, con respecto a la muestra sin tratar térmicamente mientras la muestra tratada térmicamente a 920, presenta una mayor dureza y resistencia al rayado superficial.

El gran tamaño de grano de fase β obtenido por el aumento de temperatura produce una disminución en la plasticidad. La velocidad de enfriamiento permite obtener una estructura totalmente de placas de Widmanstätten, el enfriamiento rápido se debe evitar desde la fase β por lo que producirá la transformación martensítica ocasionando fragilidad.

Se sugiere el recocido en sus diferentes fases alotrópicas de la aleación Ti-6Al-4V de acuerdo a la aplicación que se desee, si la aplicación requiere una mayor dureza, se recomienda el recocido a 920 [C].

5 Recomendaciones

Contar con mayor cantidad de material para contrastar diferentes tipos de tratamientos térmicos, determinando su influencia en ensayos de propiedades mecánicas.

Con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas a la aleación de titanio, se invita a realizar un enfriamiento rápido para obtener una tercera microestructura de agujas aciculares de fase α desde la fase β .

Con el propósito de estudiar como la velocidad de enfriamiento afecta las propiedades mecánicas, se sugiere realizar una grafica de velocidad de enfriamiento con respecto a las propiedades.

Referencias Bibliográficas

- ASTM. (2015). Standard Practice for microetching metals and alloys.
<https://doi.org/10.1520/E0407-07R15E01.2>
- ASTM. (2016). Standard test methods for tension testing of metallic materials metric.
https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16A
- ASTM. (2017). Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine D7027 – 13.
<https://doi.org/10.1520/D7027-13.2>
- ASTM International. (2017). ASTM E3-11(2017) Preparation of Metallographic Specimens 1.
<https://doi.org/10.1520/E0003-11R17.1>
- Blasco, J. R., & Martínez, E. (2015, February). Procesado de nuevos materiales metálicos mediante tecnologías de fabricación aditiva por haz de electrones (EBM).
- Bolzoni, L. (2011). *Diseño y Procesado de Aleaciones de Titanio mediante Técnicas Pulvimetalúrgicas Avanzadas*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Froes, F. H., Friedrich, H., Kiese, J., & Bergoint, D. (2004). Titanium in the family automobile: The cost challenge. *JOM*, 56(2), 40–44. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0144-0>
- Gil, F., Ginebra, M., & Planell, J. (1999). Metales y aleaciones para la substitución de tejidos duros. *Biomecánica*, 13, 73–78. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00778-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00778-8)
- Gil Mur, Francisco Javier, Manero Planella, José M^a, Rodríguez Rius, Daniel, Aparacio Bádenas, Conrado, Doménech, Albert Andrés, Arandés Salvadó, Pep Miquel, Planell Estany, J. A. (2001a). *Aleaciones ligeras* (Edicions UPC; 08034 Barcelona Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL Jordi Girona Salgado 31, Ed.). <https://doi.org/B-29-186-2001>

- Gil Mur, Francisco Javier, Manero Planella, José M^a, Rodríguez Rius, Daniel, Aparacio Bádenas, Conrado, Doménech, Albert Andrés, Arandés Salvadó, Pep Miquel, Planell Estany, J. A. (2001b). *Aleaciones ligeras* (Edicions U; 08034 Barcelona Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL Jordi Girona Salgado 31, Ed.). <https://doi.org/B-29-186-2001>
- Hussein, A. (2014). *Tailoring of Microstructure of Ti-6Al-4V Implant Castings for Abrasive Wear Resistance*. 4(3), 29–44.
- Jung, T.-K., Semboshi, S., Masahashi, N., & Hanada, S. (2013). Mechanical properties and microstructures of β Ti–25Nb–11Sn ternary alloy for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 33(3), 1629–1635. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2012.12.072>
- Nicoletto, G., Maisano, S., Antolotti, M., & Dall’aglio, F. (2017). Influence of post fabrication heat treatments on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting. *Procedia Structural Integrity*, 7, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.070>
- Singh, A. P., Gabbitas, B., & Zhang, D. L. (2013). Fracture Toughness of Powder Metallurgy and Ingot Titanium Alloys – A Review. *Key Engineering Materials*, 551, 143–160. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.551.143>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2019). Titanium. In *Encyclopædia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/titanium#accordion-article-history>
- Titanium Association International. (2016a). *Manufacturing Techniques*. Retrieved from <https://titaniumthemetallurgy.com/manufacturingtechniques.pbworks.com/w/page/110662489/FrontPage>
- Titanium Association International. (2016b). *THE STORY OF TITANIUM—A HISTORICAL PERSPECTIVE*. Retrieved from <https://titaniumthemetallurgy.com/historyoftitanium.pbworks.com/w/page/110662087/FrontPage>

Torreblanca, D. (2016). Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos.

Iconofacto Vol. 12 N° 18, 12 Número, 118–143.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18566/iconofac.v12n18.a07>

U.S. Titanium Industry Inc. (2002). Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5. Retrieved August 8,

2019, from Titanium Information Group. website:

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>

Apéndices

Apéndice A. Cálculo del tiempo de homogenización.

Se considera una probeta de una aleación de titanio que tiene como coeficiente de conducción ($K_{probeta} = 7,2 \left[\frac{KW}{m*K} \right]$), con una dimensión de 14 [mm] de diámetro y una altura de 108 [mm]. Se quiere aplicar un tratamiento térmico el cual requiere elevar la probeta a 1070 [C], si la temperatura ambiente, interior de la probeta es de 25 [C]. Para este tratamiento térmico se emplea un horno tubular de potencia ($Pot_{horno} = 1661 [W]$) con una eficiencia ($\eta = 0,8$), este tratamiento térmico se realiza en atmosfera controlada de gas argón con un coeficiente de convección ($h_{argon} = 0,01772 \left[\frac{W}{m*K} \right]$), la aleación de titanio tiene una emisividad ($\epsilon = 0,7$), una densidad ($\rho = 4420 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$) y un calor especifico ($cp = 560 \left[\frac{J}{Kg*K} \right]$). Se requiere encontrar el tiempo necesario para alcanzar la temperatura crítica (T_{ext}), el tiempo de homogenización, tiempo que asegure la probeta se encuentre a la misma temperatura en cualquier sección de esta, el horno puede elevar su temperatura a una velocidad máxima de $300 \left[\frac{C}{hr} \right]$, con la ecuación 1 de variación de temperatura con respecto al tiempo con un comportamiento lineal, se obtiene el tiempo que necesita el horno para alcanzar la temperatura crítica correspondiente a cada fase.

Ecuación 3. Velocidad de calentamiento

$$V_{calentamiento} = \frac{T_{ext} - T_{int}}{t}$$

Donde $V_{calentamiento}$ en la rampa 1 es la velocidad máxima del horno en alcanzar las temperaturas programadas directamente en el control PID que se encuentra en el panel frontal

del horno, T_{ext} es la temperatura crítica a la que se realiza el tratamiento térmico, T_{int} es la temperatura del ambiente, la temperatura a la que se encuentra la probeta. En la siguiente tabla se estiman los tiempos que el horno emplea para alcanzar las temperaturas críticas de cada fase.

Tabla 9. *Tiempo de calentamiento*

Fase	T_ext [C]	Tiempo [min]
α	740	143
α/β	920	179
β	1070	209

A continuación, se plantea un problema de transferencia de calor con el fin de obtener el tiempo que tarda en alcanzar una probeta de aleación de Ti-6Al-4V desde la temperatura ambiente hasta la temperatura crítica en todas sus secciones.

Se inicia con el planteamiento de balance de energía de un sistema estable con generación de energía, se asume que la energía de salida del sistema es nula.

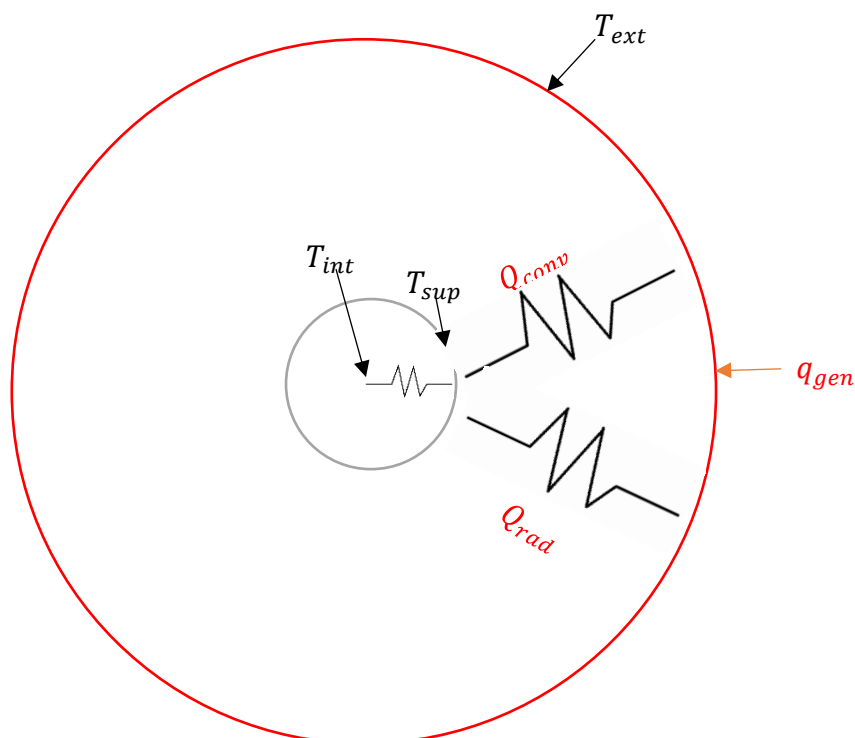


Figura 22. Esquema de transferencia de calor.

Balance de energía

Ecuación 4. Balance de energía.

$$\delta_{E_{Alm}} = E_{Ent} + E_{gen} - E_{sal}$$

Energía que sale del sistema

$$E_{sal} = 0$$

Donde $\delta_{E_{Alm}}$ es el diferencial de energía interna almacenada en la probeta, E_{Ent} es la energía que le ingresa al volumen de control, en nuestro caso es la probeta, esta se asume como un cuerpo cilíndrico de radio 14 [mm] y altura de 108 [mm], el diámetro se toma como radio para asegurar que la temperatura es la misma en cualquier punto dentro del volumen de control, E_{gen} esta es la energía generada por el horno, las dimensiones de la probeta con respecto las paredes del horno son muy pequeñas. Para los datos de las propiedades mecánicas como físicas se toman de la página web AZO Materials (U.S. Titanium Industry Inc., 2002)

Energía interna almacenada

$$R_{Probeta} = 0,014 [m]$$

$$Long_{Probeta} = 0,108 [m]$$

$$\rho_{Probeta} = 4420 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$Cp_{Probeta} = 560 \left[\frac{J}{Kg * K} \right]$$

$$T_{ext} = 1343,15 [K]$$

$$T_{int} = 298,15 [K]$$

Ecuación 5. Diferencial de energía interna almacenada.

$$\delta_{E_{Alm}} = V_{Probeta} * \rho_{Probeta} * Cp_{Probeta} * Vel_{calentamiento}$$

Ecuación 6. Volumen de un cilindro

$$V_{Probeta} = \pi * R_{Probeta}^2 * Long_{Probeta}$$

Los siguientes datos son propiedades físicas de la probeta, $V_{Probeta}$ es el volumen, $\rho_{Probeta}$ es la densidad, $Cp_{Probeta}$ es el calor específico, $R_{Probeta}^2$ es el diámetro, $Long_{Probeta}$ es la altura.

En el volumen de control se tienen E_{Ent} como energía que ingresa al sistema, las componentes del calor, calor por convección que se transmite por medio de la atmosfera controlada en gas argón, el calor por radiación y el calor por conducción que se transmite por la probeta.

Energía que ingresa al sistema

$$R_{int} = 0,0001 [m]$$

$$K_{Probeta} = 7,2 \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

$$h_{Argon} = 0,01772 \left[\frac{W}{m * K} \right]$$

$$\epsilon = 0,7$$

Ecuación 7. Energía que ingresa al sistema

$$E_{Ent} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad}$$

Ecuación 8. Ley de Newton del enfriamiento

$$Q_{conv} = h_{Argon} * A_{sup} * (T_{ext} - T_{sup})$$

Ecuación 9. Área superficial de un cilindro

$$A_{sup} = 2 * \pi * R_{Probeta} * Long_{Probeta}$$

Ecuación 10. Ley de Fourier de la conducción de calor.

$$Q_{cond} = - \left(2 * K_{Probeta} * \pi * Long_{Probeta} * \frac{T_{sup} - T_{int}}{\ln \left(\frac{R_{Probeta}}{R_{int}} \right)} \right)$$

Ecuación 11. Ley de Stefan Boltzmann

$$Q_{rad} = A_{sup} * \epsilon * \sigma_{SB} * (T_{ext}^4 - T_{sup}^4)$$

Donde Q_{cond} es el diferencial del calor por conducción y necesita de los siguientes datos, $K_{Probeta}$ es el coeficiente de conducción de la aleación Ti-6Al-4V, T_{sup} es la temperatura superficial, R_{int} es el radio interno que se aproxima a cero para obtener una barra cilíndrica en la simulación, Q_{conv} es el diferencial del calor por convección y emplea los siguientes datos, h_{Argon} es el coeficiente de convección del gas argón, A_{sup} es el área en contacto con el gas argón y Q_{rad} es el diferencial de calor por radiación y usa a ϵ es la emisividad de la superficie, σ_{SB} es la constante de Stefan Boltzmann $\sigma_{SB} = 5.6704 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$.

Por último, la componente de energía generada es la que entrega el horno

Energía generada por el horno

$$Pot_{horno} = 1661 [W]$$

$$\eta = 0,8$$

Ecuación 12. Energía generada en el sistema térmico.

$$E_{gen} = q_{gen} * V_{Probeta}$$

Ecuación 13. Razón constante de generación de calor por unidad de volumen.

$$q_{gen} = Pot_{horno} * \eta$$

Donde E_{gen} es la energía generada por el horno y emplea los siguientes datos, q_{gen} el diferencial de calor generado con respecto al tiempo, Pot_{horno} es la potencia del horno y η es la eficiencia del horno.

En esta simulación se asume el valor de la temperatura superficial de la probeta, por lo tanto, se realiza una iteración para diferentes valores de la temperatura superficial, obteniendo las siguientes tablas y graficas.

Tabla 10. Iteración de la temperatura superficial para obtener el tiempo de homogenización para la temperatura crítica de 740 C.

T_{ext} [K]	T_{sup} [K]	T_{min} [min]	$\delta_{E;Alm}$ [W]	E_{Ent} [W]	E_{gen} [W]	Q_{cond} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]
953,2	434,5	11,01	163,2	163,1	0,1064	-134,8	0,08732	297,8
953,2	443,5	11,73	153,2	153,1	0,1064	-143,7	0,0858	296,6
953,2	452,5	12,56	143	142,9	0,1064	-152,6	0,08428	295,4
953,2	461,5	13,53	132,8	132,7	0,1064	-161,5	0,08276	294,1
953,2	470,5	14,67	122,5	122,4	0,1064	-170,4	0,08125	292,7
953,2	479,6	16,03	112,1	112	0,1064	-179,4	0,07973	291,3
953,2	488,6	17,68	101,7	101,6	0,1064	-188,3	0,07821	289,7
953,2	497,6	19,72	91,11	91	0,1064	-197,2	0,07669	288,1
953,2	506,6	22,33	80,47	80,36	0,1064	-206,1	0,07517	286,4
953,2	515,6	25,77	69,73	69,62	0,1064	-215	0,07365	284,6
953,2	524,7	30,51	58,89	58,79	0,1064	-223,9	0,07213	282,7
953,2	533,7	37,47	47,96	47,85	0,1064	-232,9	0,07062	280,6
953,2	542,7	48,67	36,92	36,81	0,1064	-241,8	0,0691	278,5
953,2	551,7	69,73	25,77	25,66	0,1064	-250,7	0,06758	276,3
953,2	560,7	123,9	14,51	14,4	0,1064	-259,6	0,06606	274
953,2	569,8	574,1	3,13	3,024	0,1064	-268,5	0,06454	271,5
953,2	578,8	-214,8	-8,366	-8,473	0,1064	-277,5	0,06302	268,9
953,2	587,8	-89,91	-19,99	-20,09	0,1064	-286,4	0,0615	266,2
953,2	596,8	-56,63	-31,73	-31,84	0,1064	-295,3	0,05999	263,4
953,2	605,8	-41,2	-43,61	-43,72	0,1064	-304,2	0,05847	260,4
953,2	614,9	-32,3	-55,63	-55,73	0,1064	-313,1	0,05695	257,3
953,2	623,9	-26,51	-67,78	-67,88	0,1064	-322	0,05543	254,1
953,2	632,9	-22,44	-80,07	-80,18	0,1064	-331	0,05391	250,7
953,2	641,9	-19,42	-92,52	-92,62	0,1064	-339,9	0,05239	247,2
953,2	650,9	-17,1	-105,1	-105,2	0,1064	-348,8	0,05088	243,5

Tabla 11. Iteración de la temperatura superficial para obtener el tiempo de homogenización para la temperatura crítica de 920 C.

T _{ext} [K]	T _{sup} [K]	t _{min} [min]	δE;Alm [W]	E _{Ent} [W]	E _{gen} [W]	Q _{cond} [W]	Q _{conv} [W]	Q _{rad} [W]
1193	759,2	13,42	182,9	182,8	0,1064	-455,8	0,07303	638,6
1193	768,2	14,62	168	167,9	0,1064	-464,7	0,07151	632,5
1193	777,2	16,07	152,8	152,7	0,1064	-473,7	0,06999	626,2
1193	786,2	17,87	137,3	137,2	0,1064	-482,6	0,06848	619,7
1193	795,3	20,17	121,7	121,6	0,1064	-491,5	0,06696	613
1193	804,3	23,2	105,8	105,7	0,1064	-500,4	0,06544	606,1
1193	813,3	27,37	89,69	89,59	0,1064	-509,3	0,06392	598,9
1193	822,3	33,48	73,33	73,23	0,1064	-518,2	0,0624	591,4
1193	831,3	43,28	56,72	56,62	0,1064	-527,2	0,06088	583,7
1193	840,4	61,59	39,86	39,75	0,1064	-536,1	0,05936	575,8
1193	849,4	108	22,73	22,63	0,1064	-545	0,05785	567,6
1193	858,4	459,7	5,341	5,234	0,1064	-553,9	0,05633	559,1
1193	867,4	-199,2	-12,32	-12,43	0,1064	-562,8	0,05481	550,4
1193	876,4	-81,13	-30,26	-30,37	0,1064	-571,8	0,05329	541,3
1193	885,5	-50,64	-48,48	-48,59	0,1064	-580,7	0,05177	532
1193	894,5	-36,64	-66,99	-67,1	0,1064	-589,6	0,05025	522,4
1193	903,5	-28,61	-85,8	-85,91	0,1064	-598,5	0,04873	512,6
1193	912,5	-23,4	-104,9	-105	0,1064	-607,4	0,04722	502,4

Tabla 12. Iteración de la temperatura superficial para obtener el tiempo de homogenización para la temperatura crítica de 1070 C.

T _{ext} [K]	T _{sup} [K]	t _{min} [min]	δE;Alm [W]	E _{Ent} [W]	E _{gen} [W]	Q _{cond} [W]	Q _{conv} [W]	Q _{rad} [W]
1343	949	10,31	278,1	278	-643,5	0,06635	921,4	0,1064
1343	959	11,24	255,1	255	-653,4	0,06467	908,3	0,1064
1343	969	12,37	231,7	231,6	-663,3	0,06299	894,8	0,1064
1343	979	13,79	207,9	207,8	-673,2	0,0613	880,9	0,1064
1343	989	15,61	183,6	183,5	-683	0,05962	866,5	0,1064
1343	999	18,04	158,9	158,8	-692,9	0,05794	851,7	0,1064
1343	1009	21,43	133,8	133,7	-702,8	0,05625	836,4	0,1064
1343	1019	26,51	108,2	108	-712,7	0,05457	820,7	0,1064
1343	1029	34,93	82,07	81,96	-722,6	0,05288	804,5	0,1064
1343	1039	51,65	55,5	55,4	-732,5	0,0512	787,8	0,1064
1343	1049	100,8	28,45	28,34	-742,4	0,04952	770,7	0,1064
1343	1059	3186	0,8999	0,7935	-752,3	0,04783	753	0,1064
1343	1069	-105,6	-27,16	-27,26	-762,1	0,04615	734,8	0,1064
1343	1079	-51,44	-55,73	-55,84	-772	0,04447	716,1	0,1064
1343	1089	-33,79	-84,83	-84,94	-781,9	0,04278	696,9	0,1064
1343	949	10,31	278,1	278	-643,5	0,06635	921,4	0,1064
1343	959	11,24	255,1	255	-653,4	0,06467	908,3	0,1064
1343	969	12,37	231,7	231,6	-663,3	0,06299	894,8	0,1064
1343	979	13,79	207,9	207,8	-673,2	0,0613	880,9	0,1064
1343	989	15,61	183,6	183,5	-683	0,05962	866,5	0,1064

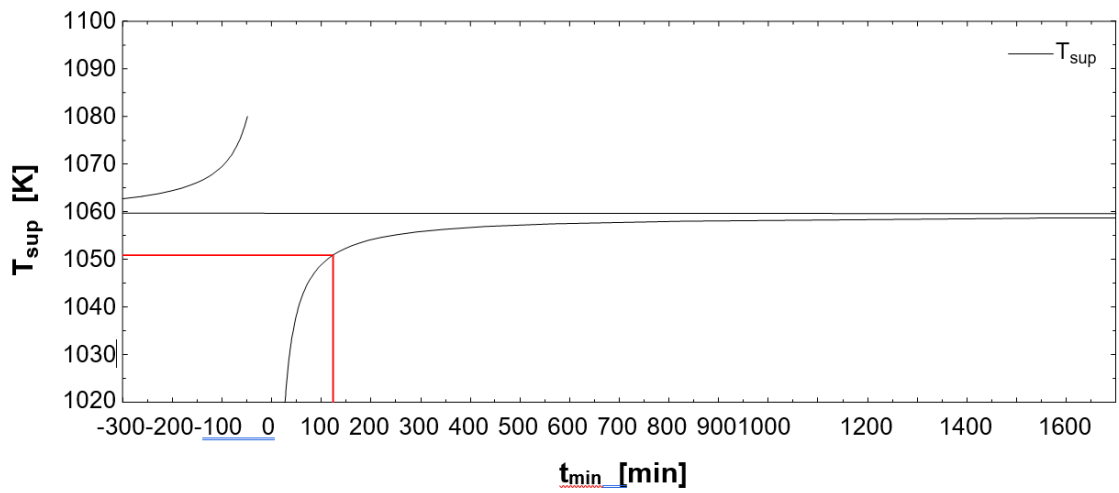


Figura 23. Iteración de la temperatura superficial de la probeta a temperatura crítica 1070 C.

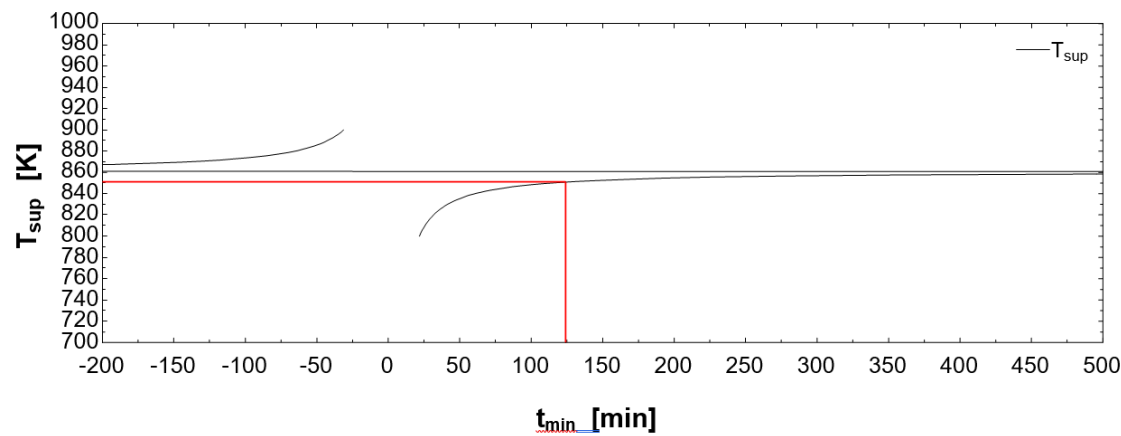


Figura 24. Iteración de la temperatura superficial de la probeta a temperatura crítica 920 C.

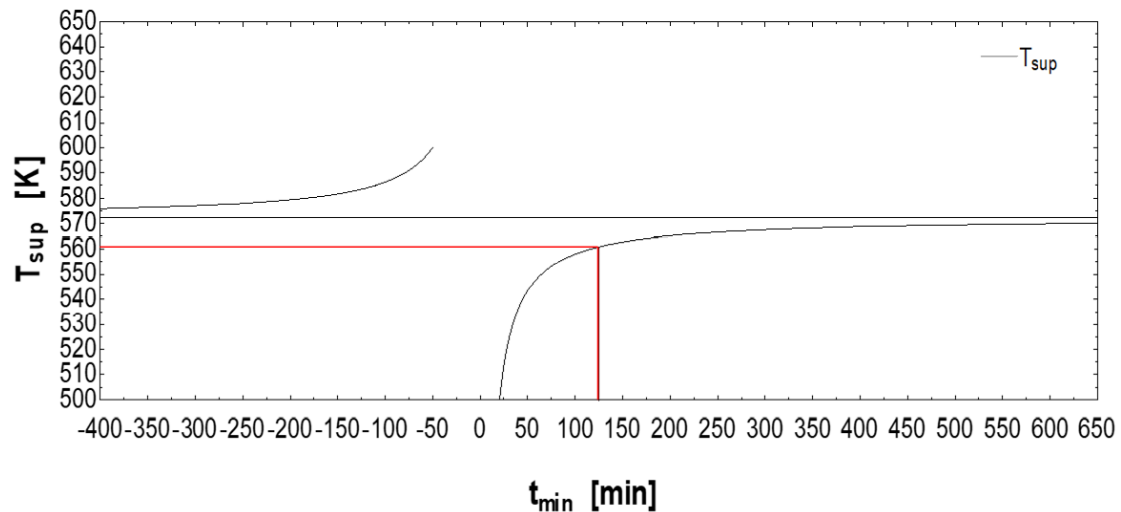
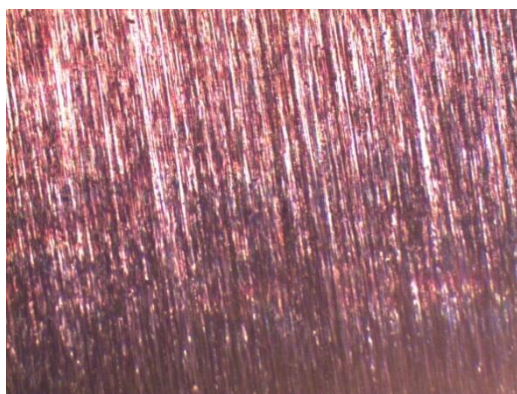


Figura 25. Iteración de la temperatura superficial de la probeta a temperatura crítica 740 C.

Con esta simulación se obtienen diferentes tiempos dependiendo de la temperatura superficial, para la selección del tiempo para homogenizar la temperatura en toda la probeta se comparan los resultados obtenidos con valores seleccionados de textos relacionados con estas novedosas técnicas de fabricación aditiva.(Nicoletto et al., 2017)

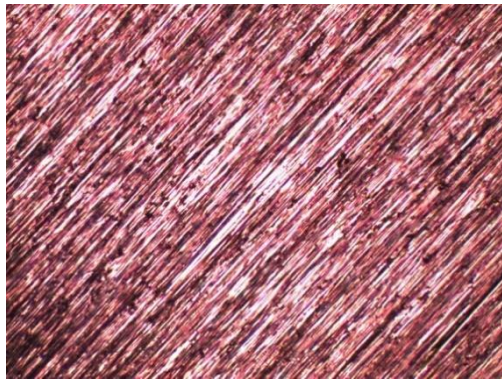
Apéndice B. Procedimiento y resultados de preparación metalográfica



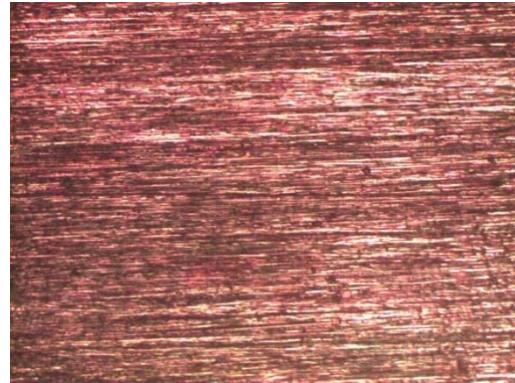
Probeta sin tratamiento térmico



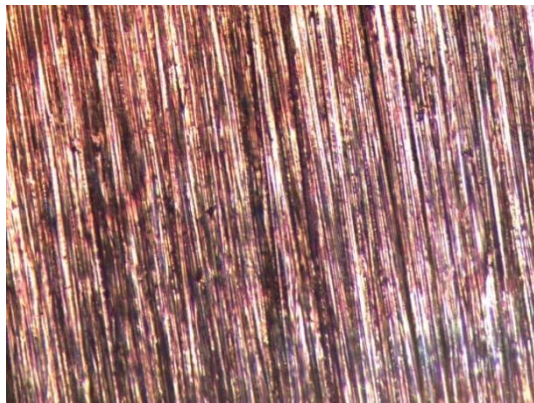
Probeta con recocido a 740 C



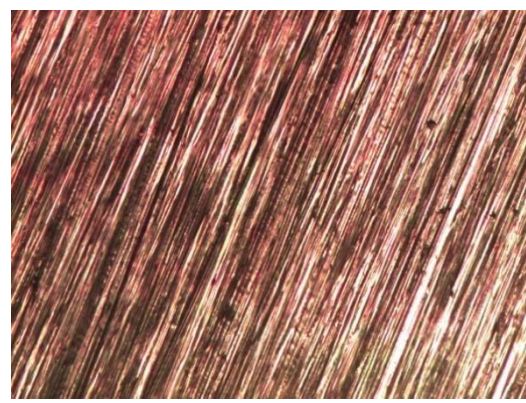
Probeta con recocido a 920 C



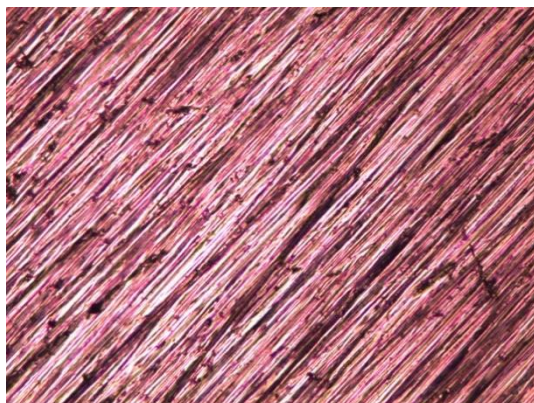
Probeta con recocido a 1070 C

Figura 26. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P220 con un aumento de 50x.

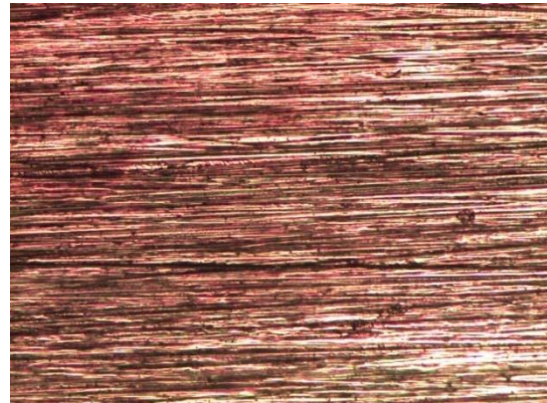
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C



Probeta con recocido a 920 C

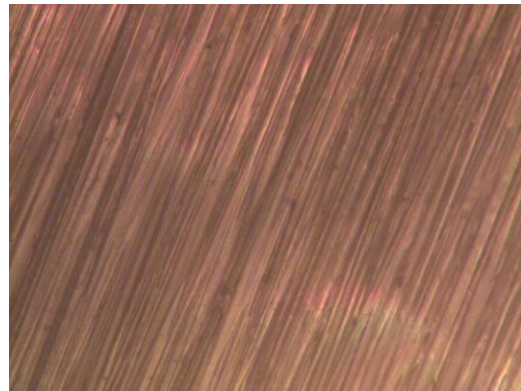


Probeta con recocido a 1070 C

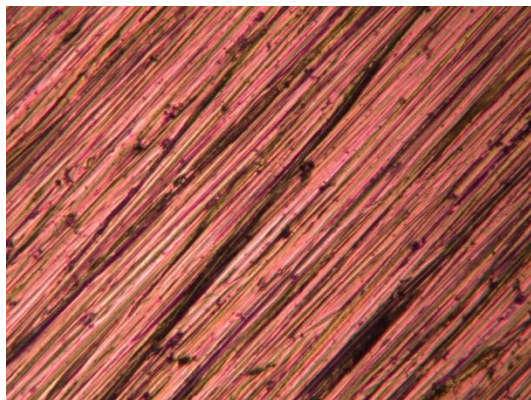
Figura 27. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P220 con un aumento de 100x.



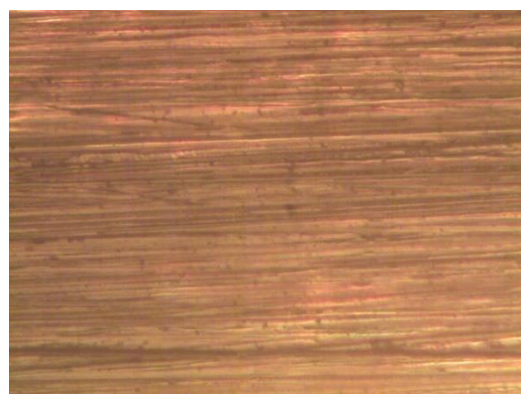
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

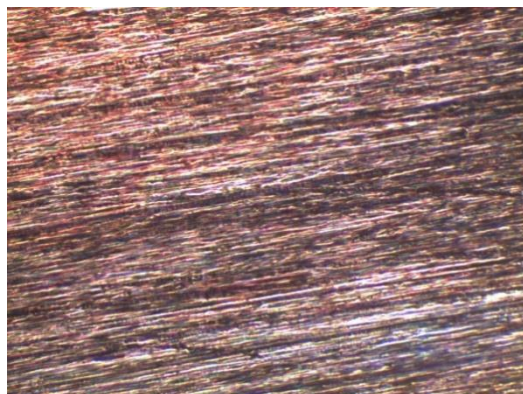


Probeta con recocido a 920 C

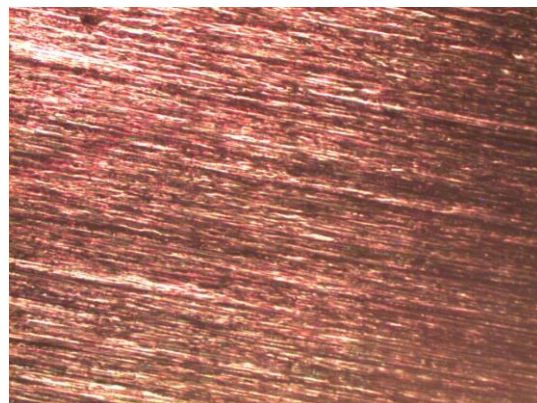


Probeta con recocido a 1070 C

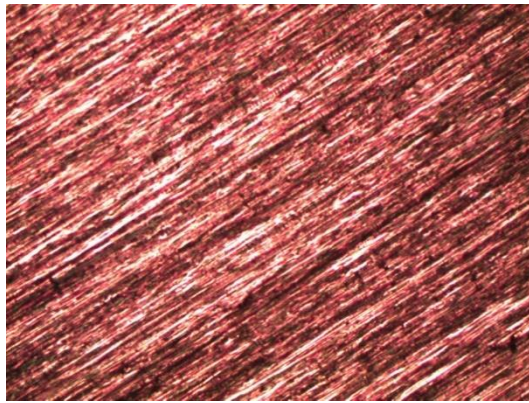
Figura 28. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P220 con un aumento de 200x.



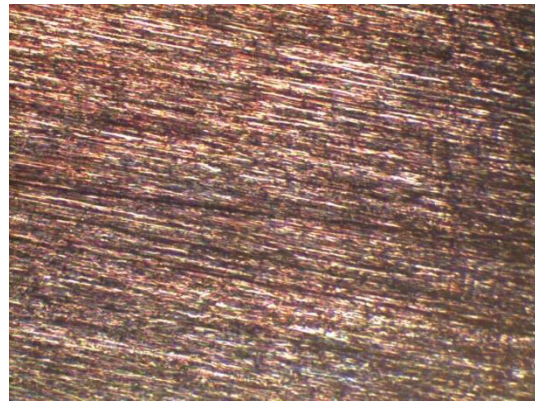
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

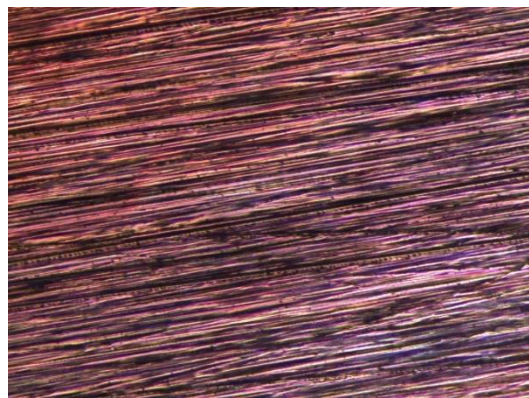


Probeta con recocido a 920 C

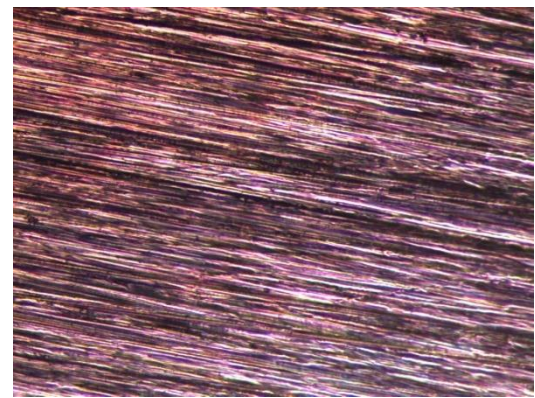


Probeta con recocido a 1070 C

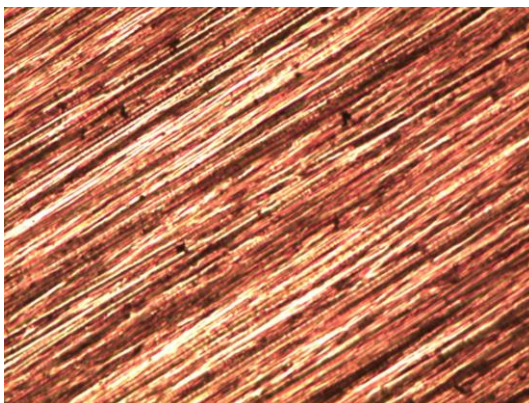
Figura 29. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P320 con un aumento de 50x.



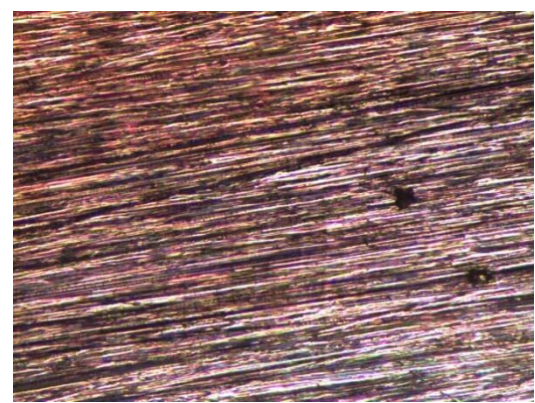
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

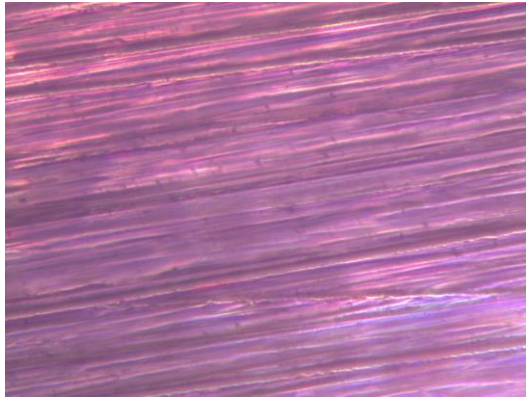


Probeta con recocido a 920 C

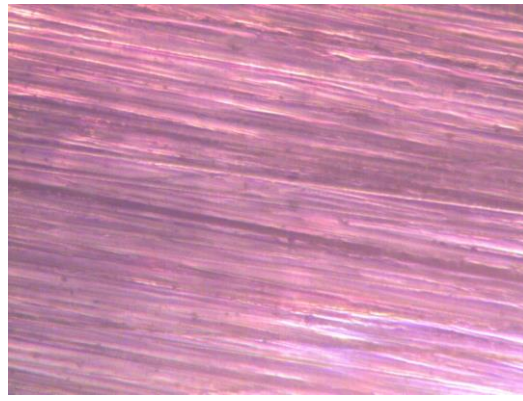


Probeta con recocido a 1070 C

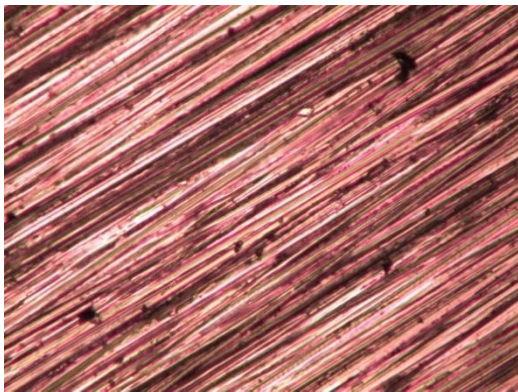
Figura 30. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P320 con un aumento de 100x.



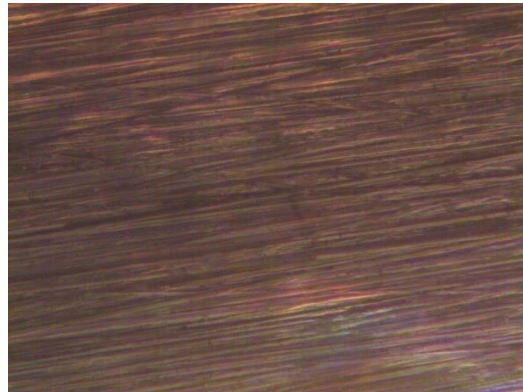
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

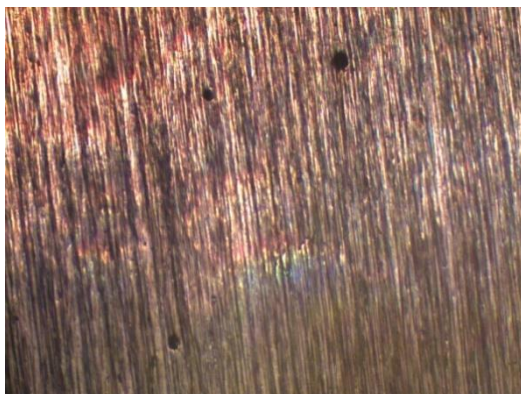


Probeta con recocido a 920 C

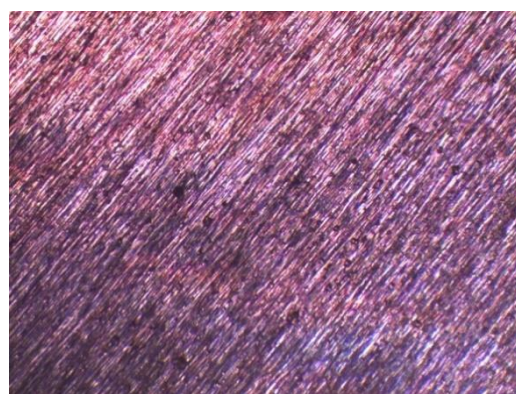


Probeta con recocido a 1070 C

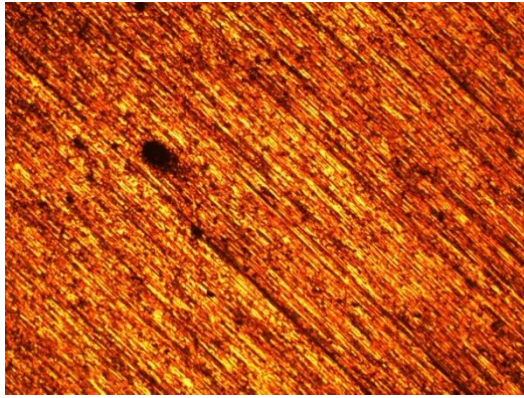
Figura 31. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P320 con un aumento de 200x.



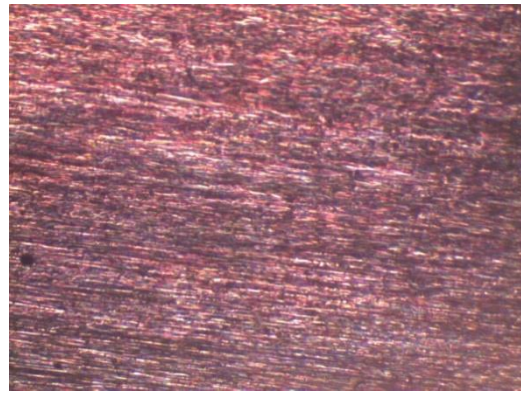
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

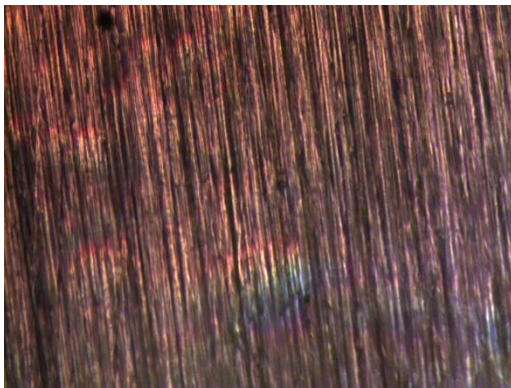


Probeta con recocido a 920 C

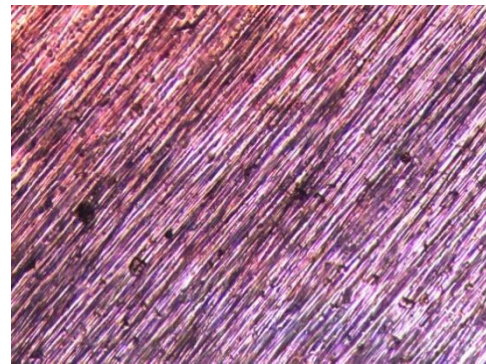


Probeta con recocido a 1070 C

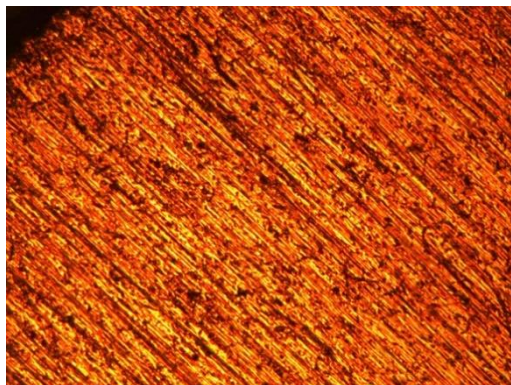
Figura 32. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P400 con un aumento de 50x.



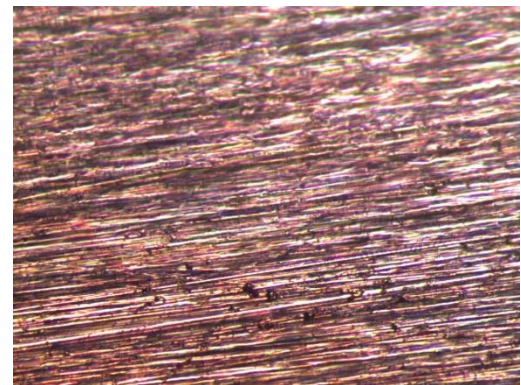
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C



Probeta con recocido a 920 C

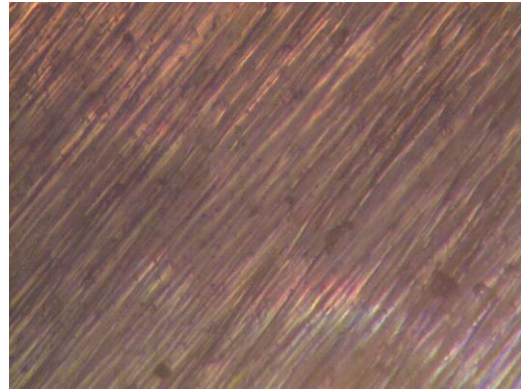


Probeta con recocido a 1070 C

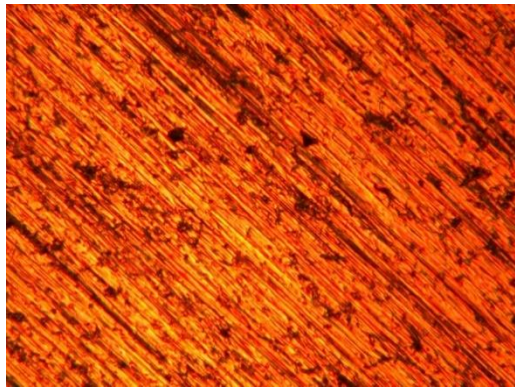
Figura 33. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P400 con un aumento de 100x.



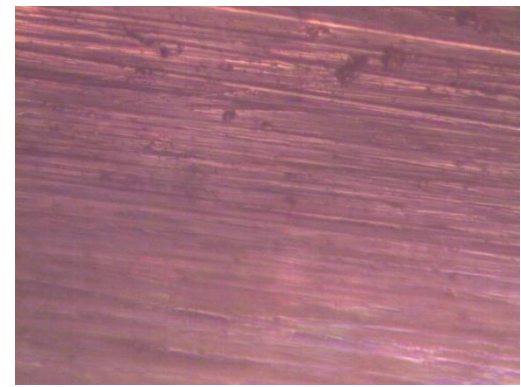
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

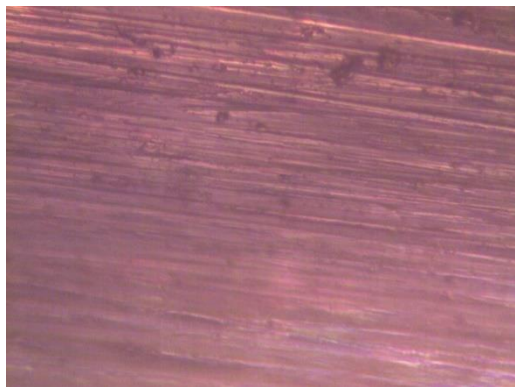


Probeta con recocido a 920 C



Probeta con recocido a 1070 C

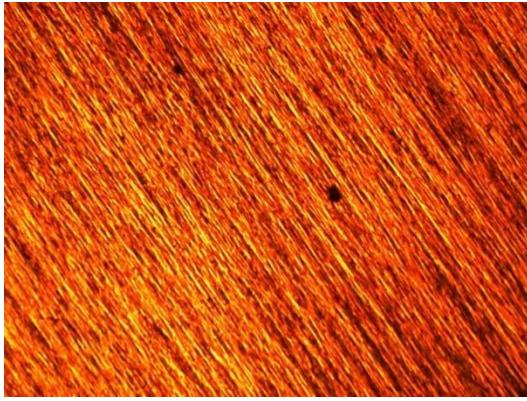
Figura 34. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P400 con un aumento de 200x.



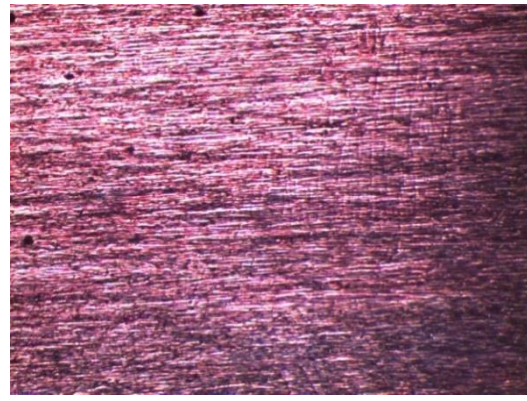
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

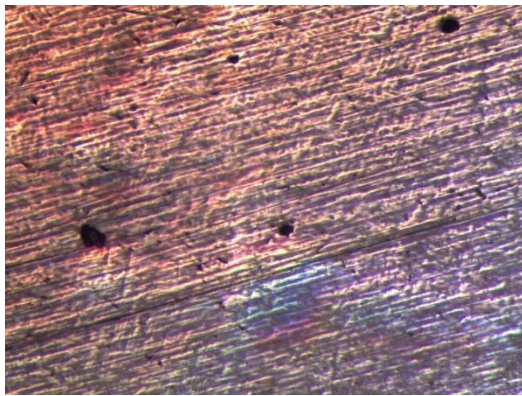


Probeta con recocido a 920 C

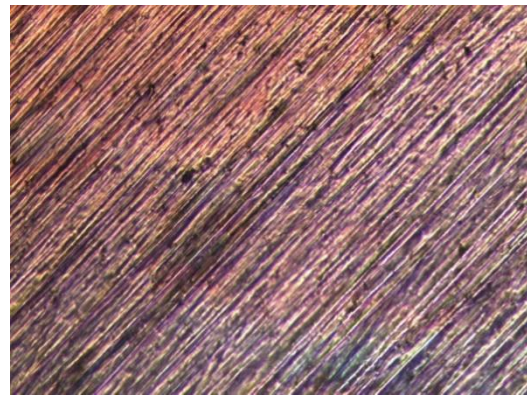


Probeta con recocido a 1070 C

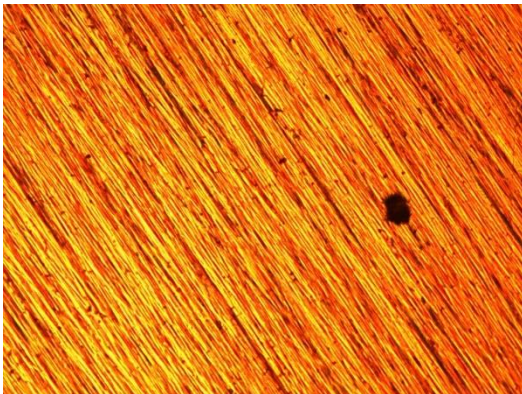
Figura 35. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P600 con un aumento de 50x.



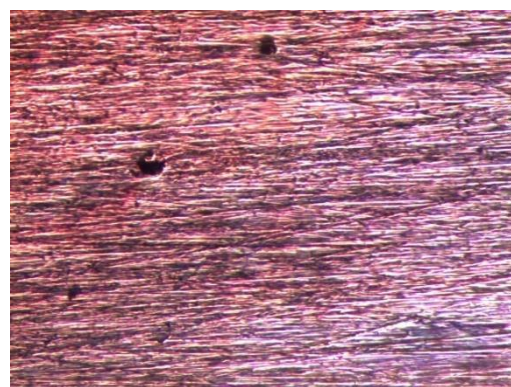
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

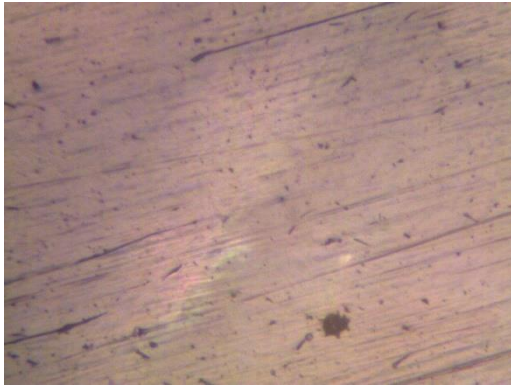


Probeta con recocido a 920 C

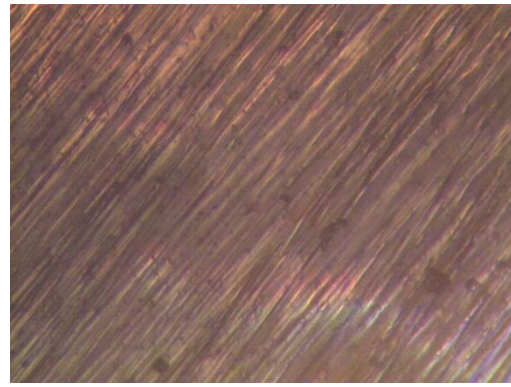


Probeta con recocido a 1070 C

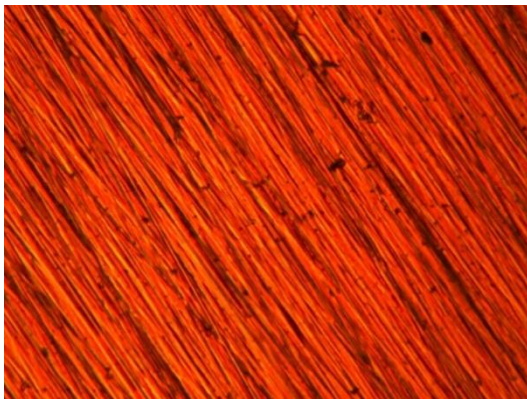
Figura 36. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P600 con un aumento de 100x.



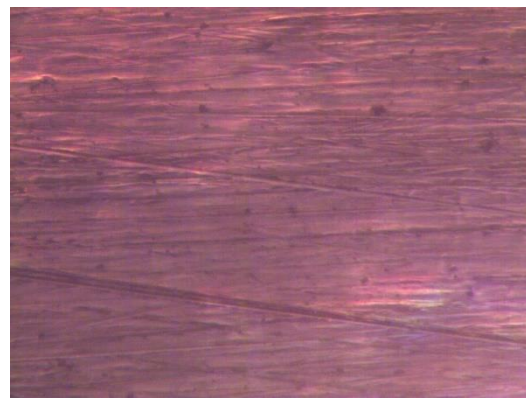
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

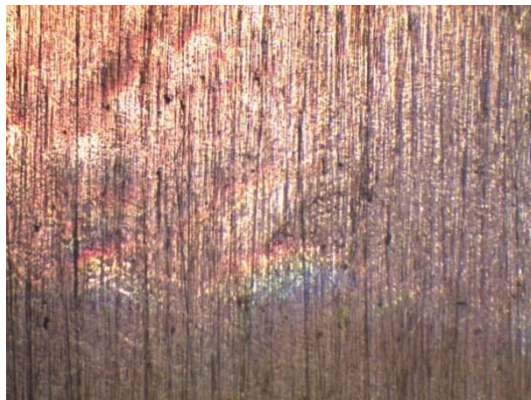


Probeta con recocido a 920 C

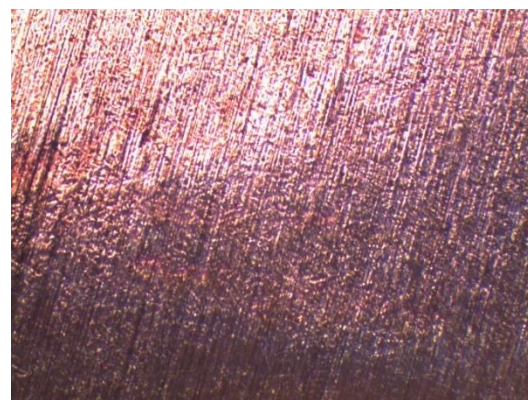


Probeta con recocido a 1070 C

Figura 37. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P600 con un aumento de 200x.



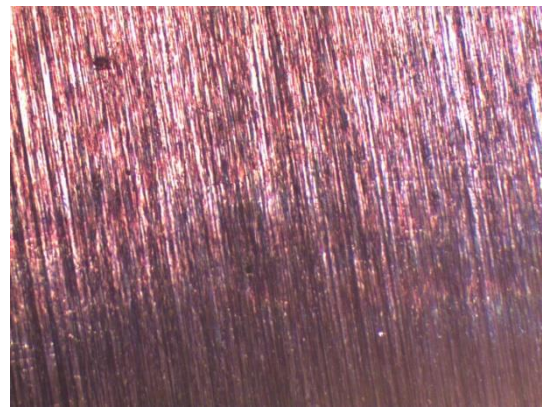
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

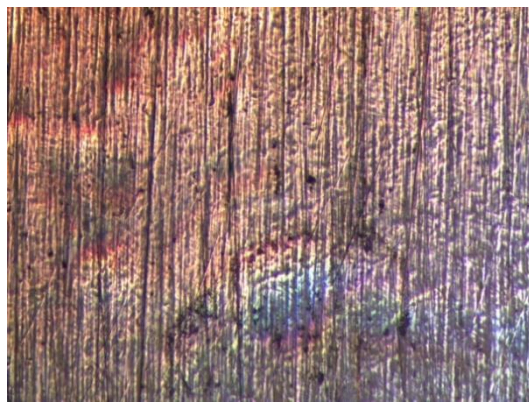


Probeta con recocido a 920 C

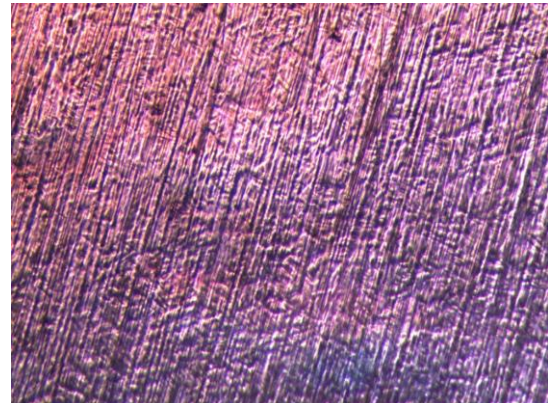


Probeta con recocido a 1070 C

Figura 38. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 50x.



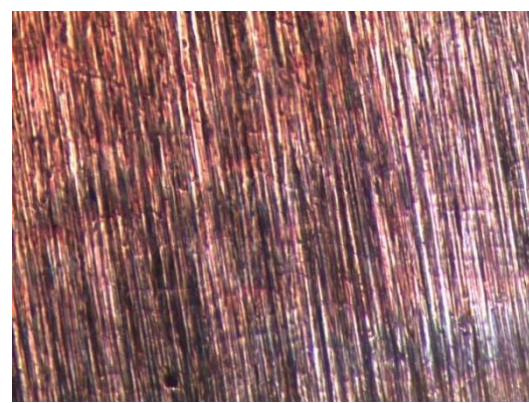
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

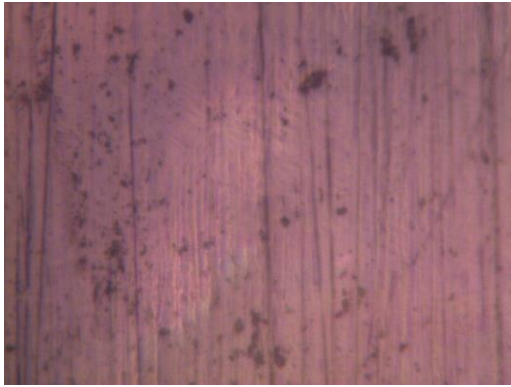


Probeta con recocido a 920 C

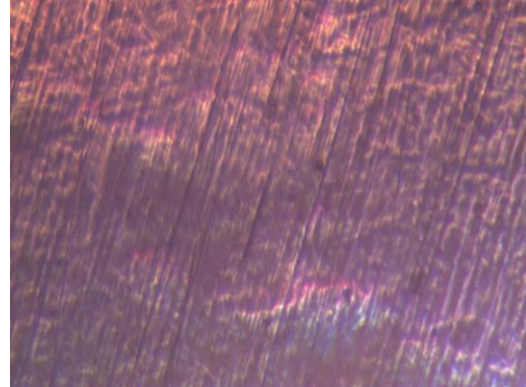


Probeta con recocido a 1070 C

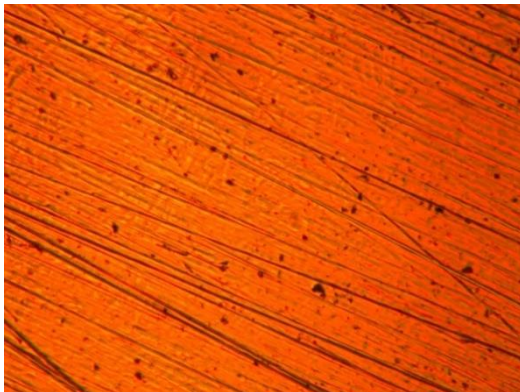
Figura 39. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 100x.



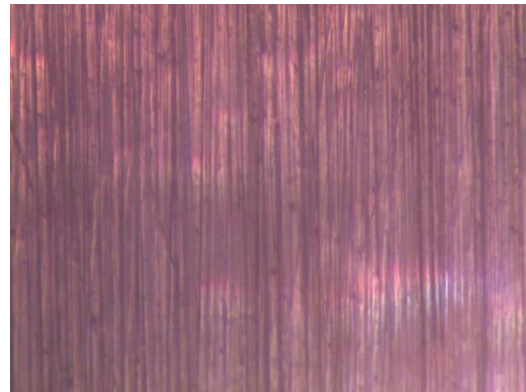
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

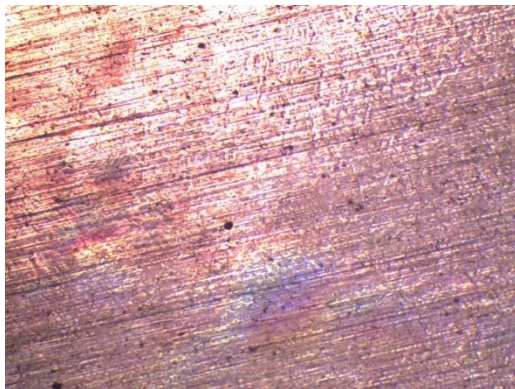


Probeta con recocido a 920 C

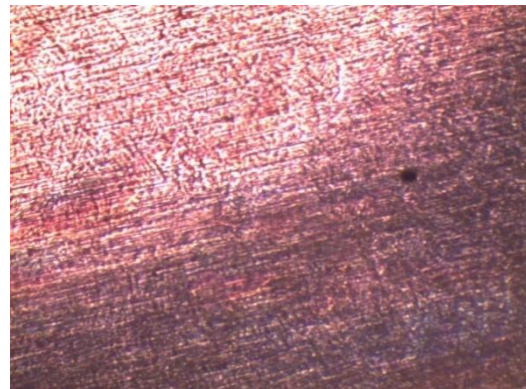


Probeta con recocido a 1070 C

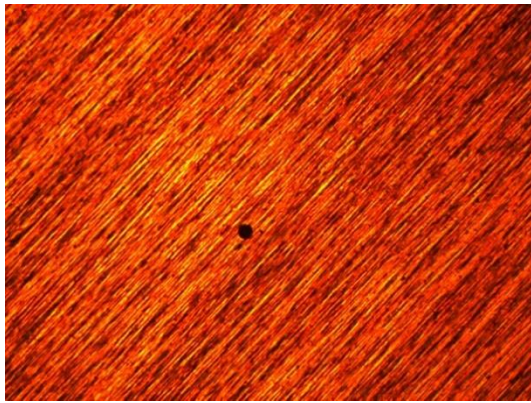
Figura 40. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 200x.



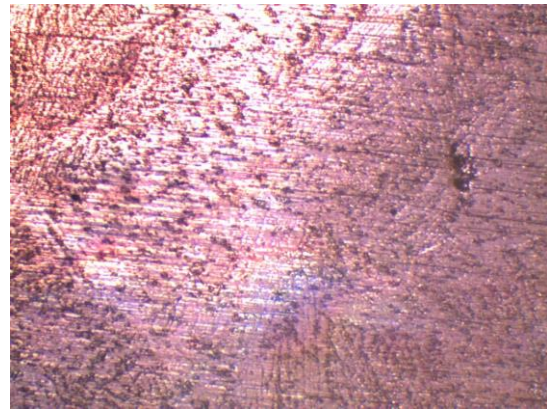
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

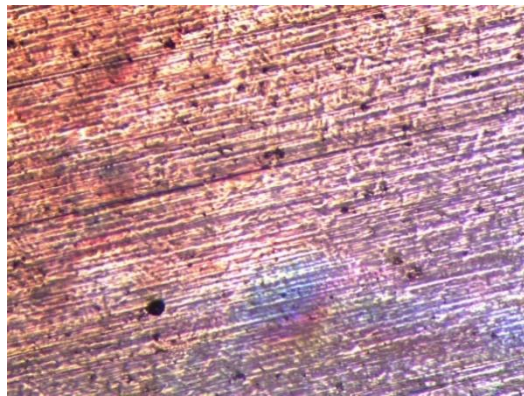


Probeta con recocido a 920 C

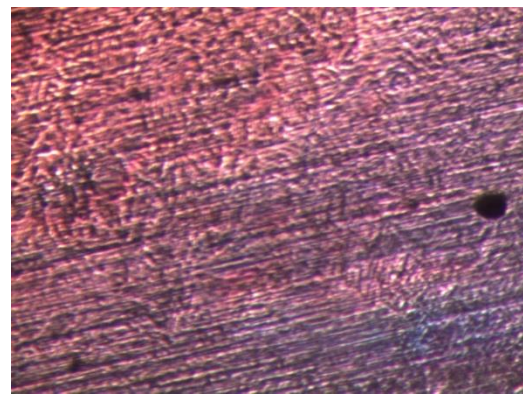


Probeta con recocido a 1070 C

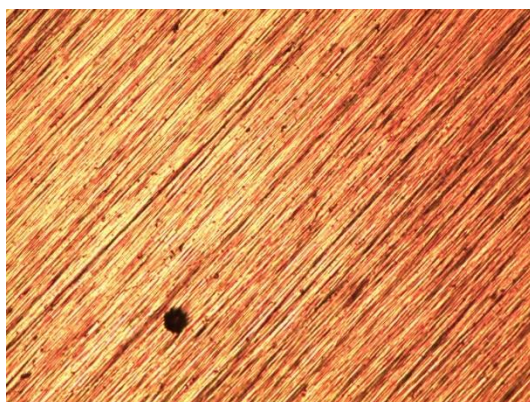
Figura 41. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1500 con un aumento de 50x.



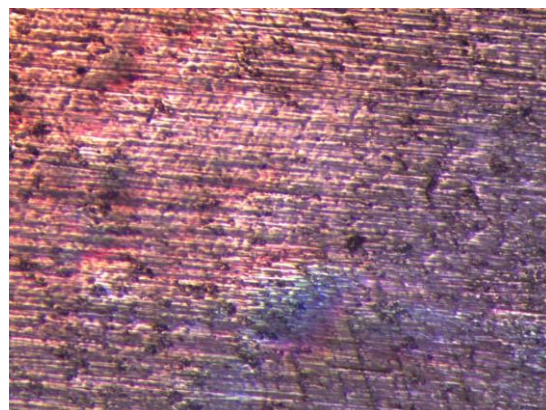
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

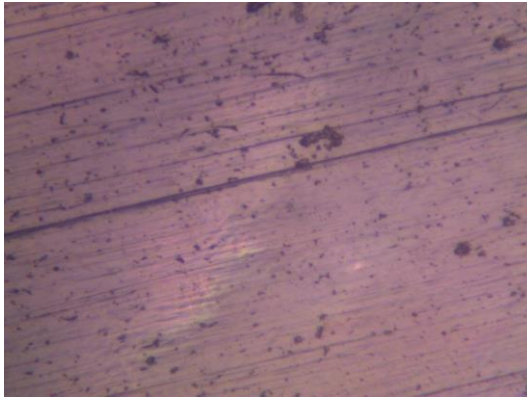


Probeta con recocido a 920 C

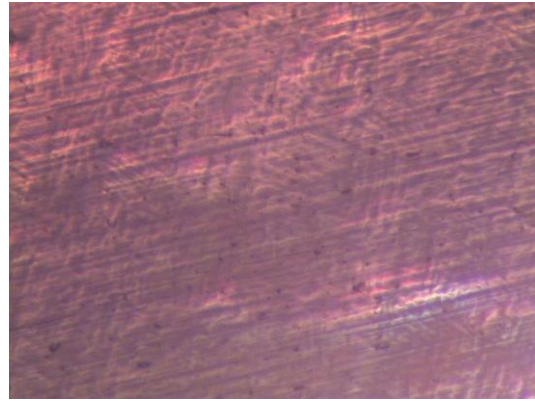


Probeta con recocido a 1070 C

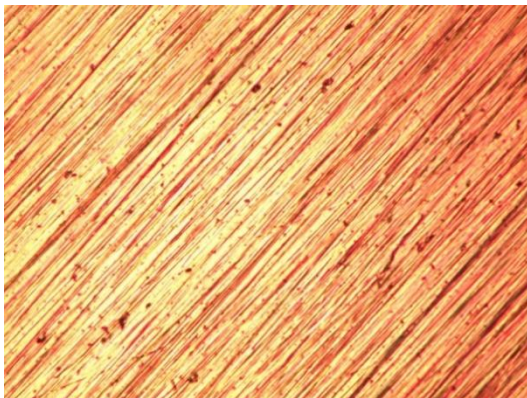
Figura 42. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1500 con un aumento de 100x.



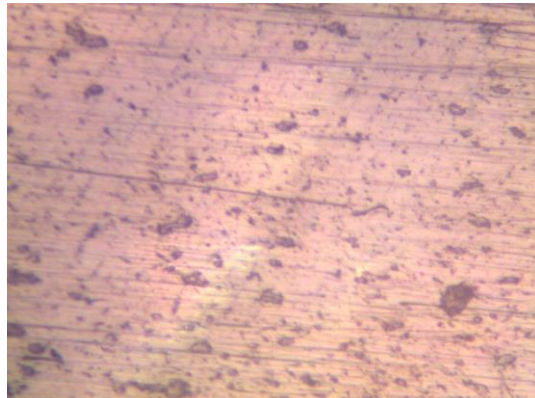
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

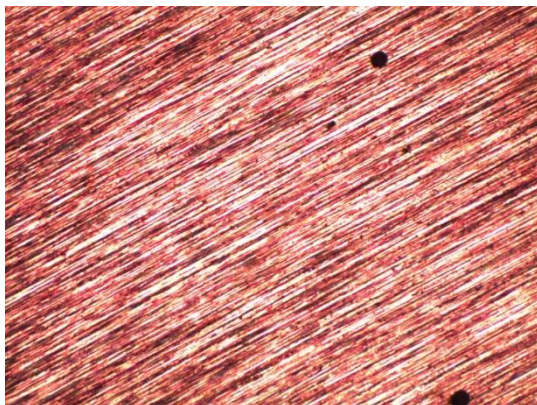


Probeta con recocido a 920 C

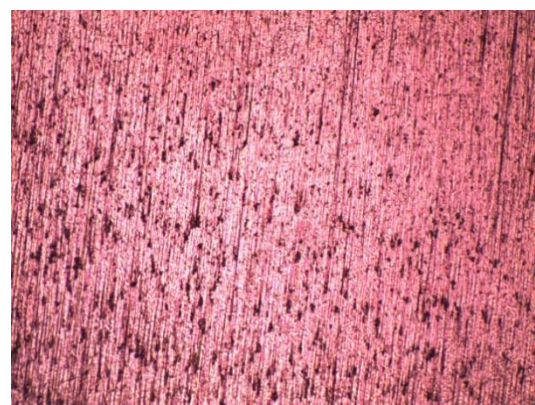


Probeta con recocido a 1070 C

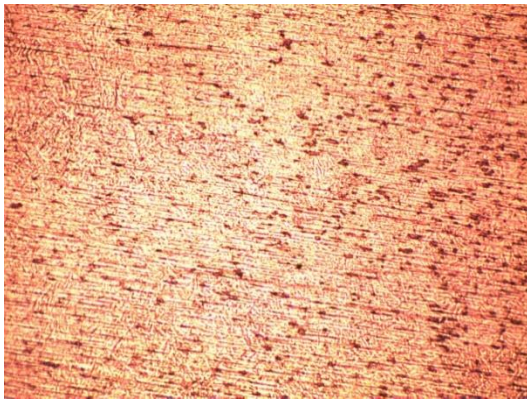
Figura 43. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P1500 con un aumento de 200x.



Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

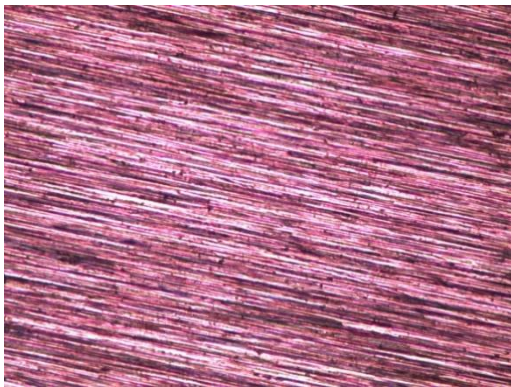


Probeta con recocido a 920 C

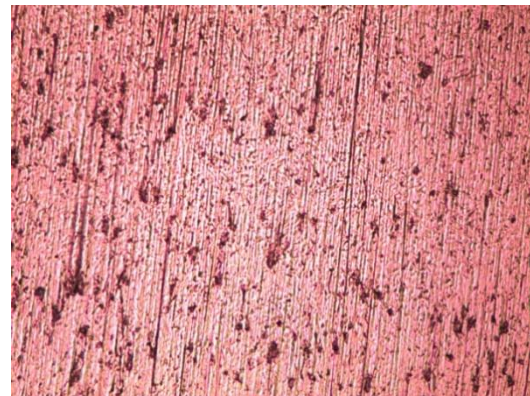


Probeta con recocido a 1070 C

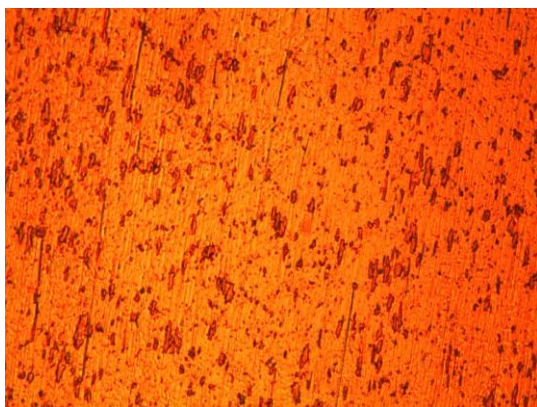
Figura 44. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P2000 con un aumento de 50x.



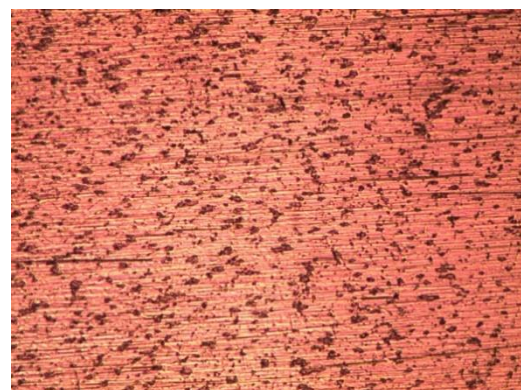
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

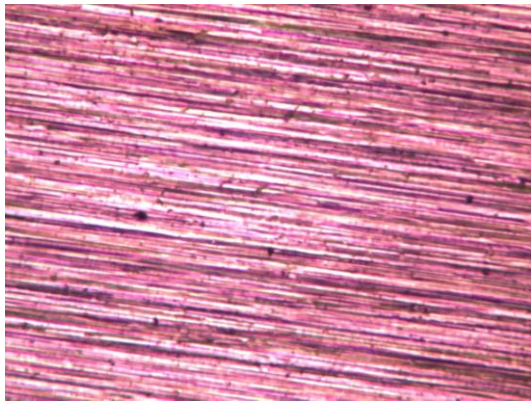


Probeta con recocido a 920 C

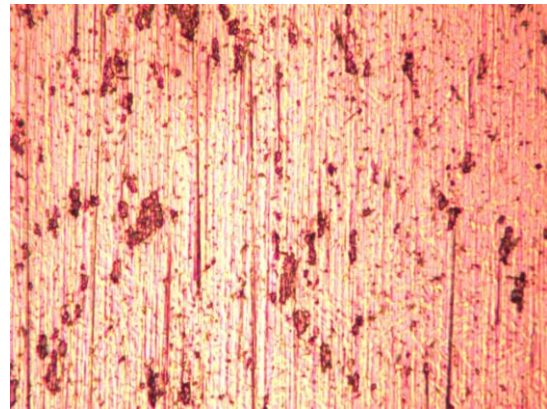


Probeta con recocido a 1070 C

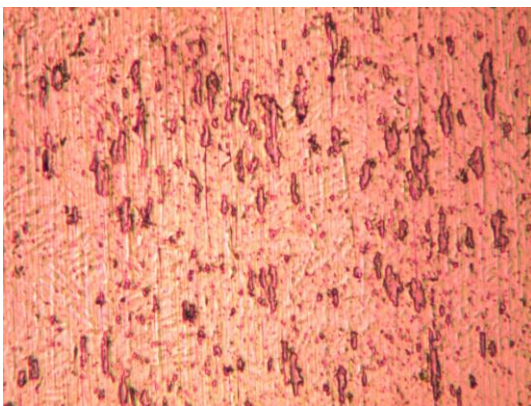
Figura 45. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P2000 con un aumento de 100x.



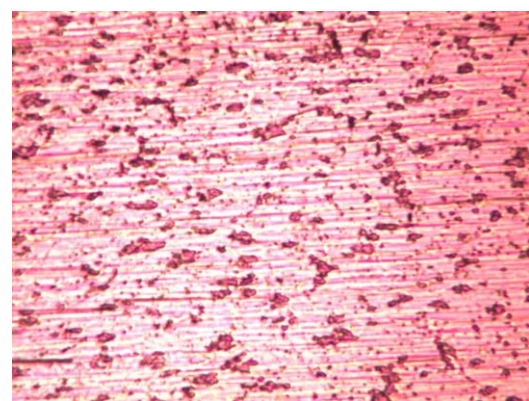
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

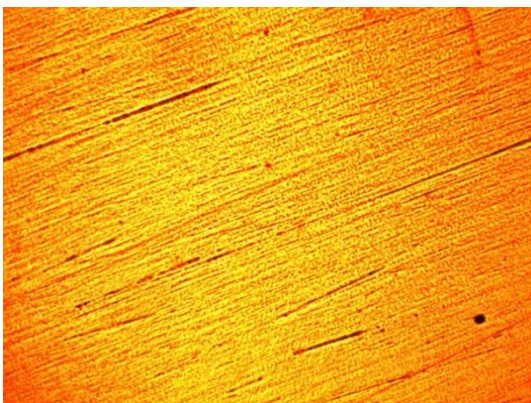


Probeta con recocido a 920 C

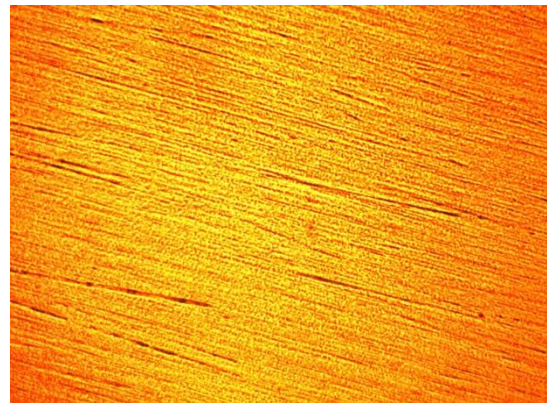


Probeta con recocido a 1070 C

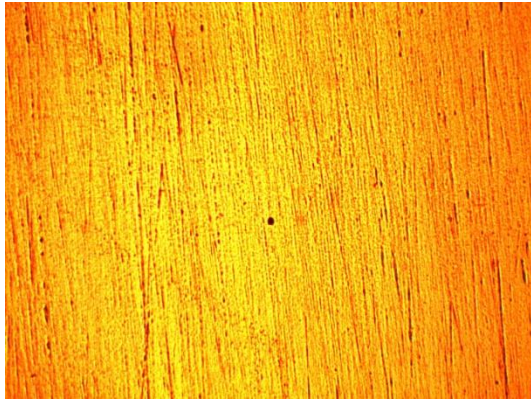
Figura 46. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P2000 con un aumento de 200x.



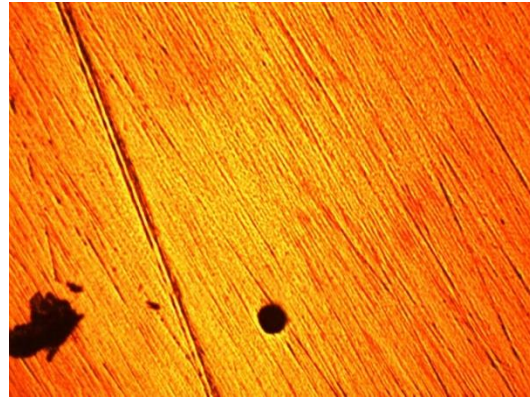
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

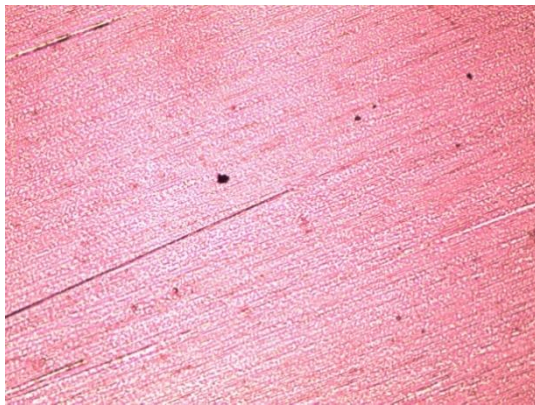


Probeta con recocido a 920 C

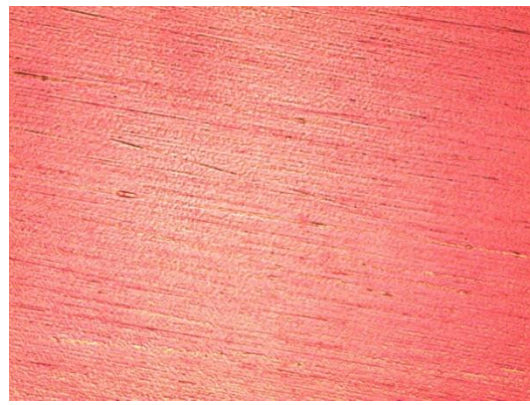


Probeta con recocido a 1070 C

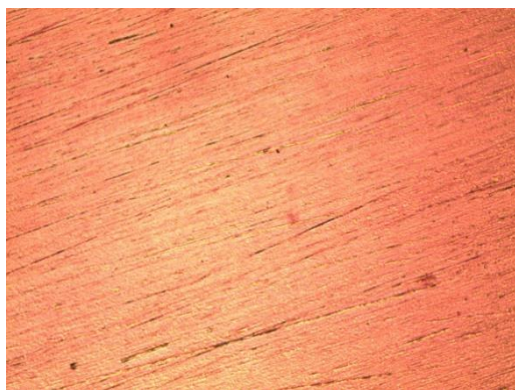
Figura 47. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P4000 con un aumento de 50x.



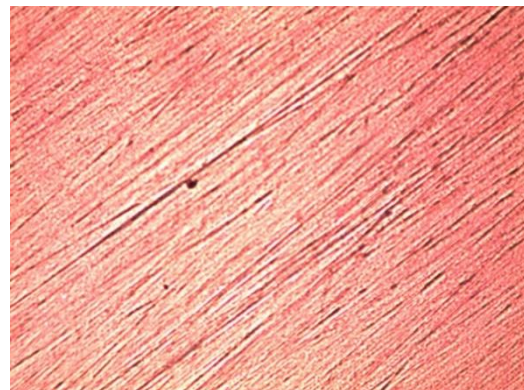
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

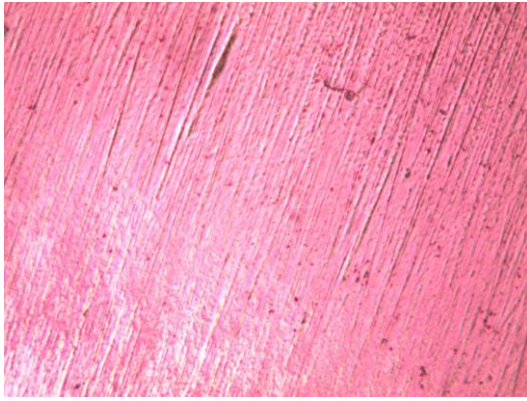


Probeta con recocido a 920 C



Probeta con recocido a 1070 C

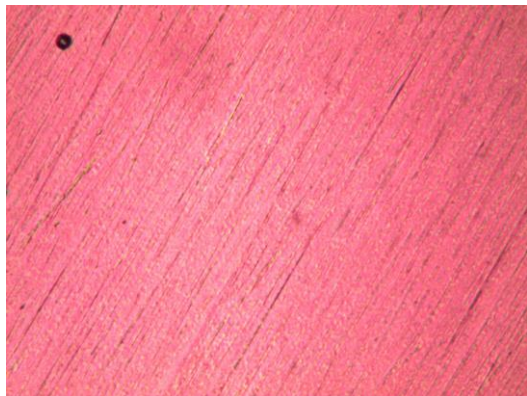
Figura 48. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P4000 con un aumento de 100x.



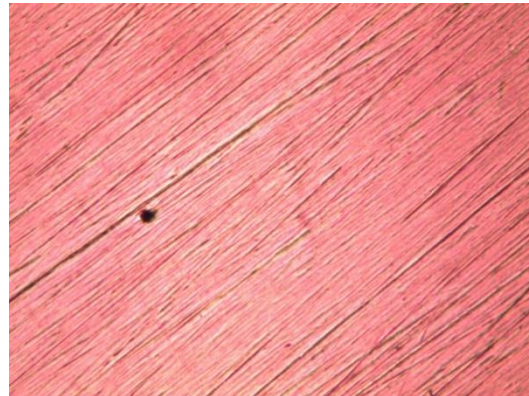
Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C

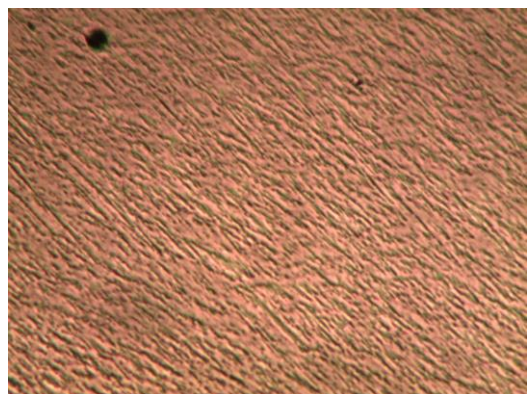


Probeta con recocido a 920 C

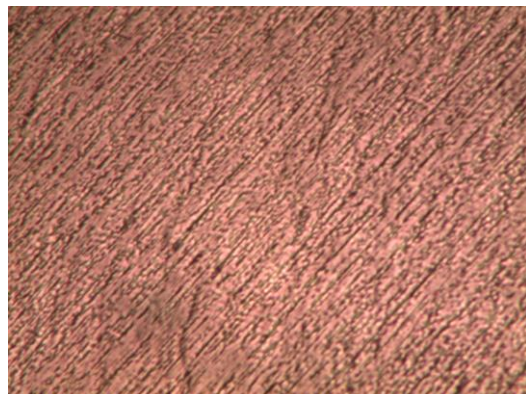


Probeta con recocido a 1070 C

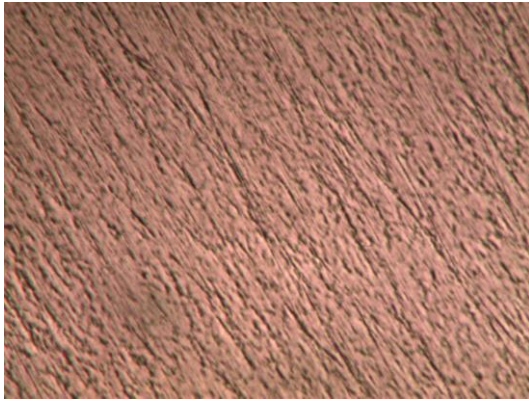
Figura 49. Preparación de la superficial con papel lija de denominación P4000 con un aumento de 200x.



Probeta tratamiento térmico



Probeta con recocido a 740 C



Probeta con recocido a 920 C



Probeta con recocido a 1070 C

Figura 50. Preparación de la superficial con pasta de diamante de 1 micra de tamaño de grano con un aumento de 200x.

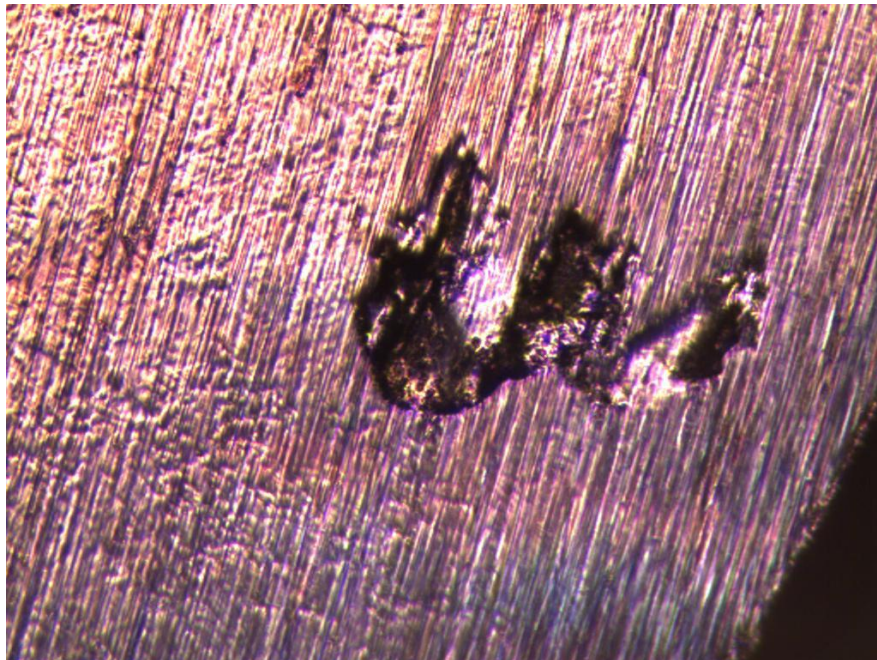


Figura 51. Presencia de un poro en la preparación metalográfica con papel lija de denominación P1200 con un aumento de 100x en la probeta con recocido a 740 C.

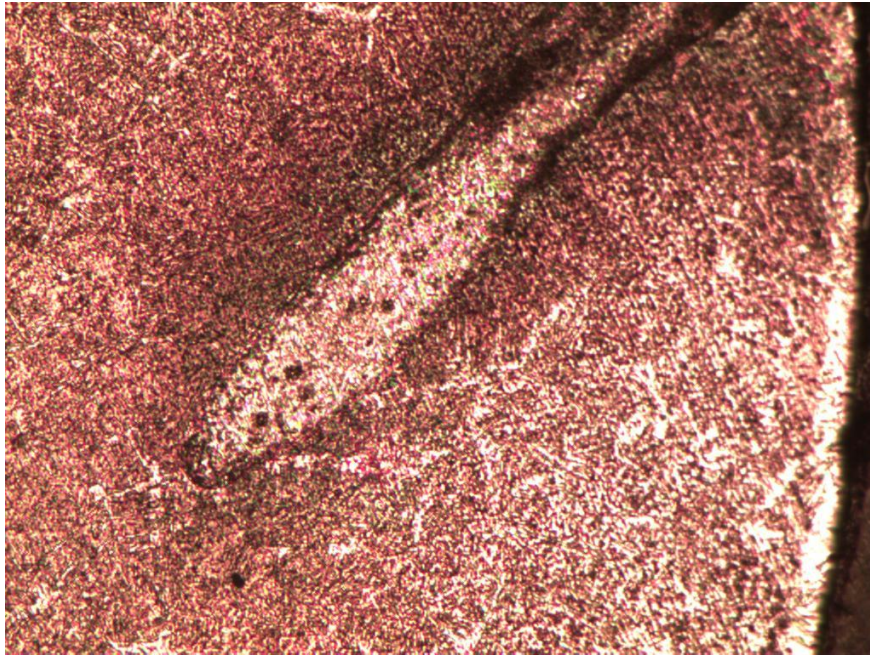


Figura 52. Probeta con recocido a 740 C después del ataque químico con un aumento de 100x.