

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Aplicación de la distribución de Weibull para la estimación del parámetro B10 del FFC, en función del espesor del adhesivo de la película PET en prueba de fatiga cíclica”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestría en Ingeniería

QUE PRESENTA:

Alejandra Muñoz Navarro

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Benjamín Valdez Salas

Mexicali, Baja California, Agosto 2021

Agradecimientos

A mi madre y hermana, gracias por apoyarme siempre en todos mis proyectos e ideas, aunque sean distintas a las tuyas, por escucharme, amarme y creer en mí.

A mi director de tesis, doctor Benjamín Valdez, gracias por su tiempo y asesoría, por compartir su conocimiento y experiencia, y por darme la oportunidad de estudiar con usted. Gracias por su infinita paciencia para conmigo, es una inspiración.

A las amistades que gané durante esta etapa, gracias por compartir esta experiencia y por inspirarme a ser mejor estudiante y persona, con ustedes cualquier camino se recorre dos veces y con gusto.

Al doctor Hernán Frem, gracias por sus consejos, tiempo y confianza, este trabajo no sería lo mismo sin usted. Gracias por impulsar el desarrollo integral de cada persona a su cargo.

A los ingenieros Martín Santibáñez, Javier Rodríguez y al doctor Joaquín Díaz, gracias por su apoyo, comprensión y paciencia durante estos años. Por sus consejos y por las discusiones de ingeniería que de este proyecto emanaron.

A mis maestros por su paciencia, tiempo y dedicación.

A todo el personal del Instituto de Ingeniería y del corporativo Furukawa que fue partícipe en el desarrollo de este proyecto. Gracias por su atención y profesionalismo.

Y a todas las personas que creyeron en mí incluso más que yo misma, los llevo en mi corazón y doy gracias a Dios por ustedes, a diario.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Planteamiento del problema	8
1.3 Justificación y uso de resultados	8
1.4 Objetivos de investigación	9
1.4.1 Objetivo general	9
1.4.2 Objetivos específicos.....	9
1.5 Hipótesis	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Tecnología de Adhesivos.....	11
2.1.1 Tipos de adhesivos.	12
2.2 Circuitos de cobre (el material)	16
2.2.1 Cobre de alta conductividad	17
2.2.1.1 Efecto de la temperatura en la conductividad.....	18
2.2.1.2 Efecto de las imperfecciones en la conductividad	18
2.2.2 Procesamiento y refinamiento de grano del cobre	19
2.3 Mecanismos de fatiga y fractura.....	20
2.3.1 Mecanismos de fatiga en materiales poliméricos.....	22
2.3.2 Efecto de la orientación cristalográfica en la resistencia a la fatiga.....	23
2.3.3 Técnicas de caracterización de defectos en análisis de fatiga.....	23
2.3.3.1 Espectroscopía Infrarroja.....	23
2.3.3.2 Microscopía electrónica de barrido.....	25
2.4 Distribución de Weibull, estadística y supervivencia.....	27
2.4.1 Curvas S-N	29
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	30
3.1 Caracterización de materiales	30
3.1.1 Análisis de película PET mediante FTIR.....	30
3.1.2 Análisis SEM/EDS de película PET	32
3.1.3 Análisis de dureza de película PET y muestras FFC.	34

3.1.4	Análisis de circuitos de cobre mediante interferometría.....	37
3.1.5	Análisis de corte de circuitos mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM).....	38
3.2	Diseño de experimentos de parámetros de proceso.....	39
3.3	Pruebas de fatiga.....	40
3.3.1	Descripción del equipo y condiciones de prueba.....	40
3.3.2	Preparación de las muestras de prueba.....	43
3.4	Análisis de fallas.....	48
3.4.1	Preparación de las muestras de análisis.....	48
3.4.2	Análisis mediante microscopía óptica.....	49
3.4.3	Análisis mediante microscopía electrónica (SEM).....	54
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS: DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL....		60
4.1	Aplicación de la distribución de Weibull.....	60
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS: FATIGA MECÁNICA Y MECANISMOS DE FRACTURA		71
5.1	Relación espesor de adhesivo y tiempo de vida.....	71
5.2	Mecanismos de fractura presentes en circuitos de cobre.....	74
5.3	Transformación morfológica en circuitos de cobre sometidos a fatiga.....	75
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		77
BIBLIOGRAFÍA		79
LISTA DE FIGURAS.....		84
LISTA DE TABLAS.....		86
ANEXOS.		88

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Un cable plano flexible, FFC (por sus siglas en inglés *Flat Flexible Cable*), es comúnmente utilizado como cable de conexión dispuesto internamente en dispositivos electrónicos del tipo de impresoras y escáneres, ya que debido a su alta flexibilidad puede ser utilizado como puente de conexión electrónica de partes en constante movimiento. La flexibilidad de este tipo de cables, como su nombre lo indica, es su característica principal, por lo que deben estar diseñados para transmitir señales y al mismo tiempo soportar una gran cantidad de movimientos cíclicos, dependiendo la aplicación a la cual serán dispuestos. Con este tipo de cables, existe la posibilidad de disponer en su diseño, una gran cantidad de conductores de cualquier longitud y/o alineación.

Cabe señalar que, convencionalmente, el FFC no requería ningún tipo de características eléctricas especiales, bastaba con que la conducción se diera en cada uno de los circuitos [1]. Por lo que, en los diseños de cables planos más básicos, como el que se muestra en la Fig. 1. 1, los conductores se mantienen en su posición gracias a la película a base de tereftalato de polietileno o algún otro polímero (generalmente de la familia de los poliésteres) similar a la capa adhesiva. Cuando éste se fabrica (generalmente mediante un proceso de laminación o extrusión) puede cumplir los requisitos de especificaciones básicas como la transmisión de señales eléctricas, únicamente a través de la adhesión de la base de película PET en ambos lados de los conductores. Sin embargo, debido a los recientes avances tecnológicos, las aplicaciones electrónicas cada vez requieren mayor velocidad en la transmisión de señales, por lo que, en cualquier aplicación de este tipo, se vuelve imperativo encontrar métodos de reducción de ruido y ondas electromagnéticas innecesarias. Algunos de estos métodos (los más sencillos), caen dentro de soluciones físicas, como reducción de la sección transversal de los conductores o separación del espacio entre estos, sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de este tipo de cables, el espacio es un punto clave, por lo que es extremadamente complicado modificar los diseños establecidos de su aplicación final [1, 2].

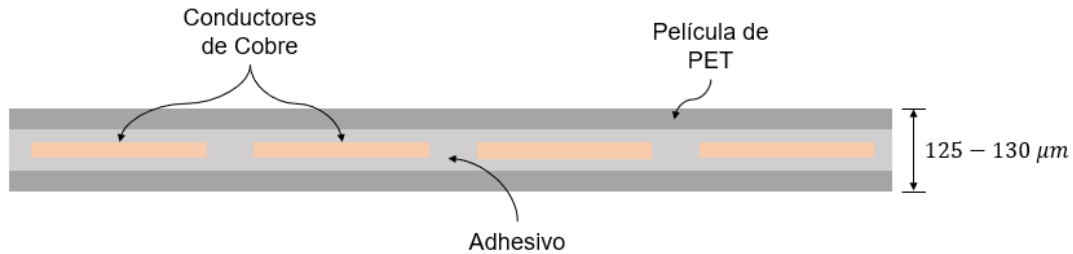


Fig. 1. 1 Diagrama de sección transversal de un diseño de cable plano utilizado en la industria automotriz.

Existe una gran cantidad de diseños de cables planos de mayor complejidad, los cuales disponen conductores en diferentes niveles por lo que requieren de varias capas de diferentes polímeros de protección y adhesión, la complejidad del diseño siempre dependerá de la aplicación final para la que se requiera el cable. Sin embargo, el alcance de esta investigación no abarca este tipo de aplicaciones, por lo que la explicación de dichos diseños se omite.

En electrónica automotriz, una de las aplicaciones destacadas de los diseños básicos de cables planos es en los dispositivos tipo *SRC* (por sus siglas en inglés *Steering Roll Connector*). Comúnmente, el sistema de dirección de los vehículos automotrices está diseñado por un volante y una columna de dirección, un *SRC* y un *montaje de interruptores multifuncional*. Entre el volante y la columna de dirección, el usuario tiene la posibilidad de manipular a placer la dirección del vehículo, el *montaje de interruptores multifuncional* tiene el objetivo de proveer un control de los diferentes dispositivos electrónicos del automóvil reduciendo la distracción que supondría al usuario controlar estos dispositivos desde su ubicación en el tablero de control, o el lugar donde se encuentren posicionados dentro del vehículo. Este montaje, se encuentra ensamblado sobre el volante de dirección y/o diferentes palancas posicionadas a los costados de éste. Entonces, el *SRC*, es el dispositivo mediante el cual se establece la conexión física y electrónica entre el *montaje de interruptores* y el panel de control de los diferentes dispositivos, estas conexiones se muestran de manera esquemática en la Fig. 1. 2.

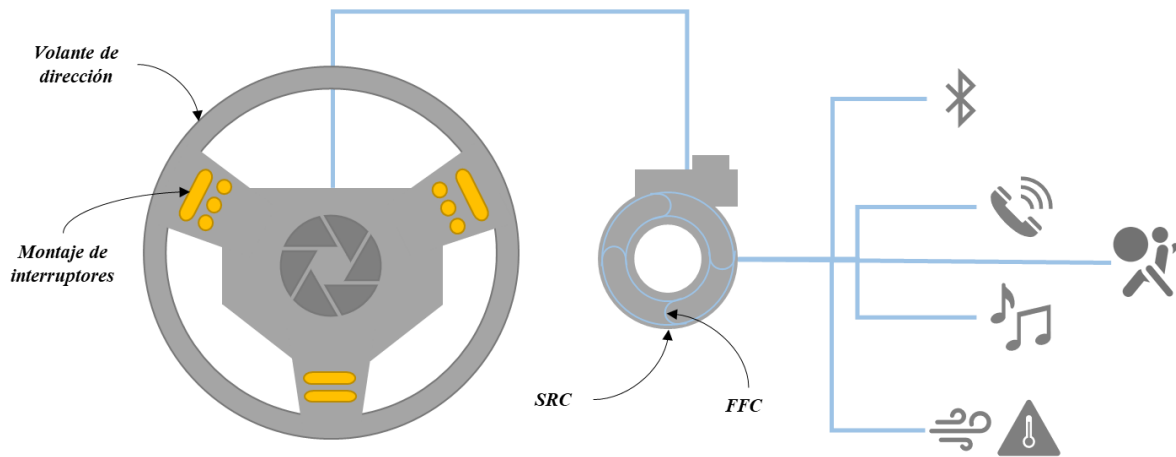


Fig. 1. 2 Diagrama de conexión de columna de dirección y controles de dispositivos del vehículo.

En el SRC, el cable plano se ensambla dentro de la cavidad de este, como se muestra en la Fig. 1. 3. En los extremos del cable plano se conectan terminales que permiten establecer la conexión física y comunicación electrónica entre el montaje de interruptores y el panel de control de los dispositivos; por lo tanto, en sentido amplio, el SRC permite que el usuario desactive los dispositivos deseados, así como que realice libremente movimientos del volante del automóvil manteniendo la conexión del volante de dirección con los controles establecidos [2].

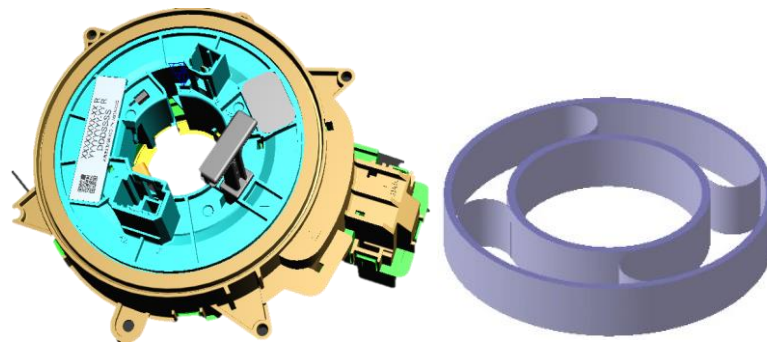


Fig. 1. 3 El cable plano (derecha) se ensambla dentro del SRC permitiéndole rotar y mantener una conexión; (diseño de referencia, cortesía Furukawa Automotive México).

Es decir, gracias al cable plano ensamblado dentro del SRC, los movimientos del volante son posibles sin perder conexión eléctrica del volante con el control de los diferentes dispositivos del vehículo. Se entiende entonces que, debido a los movimientos repetitivos de dicha

posición, el cable plano debe soportar una gran cantidad de ciclos antes de presentar falla o reducción de su capacidad de transmisión de señales eléctricas¹.

1.2 Planteamiento del problema

Se ha detectado que la vida rotativa útil del cable plano flexible utilizado en electrónica automotriz en el ensamblaje de dirección está condicionada por varios factores de los materiales con los que se elabora, entre ellos la película PET, la cual contiene un polímero adhesivo que funciona al mismo tiempo como base de fijación de los circuitos del cable y material de amortiguamiento ante la fatiga mecánica de estos. Para evaluar la vida cíclica del cable plano, éste se somete a pruebas con condiciones controladas de esfuerzo mecánico rotativo y temperatura, simulando las condiciones físicas que éste tendrá en su aplicación última (dispositivo SRC en el ensamblaje de dirección), teniendo como propósito llevarlo al final de su vida útil, para estimar, por medio de la distribución de Weibull, la cantidad de ciclos que soporta el producto antes de que el 10% de la población evaluada presente disminución en la transmisión de señales eléctricas.

Para las diversas configuraciones de cables planos utilizados en la aplicación mencionada, existen en la industria automotriz de diseño de SRC, requerimientos mínimos de vida cíclica que el cable debe cumplir. El limitado conocimiento de las características físicas, químicas y mecánicas de los elementos que componen el cable plano, en particular el adhesivo de la película PET y la transformación de la microestructura de los conductores ocasionada por procesos anteriores a la laminación del cable, supone el riesgo de la manufactura de producto que no cumpla con las especificaciones de la industria automotriz, suponiendo a su vez un riesgo potencial en un ensamble final del dispositivo que lo porta.

1.3 Justificación y uso de resultados

Uno de los principales componentes elaborados en la empresa Furukawa Automotive es el conector para la bolsa de aire SRC, cuya vida útil está definida por la cantidad de ciclos de rotación que éste puede soportar antes de presentar disminución de la transmisión de señales eléctricas, dada su posición en el automóvil, justo detrás del volante de dirección. Dicha

¹ Entiéndase por disminución de capacidad como el aumento de la resistencia eléctrica o impedancia del circuito.

cantidad de ciclos está intrínsecamente relacionada, entre otros factores, a la fatiga por rotación (fracturas de los circuitos, aumento de resistencia eléctrica debido a la fatiga mecánica, exposición a alta temperatura y paso de corriente, etc.) que sufren los circuitos de los cables planos ensamblados dentro de este dispositivo.

Por lo anterior, es de suma importancia detectar cuales factores del proceso de elaboración del cable plano son susceptibles a ser modificados y controlados de tal manera que se logre prolongar la supervivencia del material ante la fatiga rotativa, con la finalidad de cumplir con las especificaciones de vida de la industria automotriz en este tipo de productos.

1.4 Objetivos de investigación

1.4.1 Objetivo general

Definir los mecanismos de falla por fatiga cíclica del cable plano flexible en función del espesor y características mecánicas del adhesivo de la película PET para la prolongación de su estimación de vida útil.

1.4.2 Objetivos específicos

- Categorizar los efectos de la microestructura del conductor de cobre, y morfología de la película PET en los modos de falla por fatiga cíclica del cable plano.
- Describir la influencia de las variables del proceso de laminación sobre el adhesivo de la película PET del FFC.
- Evaluar los mecanismos de falla del cable plano flexible en la prueba de vida cíclica.
- Determinar un método apropiado de predicción de fallas del cable plano en función del espesor del adhesivo, aplicando la distribución de Weibull para la estimación de la supervivencia.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis 1.

“Las variables del proceso de laminación fuera de control o erróneamente establecidas producen deficiente homogeneidad en la distribución del adhesivo en ambos lados del material de aislamiento del cable plano, provocando que los esfuerzos de flexión y tensión durante la prueba de vida afecten directamente a los circuitos, ocasionando así fatiga prematura”

1.5.2 Hipótesis 2.

“Al controlar el espesor y las propiedades mecánicas del adhesivo de la película PET se logra prolongar los ciclos de vida del cable plano flexible sometido a pruebas de fatiga”

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Tecnología de Adhesivos

Los adhesivos han sido utilizados a lo largo de la historia, pero no fue sino hasta hace aproximadamente un siglo que los adhesivos empezaron a evolucionar de ser compuestos elaborados a base de productos naturales a productos elaborados a base de polímeros sintéticos.

La idea esencial de la teoría de adhesión es que siempre que hay contacto entre dos materiales a nivel molecular, habrá adhesión. Cuando dos materiales entran en contacto, habrá fuerzas de atracción en la interfaz formada entre ellos, se observa esta región de manera esquemática en la Fig. 2. 1; el tipo de fuerzas intermoleculares que se desarrollen dependerá de la naturaleza química de las superficies de los materiales en cuestión; estas fuerzas son principalmente de Van der Waals.

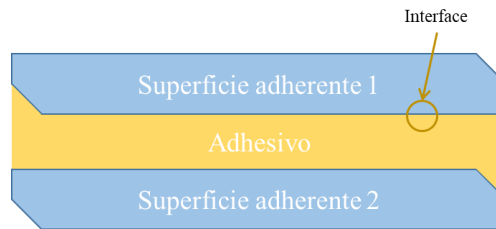


Fig. 2. 1 Diagrama de superficies de adhesión.

De acuerdo con Da Silva et. al., es posible describir tres etapas en la formación de un vínculo de adhesión. En primer lugar, el adhesivo debe estar en estado líquido para que se pueda esparcir fácilmente sobre la superficie y mojar propiamente los materiales a adherir para que así se pueda crear un contacto molecular estrecho entre el adhesivo y la superficie. En segundo lugar, para que el adhesivo pueda soportar las cargas de servicio, este debe endurecerse; muy a menudo, los adhesivos son monómeros que forman polímeros de mayor peso molecular (los adhesivos sensibles a la presión son una excepción ya que no endurecen, sino que permanecen en estado viscoso). Por último, se debe considerar que la capacidad de las uniones para soportar las cargas estará siempre en función de varios factores como el diseño de la unión, la forma en que se aplican las cargas, y el ambiente en que la unión se encuentra [3].

Debido a la naturaleza polimérica del adhesivo, las uniones adhesivas proveen excelentes propiedades de amortiguación otorgando a los materiales con los que están en contacto una mejor resistencia a la fatiga. Los adhesivos pueden unir materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica, ya que la flexibilidad de los adhesivos compensa esta diferencia.

Las aplicaciones de los adhesivos pueden ser muy eficientes ya que se pueden desarrollar fácilmente procesos automáticos para sus aplicaciones. Con ellos se crea un contacto íntimo entre las superficies unidas, lo que es bueno en términos estructurales y también ayuda a la resistencia a la corrosión ya que sella y aísla los espacios entre las estructuras, eliminando la probabilidad de corrosión por hendidura o galvánica. En caso de tratarse de materiales estructurales con diferencias en nobleza; así mismo son útiles en la prevención de fallas por corrosión bajo tensión (*SCC*, por sus siglas en inglés de *stress cracking corrosion*) debido a las propiedades de amortiguamiento que otorgan a las superficies de contacto [3].

2.1.1 Tipos de adhesivos.

Los adhesivos pueden ser clasificados de acuerdo con su *forma física, tipo de polímero, estructura molecular, formulación, método de curado o función*. A continuación, se explican brevemente las características de cada una de las clasificaciones de adhesivos [4].

2.1.1.1 Por su forma

En términos de su forma física, los adhesivos pueden ser líquidos, sólidos o pastas. Los líquidos suelen utilizarse donde un flujo o esparcimiento excesivo no es un problema. Las pastas generalmente están cargadas con minerales o compuestos tixotrópicos como polvo fino de sílice para obtener propiedades semisólidas de flujo no-Newtoniano. Los adhesivos en pasta o líquido pueden ser en una parte o dos partes. Es decir, un adhesivo de una parte puede contener un sistema de resina polimérica que cura directamente con la exposición a la humedad del ambiente, oxígeno, luz UV, o temperatura elevada. Un adhesivo de dos partes consiste en una porción de resina, denominada Parte A y una porción de un endurecedor o catalizador denominado Parte B, una de ellas contiene la carga química de agentes de adhesión y otra, los ingredientes de formulación.

Los adhesivos sólidos, pueden ser preformas que, con la adición de temperatura y presión, unirán dos superficies fluyendo, mojando y curando completamente como en las láminas de cobre pre-impregnadas de epoxi. Otras formas de adhesivos sólidos incluyen películas y cintas; estos tipos incluyen un agente portador de plástico o fibra de tela que carga para un mejor manejo y una definida línea de unión durante el curado. Algunos adhesivos sólidos pueden ser de fusión en caliente, estos son películas termoplásticas o pellets que funden al calentarse y vuelven a solidificar al enfriarse y son muy utilizadas en la fabricación de circuitos multicapa muy densos.

2.1.1.2 Por polímero o forma química

La mayoría de los polímeros usados en la industria de los electrónicos son resinas epoxi, silicones, acrílicos, poliuretanos, poliimidas y esteres de cianato; sin embargo, se debe tener especial cuidado en esta clasificación, ya que existen cientos de formulaciones para cada tipo; hasta para una formulación en específico, las condiciones de procesamiento provocan que el desempeño del vínculo de adhesión varíe de forma significativa.

Los polímeros adhesivos pueden ser clasificados como termoplásticos o termoestables, dependiendo si sus estructuras moleculares después del curado son lineales o no. Los adhesivos termoplásticos se funden y fluyen a una temperatura específica o dentro de un rango de temperatura pequeño, y después solidifican rápidamente al enfriarse. Aunque los termoplásticos son lineales, no todos los polímeros lineales son termoplásticos. Por otro lado, los adhesivos termoestables se reblandecen al incrementar la temperatura acercándose a la temperatura de transición vítrea, pero no se funden para solidificar. En lugar de este comportamiento, debido a sus macroestructuras de cadenas entrelazadas, se descomponen y carbonizan. Epoxis, esteres de cianato y fenoles generalmente caen en esta clasificación.

2.1.1.3 Por formulación

En muchos casos, en las formulaciones adhesivas, la porción de resina es la misma o similar y lo que determina sus propiedades es catalizador utilizado para el proceso de curado. Por lo que, dependiendo del endurecedor, los adhesivos epoxi pueden ser referenciados como curados con amina, curados con anhidro, curados con poliamida, entre otros. Estas formulaciones pueden ser basados en algún solvente o 100% sólidos.

2.1.1.4 Por método de curado

Los procesos de curado consisten en transformar resinas de bajo o moderado peso molecular (monómeros y oligómeros), generalmente líquidos, a polímeros sólidos de alto peso molecular. La mayoría de los métodos de curado involucran polimerización lo cual requiere de un catalizador o endurecedor y son iniciados por alguna forma de energía. Esta clasificación se divide esencialmente en el tipo de energía aplicada para el proceso de curado.

a) Curado por Calor

El calor es aplicado hasta que se alcanza la temperatura de polimerización y continúa hasta que ésta se complete. Se deben establecer esquemas de tiempo y temperatura de curado óptimos para cada adhesivo en los que se encuentren las mejores propiedades. El curado óptimo puede ser determinado por el grado de polimerización medido mediante espectroscopía infrarroja, análisis termo-mecánico (TMA, por sus siglas en inglés), o calorimetría de barrido diferencial (DSC, por sus siglas en inglés). Los tiempos y temperaturas de curado son esencialmente determinados por el catalizador empleado. Se han desarrollado para la industria electrónica, con la finalidad de reducir costos energéticos, adhesivos de esteres de cianato o de cianato modificados, los cuales tienen la capacidad de curar a temperaturas entre 160-170 °C en menos de 1 minuto. Estos adhesivos, forman estructuras estables de triazina² a altas temperaturas durante el curado.

b) Curado por luz UV/Luz visible

Los adhesivos que curan a la luz son altamente utilizados debido a que sus tiempos de curado son muy bajos (segundos) y generalmente no requieren la aplicación de energía calorífica. Su estructura química es tal, que al ser expuesta a luz UV en el rango de 2,000 - 4,000 angstroms comienzan el proceso de polimerización que tarda generalmente menos de 60 segundos. Estos adhesivos contienen generalmente acrílicos, vinilos, o grupos etileno en sus estructuras.

² Triazina es una estructura de un anillo heterocíclico, análogo al anillo de benceno, pero con tres átomos de carbono reemplazados por átomos de nitrógeno.

c) Curado por humedad

Estos adhesivos solo requieren la humedad ambiental para curar, ya que contienen grupos funcionales que han sido debidamente “bloqueados” y permanecen sin reaccionar hasta que son expuestos a la humedad. La humedad reacciona con los grupos bloqueados liberando los grupos funcionales permitiéndoles la polimerización. La desventaja de estos adhesivos es que pueden tardar días en curar por completo.

2.1.1.5 Por función

Esta clasificación separa los adhesivos por la función que han de desempeñar una vez colocados en su aplicación final, sus características más generales se describen en la Tabla 2.1, considerando las funciones principales para las que se utilizan este tipo de compuestos como sujeción o adhesión mecánica, conexión eléctrica (aquellos adhesivos conductores), disipación térmica, disipación de estrés, entre otras aplicaciones.

Tabla 2. 1 Clasificación de adhesivos por función [3].

Sujeción mecánica	Conexión eléctrica	Disipación térmica	Disipación de estrés
Son adhesivos utilizados para unir dos materiales diferentes, estos adhesivos deben producir suficiente resistencia al corte y a la tracción y mantener estas propiedades por el tiempo de vida esperado.	Algunos adhesivos pueden sustituir las soldaduras o los cables para formar conexiones eléctricas; por ejemplo, en la conexión de capacitores, resistores, o dispositivos semiconductores para circuitos impresos.	Algunas aplicaciones de este tipo de adhesivos son en dispositivos de poder, disipadores de calor, y componentes grandes como capacitores y transformadores.	Los adhesivos que reducen y disipan el estrés consisten en elastómeros con bajo módulo de Young. Adhesivos de bajo estrés se requieren al unir dados grandes, sustratos grandes y circuitos flexibles. Los adhesivos elastómeros de bajo modulo también se utilizan para unir y rellenar componentes grandes para amortiguar vibraciones o golpes.

En general, los adhesivos y selladores están diseñados para desempeñar diferentes propiedades o cubrir ciertas necesidades específicas, aunque generalmente utilizando formulaciones similares con los mismos materiales poliméricos. Por lo anterior, es importante conocer tanto la composición del adhesivo en cuestión, como su función y el

comportamiento que tiene o tendrá con los materiales con el que está o estará en contacto, así como el entorno en el cual estará presente en su aplicación final [3].

2.2 Circuitos de cobre (el material)

En la industria electrónica, las aleaciones de cobre son utilizadas en aplicaciones donde se requiere contar con altas propiedades de conducción térmica y eléctrica, además este tipo de aleaciones sobresalen por su alta resistencia a la corrosión, nobleza de fabricación y maquinabilidad, así como su resistencia a la fatiga. También poseen la característica de poder ser sometidas a diferentes procesos de soldado con facilidad.

Las aleaciones de cobre son utilizadas también con fines decorativos, ya que es posible tratar químicamente su superficie (haciendo uso de reacciones de corrosión que se presentan en cada aleación según su composición) de tal manera que es posible obtener diferentes colores aplicables con fines estéticos en muebles, estatuas o acabados arquitectónicos, entre otros. Las aleaciones de cobre son también muy utilizadas en arreglos de mecánica de fluidos como tuberías y accesorios de las mismas, debido a que (en la mayoría de las aleaciones) sus productos de corrosión forman una capa pasiva en la superficie, la cual inhibe a las reacciones de corrosión de afectar más allá de la superficie de la pieza y suponer un riesgo de fractura o daño al sistema. Sin embargo, cuando son expuestas a ambientes corrosivos, las aleaciones de cobre son altamente susceptibles al agrietamiento por corrosión bajo tensión (*SCC*, por sus siglas en inglés de *stress cracking corrosion*) o a la fragilización por hidrógeno [5].

Por otro lado, el cobre de alta pureza es mayormente utilizado en aplicaciones electrónicas como cables y alambres, contactos eléctricos, y la mayoría de las aplicaciones que involucran el paso de corriente. Ya que, es sabido que, cualquier metal en aleación tendrá una conductividad térmica o eléctrica reducida en comparación con el elemento en estado puro (o con mayor grado de pureza); cabe destacar que el grado de disminución de la conductividad en una aleación no depende intrínsecamente de la conductividad del elemento de aleación en solitario, sino del efecto y la distribución de los átomos del soluto en la red cristalina del solvente, en estos casos se habla de soluciones sólidas de una sola fase como los latones y bronces [5].

2.2.1 Cobres de alta conductividad

Entre los cobres de alta pureza, también denominados cobres eléctricos, el cobre electrolítico ETP (por sus siglas en inglés *Electrolytic tough pitch copper*) con la designación C11000 según el UNS³, es de los cobres más ampliamente utilizados de este grupo. Este material comúnmente es refinado electrolíticamente y posee la más alta conductividad de esta clasificación, ya que contiene menos de 50 ppm de impurezas metálicas totales. Por otro lado, el cobre libre de oxígeno OFC (por sus siglas en inglés *Oxygen-free copper*) con designación C10100 y C10200 del UNS, se obtiene mediante un proceso de fundición de un cátodo de alta pureza de cobre en condiciones no oxidantes en una atmósfera de baja concentración de hidrógeno. Este tipo de cobre es ampliamente utilizado en aplicaciones donde además de requerir una alta conductividad, se requiere alto grado de ductilidad, baja permeabilidad de gases y poca o nula tendencia a la fragilización por hidrógeno [5].

Recordando que la conductividad de los metales es definida por la estructura electrónica de los átomos y por la *movilidad* de los electrones, el efecto de las impurezas en la conductividad de los metales es que éstas dispersan los electrones, ocasionando un aumento en la resistencia debido a que la *trayectoria libre media* disminuye, ya que existen más zonas de posible colisión.

La trayectoria libre media de los electrones (λ_e) es la distancia entre colisiones (de éstos con cualquier otra partícula en la red), por lo tanto, entre mayor sea la trayectoria libre media, mayor es la conductividad del metal, ya que los electrones pueden viajar con mayor libertad y sin obstáculos [5, 6].

Únicamente como referencia, se presentan continuación ecuaciones que definen algunos de los conceptos de los párrafos anteriores.

$$\lambda_e = \tau \bar{v}$$

³ Unified Numbering System (UNS), traducido al español como Sistema de Numeración Unificado es un sistema diseñado por un grupo de asociaciones técnicas de la materia, con el propósito de evitar que un mismo material tenga más de un solo nombre o designación, o viceversa, que más de una aleación o metal sea designada con el mismo nombre o número [63].

Donde λ_e representa la *trayectoria libre media*, τ representa el tiempo medio entre colisiones y \bar{v} es la velocidad de deriva (velocidad con la que los electrones se mueven influenciados por el campo eléctrico aplicado).

$$\sigma = nq \frac{\bar{v}}{E} = nq\mu$$

La ecuación anterior representa la conductividad eléctrica σ , donde n es el número de electrones (o portadores de carga, sin embargo, se considera que en metales los portadores de carga son los electrones), q es la carga del electrón, E es el campo eléctrico (V/cm) y μ es la movilidad de los electrones ($\frac{cm^2}{V \cdot s}$).

2.2.1.1 Efecto de la temperatura en la conductividad

Por definición, el aumento en la temperatura de un material es el aumento de su energía interna, es decir, un aumento en las vibraciones de los átomos de su estructura. Por lo tanto, aunque se hable de un cristal perfecto o casi perfecto, el aumento de temperatura provoca un aumento en la dispersión de los átomos y defectos de la red, por ende, un aumento de la sección transversal de esta dispersión. Una mayor sección transversal se traduce en obstáculos más grandes para el movimiento de los electrones, por lo que aumenta la frecuencia de las interacciones entre ellos. Por lo tanto, la trayectoria libre media disminuye, disminuye la movilidad de los electrones, lo cual implica una disminución de la conductividad o aumento de la resistencia [6, 7].

Es importante resaltar que, una distinción importante entre metales puros y aleaciones es que, si bien por regla general un metal puro siempre tendrá una conductividad mayor en comparación con una aleación, las aleaciones poseen una mayor estabilidad en la conductividad o resistividad, en relación a las variaciones de temperatura [6, 8, 9].

2.2.1.2 Efecto de las imperfecciones en la conductividad

Así como con el aumento de vibraciones atómicas, las imperfecciones en la red cristalina de los metales tienen un efecto de aumento en la dispersión de los electrones y por lo tanto reducción de la movilidad. Por imperfecciones debe entenderse átomos de soluto en una solución sólida, dislocaciones, límites de grano, ausencias en la estructura de la red cristalina,

entre otros. En esta misma clasificación se pueden incluir las imperfecciones ocasionadas por los tratamientos de endurecimiento, proceso o técnicas de control de tamaño de grano.

Entre todos los tipos de imperfecciones, aquellas debidas al endurecimiento por solución sólida, son los que ocasionan un efecto mayor en la conductividad de las aleaciones, incluso mayor que el efecto del control del tamaño de grano o de las dislocaciones, las cuales al estar distribuidas con menor frecuencia a través de la red o por tratarse de defectos puntuales, permiten que grandes volúmenes de material conserven la estructura cristalina original o pura, permitiendo una trayectoria libre media mayor y por tanto, mayor conductividad [6, 7].

2.2.2 Procesamiento y refinamiento de grano del cobre

El tamaño y forma de grano no afectan de manera significativa la conductividad del cobre puro, como sí lo hace la variación de temperatura. Sin embargo, estas características sí se encuentran relacionadas a los esfuerzos que el material puede soportar, entiéndase por esto, flexibilidad del material, límite de deformación plástica, resistencia a fractura [10].

Si se consideran los cobres eléctricos como materiales de alta pureza, entonces se sabe que poseen microestructuras de una sola fase, y en caso de contener impurezas, éstas se encuentran en concentraciones muy bajas, por lo que se les considera soluciones sólidas y, por consiguiente, se siguen considerando de una sola fase [6].

Para la presente aplicación es utilizado cobre de alta pureza, electrolítico, en forma laminada, el cual inicialmente se encuentra en forma cilíndrica para posteriormente ser procesado con la finalidad de obtener una hoja delgada de cobre, con una sección transversal reducida y en forma rectangular. Como proceso final, comúnmente, también es procesado mediante corte mecánico para obtener una dimensión de ancho específica. Estos procesos generalmente son de deformación en frío, ya que se llevan a cabo sin aplicar calor externo al material [8, 11].

Los procesos anteriores tienen diferentes efectos en la microestructura de los materiales, aun cuando se hable de una sola fase, el tamaño de grano crece, decrece o se deforma tras someterse a los diferentes procesos de modificación de la forma final del metal; los procesos mecánicos de corte comúnmente, además de ocasionar deformación en el material, ocasionan en ciertos casos, grietas o microgrietas en la zona de corte.

La deformación en frío se considera un proceso de endurecimiento de los materiales, así como el endurecimiento por solución sólida, endurecimiento por dispersión o precipitación, entre otros. Sin embargo, para esta aplicación, el endurecimiento derivado de los procesos de deformación es indeseable, por lo que se recurre a procesos de refinamiento de grano que alivien los esfuerzos impresos al material. En el cobre puro se pueden llevar procesos de refinamiento de grano a temperaturas relativamente bajas (cercanas a los 200°C), debido a su baja temperatura de recristalización [10–12].

Tomando como referencia el concepto de flexibilidad, se considera que los cobres “suaves” tienen un comportamiento mejor que los cobres “duros”, sin embargo, los estudios llevados a cabo por Ryosuke et. al, concluyen que la resistencia a la flexión de los cobres duros se vuelve mejor que la de los cobres suaves al tiempo que el radio de doblez requerido (en experimentos de flexión radial) disminuye [13, 14].

2.3 Mecanismos de fatiga y fractura

Todos los materiales poseen un límite de resistencia a la deformación, este se define como el esfuerzo total de carga estática que puede soportar el material antes de rebasar su límite de deformación plástica y dar paso a la nucleación de una fractura (independientemente de la amplitud de la zona elástica de dicho material). En contraposición a lo anterior, las fallas o fracturas por fatiga, ocurren indistintamente por encima o por debajo del límite de resistencia a la rotura del material, puesto que el material es expuesto a esfuerzos bajos, pero repetitivos de compresión, tensión, flexión, expansión térmica, o alguno de otro tipo, lo que ocasiona una inevitable falla, aun cuando los esfuerzos aplicados se encuentren muy por debajo del límite de resistencia del material o de su límite elástico.

Las etapas principales de los procesos de falla por fatiga se pueden clasificar de la siguiente manera.

1. La nucleación de una grieta, normalmente localizada cerca de la superficie del material.
2. La propagación de la grieta de forma gradual.
3. La fractura repentina del material cuando la sección transversal del material ya no es suficiente para soportar la carga aplicada (aun cuando esta carga es muy pequeña).

Por lo tanto, se entiende que, en un proceso de falla por fatiga están involucrados procesos simultáneos de tensión cíclica, tensión de tracción y deformación plástica, en caso de faltar alguno de los tres procesos anteriores, una falla de este tipo no ocurrirá. Debido a que la deformación plástica ocasionada por la tensión cíclica propicia el inicio de una grieta, pero la tensión a la tracción es la que propicia la propagación de dicha grieta. Otros tipos de esfuerzos pueden estar involucrados en este tipo de fallas, sin embargo, los efectos principales se asocian a estos tres procesos [15, 16].

En materiales metálicos, las grietas comúnmente suelen iniciar en irregularidades cercanas o sobre la superficie, como algún defecto en procesos de corte o procesamiento, inclusiones, defectos en los límites de grano, cambios abruptos en la sección transversal de la geometría del material o de la fase dispersa (en caso de hablar de aleaciones de microestructuras complejas o más de una fase). En materiales aparentemente libres de defectos, pueden existir dislocaciones en la red cristalina, con los procesos de fatiga, las dislocaciones pueden apilarse en defectos del material y causar el inicio de una grieta mediante la formación de una banda de deslizamiento (por la acumulación de dislocaciones) o la disgregación de los granos por sus límites [6, 15].

Los ensayos de fatiga son utilizados para determinar condiciones de proceso aceptables para la producción en masa de los productos, o para indicar en qué rango de condiciones se pueden utilizar los materiales. Una prueba de fatiga debe indicar cuánto puede sobrevivir una pieza o las cargas máximas permisibles que pueden aplicarse sin provocar una falla. La vida de fatiga indica cuánto sobrevive un componente a un esfuerzo específico. Cuando se conoce el tiempo asociado con cada ciclo, se puede calcular un valor de fatiga en periodos de tiempo. Se puede concluir entonces que la resistencia a la fatiga es el esfuerzo máximo ante el cual la fatiga no ocurrirá dentro de un número determinado de ciclos [6, 17].

En la Fig. 2. 2 se muestra de manera secuencial los pasos que ocurren en el proceso de desarrollo de una falla por fatiga.

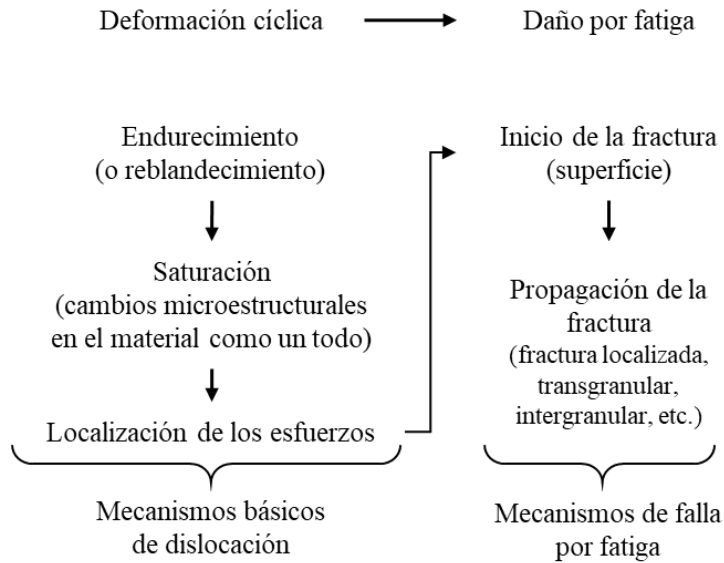


Fig. 2. 2 Secuencia de procesos en falla por fatiga en materiales metálicos [16].

2.3.1 Mecanismos de fatiga en materiales poliméricos

El comportamiento de fatiga en los polímeros está estrechamente relacionado a factores externos al material como temperatura, frecuencia, y ambiente, e internos como peso y densidad moleculares.

Los mecanismos de falla por fatiga en polímeros se pueden incluir en dos tipos generales, el primero comprende el comportamiento térmico del material, conocido como reblandecimiento o ablandamiento térmico; este mecanismo normalmente se encuentra en casos donde existen esfuerzos de altas amplitudes. El segundo, se describe en aquellos casos a esfuerzos de bajas amplitudes, en ellos normalmente se dan mecanismos de fatiga convencionales, con propagación convencional de grietas FCP (por sus siglas en inglés *Fatigue Crack Propagation*) similares a los metales, en términos generales en este último mecanismo se considera (para su análisis) un proceso cuasiestático de propagación de grietas con aplicación de carga intermitente [6, 15, 18].

Sin embargo, ya que los polímeros (en general) poseen bajas conductividades, su dependencia al aumento de temperatura es elevada, por lo que, desde una perspectiva termodinámica, parte del trabajo mecánico aplicado en el ciclo de carga-descarga del proceso

de fatiga se pierde como calor, y otra parte propicia procesos moleculares irreversibles los cuales pueden ser causa de deformaciones macroscópicas, microgrietas, entre otros [15, 18].

Es importante mencionar los mecanismos de falla por fatiga tanto de los polímeros como de los metales, ya que, como se ha mencionado anteriormente, el cable plano se compone de ambos materiales, y por tanto ambos se encuentran relacionados al momento de presentarse la falla.

2.3.2 Efecto de la orientación cristalográfica en la resistencia a la fatiga

Se sabe que la orientación cristalográfica de los materiales tiene una importante influencia en las propiedades físicas de los mismos, ya que, por ejemplo, los metales se deforman con mayor o menor dificultad dependiendo de las direcciones en que se apliquen los esfuerzos y las direcciones en las que los átomos están en mayor contacto, es decir, a lo largo de los planos en los cuales los átomos se encuentren más compactados. Por ejemplo, cuando ocurren las dislocaciones en las estructuras de los cristales, se forman bandas de deslizamiento relacionadas a los planos cristalográficos, ocasionando así los movimientos por dislocación [19, 20]. Otro ejemplo de la importancia de los planos cristalográficos es en los procesos de crecimiento de los cristales, la energía superficial de las distintas caras de un cristal depende de los planos cristalográficos del mismo [6, 17].

En el caso particular del cobre electrolítico para cables planos, existe información sobre la resistencia a la flexión que tienen estos planos durante las pruebas de fatiga. Se ha concluido que éstos poseen mayor resistencia a la fatiga en direcciones específicas, sin embargo, en los procesos industriales de producción de estos materiales es difícil controlar los planos cristalográficos resultantes, ya que comúnmente se obtienen orientaciones cristalográficas aleatorias, en estos casos se recomienda trabajar con el control del tamaño de grano para mejorar la resistencia a la fatiga [13, 19].

2.3.3 Técnicas de caracterización de defectos en análisis de fatiga

2.3.3.1 Espectroscopía Infrarroja

La espectroscopía infrarroja implica los espectros de absorción, emisión y reflexión en el rango infrarrojo del espectro electromagnético. Los espectros infrarrojos de especies

moleculares se pueden explicar si se supone que todos son resultado de distintos cambios energéticos producidos por las transiciones de las moléculas de unos estados de energía vibracionales y rotacionales a otros.

El espectro infrarrojo se divide en tres rangos, el infrarrojo cercano ($\lambda = 0.78 - 2.5 \mu m$), medio ($\lambda = 2.5 - 50 \mu m$) y lejano ($\lambda = 50 - 1000 \mu m$); siendo la región del infrarrojo medio la más utilizada, dado que las aplicaciones más importantes de esta región espectral se encuentran en el análisis cuantitativo de materiales industriales y agrícolas.

La espectroscopía infrarroja genera un espectro infrarrojo (llamado interferograma), en el cual se observa la absorción del analito por cada longitud de onda; el conjunto de absorciones de un espectro es característico de cada molécula. Para cada molécula, su espectro de absorción o transmisión constituye una “huella” de la misma, dicha combinación de absorciones en diferentes rangos del espectro se puede considerar única para cada especie.

Para absorber radiación infrarroja, una molécula debe sufrir un cambio neto en el momento dipolar cuando vibra o gira. Sólo en estas circunstancias el campo eléctrico circundante de la radiación puede interactuar con la molécula y modificar la amplitud de alguno de sus movimientos. En otras palabras, cuando una molécula vibra, se produce una fluctuación regular en su momento dipolar estableciéndose un campo que puede interactuar con el campo eléctrico asociado a la radiación [21].

Cabe mencionar que la espectrometría infrarroja es una técnica utilizada para análisis de materiales poliméricos, inorgánicos, orgánicos, biológicos, pero no en materiales metálicos. Su importancia en análisis de falla recae en las transformaciones estructurales que ocurren durante las pruebas de fatiga en polímeros, y en la caracterización de estos antes, durante y después del procesamiento del material. Se utiliza para caracterización del material base de falla, para detectar grados de degradación en polímeros, contacto químico entre especies, contaminación, entre otras [22].

Esta técnica analítica provee principalmente información cualitativa, y en ciertos casos, con esta técnica se pueden evaluar materiales en diferentes estados, tanto líquidos como sólidos duros, blandos o en estado viscoso, polvos, y gases. Los espectros obtenidos pueden ser

interpretados manualmente, sin embargo, es más común interpretarlos mediante comparación con una biblioteca de numerosos espectros con ayuda de un software de cómputo.

De las variantes de técnicas de análisis con espectroscopía infrarroja, la más ampliamente utilizada es la Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier o FTIR (por sus siglas en inglés *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), el espectro infrarrojo o interferograma obtenido es un gráfico con el *eje x* en unidades de frecuencia energética en micrones (μm) o más comúnmente es cm^{-1} , y en el *eje y*, la intensidad de energía absorbida en % de transmitancia o absorbancia con respecto a un blanco original [15].

2.3.3.2 Microscopía electrónica de barrido

Con la finalidad de sobrepasar los límites de resolución de las técnicas de microscopía óptica, la microscopía electrónica de barrido hace uso de un haz de electrones en lugar de luz visible para la formación de imágenes. Para lograrlo, el haz de electrones se acelera al vacío con un alto potencial eléctrico, el cual recorre trayectorias rectas comportándose como una onda similar a la luz visible alcanzando longitudes de onda hasta 100,000 veces más pequeñas; este haz de electrones interactúa con la muestra generando una serie de señales que serán procesadas por diferentes detectores, creando una serie de imágenes o espectros que delinea las características superficiales de la muestra, pudiendo proporcionar información de formas, texturas y composición química de sus constituyentes [23, 24].

La utilidad de los microscopios electrónicos de barrido SEM (por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscope*) en los análisis de falla de diferentes materiales es, principalmente, que esta tecnología otorga a los equipos la habilidad de crear imágenes de superficies no planas de áreas amplias a magnificaciones desde 10X hasta más de 100,000X, creando una imagen con aspecto tridimensional.

Es importante mencionar que las aplicaciones y uso de estos equipos dependerán enteramente del tipo de muestra a analizar, es imposible realizar un análisis SEM con los mismos parámetros a una muestra polimérica que a una muestra metálica, incluso entre metales hay diferencia, ya que la obtención de imágenes mediante esta tecnología se encuentra intrínsecamente ligada a la composición de la muestra y la interacción que esta tiene con el

haz de electrones. Por ejemplo, dependiendo de la aplicación específica es posible que se requiera variar durante el análisis el tipo de fuente de electrones, el tipo de señal a procesar y el alcance del sistema de vacío [24].

En los equipos SEM convencionales, se requiere que las muestras sean eléctricamente conductoras para prevenir la acumulación de carga en la superficie, fenómeno que genera la obtención de imágenes desenfocadas y distorsionadas. Para poder observar muestras poliméricas (las cuales normalmente tienen baja conductividad) se recomiendan dos acciones: recubrir la superficie con una delgada capa de material conductor, haciendo uso de técnicas de deposición química o física en fase vapor de especies conductoras; o cambiar el sistema de vacío por uno de bajo vacío, de esta manera se crea una interacción del haz de electrones con las partículas de gas en la cámara de muestras, esta interacción previene la acumulación de carga en la superficie de la muestra permitiendo la obtención de imágenes mediante electrones retrodispersados [15, 25].

2.4 Distribución de Weibull, estadística y supervivencia.

La estadística inferencial, a diferencia de la probabilidad, utiliza un razonamiento inductivo partiendo desde una muestra hacia una población, es decir, en un análisis estadístico de esta clase, el analista selecciona ciertas características de una muestra y esta información permite obtener conclusiones respecto de la población de donde se ha tomado esa muestra. En otras palabras, se asume, a partir de los resultados de una muestra, el comportamiento que tendrá la población de la cual ha sido tomada dicha muestra [26].

Los métodos para analizar la supervivencia de los materiales a algún fenómeno o condición específica son técnicas estadísticas inferenciales, ya que, generalmente se habla de pruebas destructivas a las que se somete el material, producto, o característica a evaluar, y lógicamente no es viable someter a destrucción una población entera para conocer el grado de supervivencia que esta posee, por tanto, se hace uso de muestras representativas para la obtención de resultados. Estos tipos de análisis tienen la finalidad de modelizar el tiempo que tardará en ocurrir un suceso en particular, llámese fractura total, falla parcial, disminución o aumento de una propiedad específica del material, entre otros.

Para la descripción de estos sucesos se utilizan comúnmente los modelos gamma, exponencial, Weibull y log-normal, sin embargo, es importante mencionar que los datos a analizar no siempre se ajustan a estos modelos, en ocasiones se utilizan modelos más generales. Algunas de las ventajas del método Weibull son que provee una razonable precisión en el análisis y pronóstico de fallas con muestras pequeñas y proporciona un simple y útil gráfico para los datos de falla que permite medir la vida característica, y provee un método analítico para comprobación [27, 28].

En palabras simples, la distribución de Weibull es un indicador de la variabilidad de la resistencia del material en correspondencia con la distribución del volumen de sus imperfecciones, citando a Askeland et. al, según la distribución de Weibull “la falla se debe al eslabón más débil de una cadena”, ya que la falla ocurrirá cuando las imperfecciones se encuentren con los esfuerzos a los que se someta el material [6].

En muchas aplicaciones se toma como parámetro determinante el tiempo de vida de cierto porcentaje de la población que ha sucumbido en las pruebas de falla, para encontrar el tiempo en el cual ese porcentaje de la población habrá fallado. Es decir, si se requiere estimar en qué tiempo (o cantidad de ciclos de fatiga) habrá fallado un determinado porcentaje de la población, se hace uso de esta distribución como se describe a continuación.

La *función de densidad de probabilidad* de la distribución de Weibull se expresa:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Donde α es el parámetro de vida característica (tiempo al cual habrá fallado el 63.2 % de la muestra) y β es el parámetro de forma, el cual indicará, dependiendo de su valor, si la tasa de fracaso disminuye, aumenta, o es constante con respecto al tiempo; de manera gráfica, β será la pendiente de la curva del gráfico logarítmico entre ciclos-tiempo de falla contra porcentaje de acumulación de fallas. Por lo tanto, para el cálculo de α como de β , es necesario utilizar técnicas de regresión lineal partiendo de los datos de las pruebas de fatiga [27, 29].

La función de distribución acumulativa se expresa de la siguiente manera:

$$F(t) = 1 - e^{-[\alpha(t-\gamma)^\beta]}$$

Donde γ representa el parámetro de locación, en la práctica, este parámetro comúnmente se asocia a la vida de anaquel de los productos, es decir, el deterioro que sufriría el producto o material a evaluar antes de entrar a la vida de servicio. Por lo tanto, en muchos casos este parámetro se ignora, despreciando el deterioro previo a la fatiga, simplificando la ecuación de distribución acumulativa de la siguiente manera:

$$F(t) = 1 - e^{-[\alpha t^\beta]}$$

Sin embargo, para la determinación del parámetro de vida a un porcentaje acumulado específico de la población se hace uso del *inverso de la función de distribución acumulativa*.

$$t = \alpha \{-\text{Ln}[1 - F(t)]\}^{\frac{1}{\beta}}$$

Por ejemplo, si se ha determinado que es necesario conocer el tiempo de vida al cual el 10 % de la población presentará una falla, el inverso de la ecuación anterior quedaría de la siguiente manera.

$$t = \alpha [-\text{Ln}(1 - 0.1)]^{\frac{1}{\beta}}$$

A esta función se le denomina en la práctica de ingeniería de diseño como B_x *Life*, el subíndice x indicará el porcentaje de acumulación al que se realiza el análisis, por lo tanto, el ejemplo anterior sería denominado B_{10} *Life*; esta función puede ser utilizada para la determinación de la supervivencia a cualquier porcentaje de población.

Se llega a este mismo resultado desde la *función de fiabilidad para la supervivencia de la población*, la cual se muestra a continuación [30].

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

$R(t)$ representa la probabilidad de supervivencia de la población a determinado tiempo, t representa el tiempo al cual dicho porcentaje de la población ha sobrevivido, es decir, en este caso el porcentaje de población que sobrevive es una función del tiempo transcurrido, si lo que se desea conocer es el tiempo al cual sobrevivirá cierto porcentaje de la población, entonces la ecuación anterior se expresa de la siguiente manera [31].

$$t = \alpha[-\ln R(t)]^{\frac{1}{\beta}}$$

2.4.1 Curvas S-N

Ya que la distribución y análisis de Weibull toma en cuenta únicamente cantidad de muestras y tiempo de falla de estas a determinadas condiciones de prueba, es necesario considerar análisis que sí tomen en cuenta los esfuerzos aplicados en las pruebas. Para esto, generalmente se utilizan las curvas S-N (o de Wöhler), en las cuales se grafica el esfuerzo a los cuales se someten las muestras en función de los ciclos a la falla, datos obtenidos mediante experimentación.

Sin embargo, los experimentos que se llevan a cabo para construir las curvas S-N, usualmente son largos y requieren una gran cantidad de muestras preparadas y controladas a condiciones estrictamente similares, las cuales deben someterse a diferentes grados de estrés lo cual permite la construcción de curvas con la mayor cantidad de datos estadísticos posibles disminuyendo así, en la medida de lo posible, la dispersión de la fatiga. Se entiende que, en todo experimento de esta clase existirá una dispersión de la fatiga, derivado de pequeños cambios en la composición, estructura y procesamiento de los materiales [6, 15, 16].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.1 Caracterización de materiales

3.1.1 Análisis de película PET mediante FTIR.

Se procedió a la realización de pruebas para encontrar el espectro infrarrojo de cada uno de los diferentes tipos de adhesivos que se procesan en la fabricación del cable plano, la identificación a utilizar para ellos es P1 y P2. Encontrando los grupos funcionales presentes en cada uno de ellos se propone una caracterización del tipo de adhesivo en las clasificaciones anteriormente descritas.

Para determinar los componentes que otorgan las propiedades a este material y suponen diferencias de desempeño entre ellos, se realiza el estudio de Fig. 3. 1 para obtención del espectro de transmitancia utilizando un instrumento FTIR Frontier de Perkin Elmer acoplado con un accesorio ATR Universal con un rango de 4000 a 400 cm^{-1} , programado para coleccionar 16 espectros por muestra, con la finalidad de reducir la variación que se pueda presentar en la obtención de cada uno de los espectros.

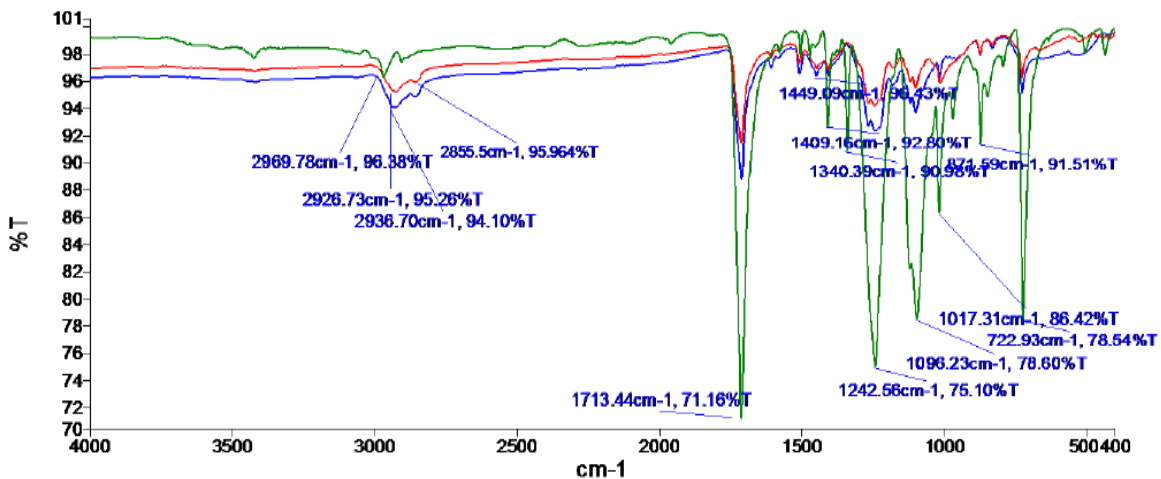
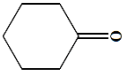


Fig. 3. 1 Espectro infrarrojo de ambos adhesivos y de la película PET por la cara externa (azul P1, rojo P2, verde lado externo).

El banco de espectros del fabricante del equipo clasifica los materiales P1 y P2 como Poli (1,4-Ciclohexano dimetileno tereftalato), con un valor de correlación de 84% y 82%, respectivamente. La parte externa de la película PET se identifica como un poliéster con una

correlación de 85%. Con la última identificación hay concordancia puesto que el PET (tereftalato de polietileno) se clasifica en la familia de los poliésteres. A continuación, en la Tabla 3. 1 se hace un esfuerzo por clasificar los picos de transmitancia más significativos identificados en los espectros de las diferentes caras de las dos muestras de películas PET.

Tabla 3. 1 Bandas de transmisión significativa en espectros de adhesivos [32–34].

Bandas cm^{-1}	Interpretación
2969 (96% T)	-
2926, 2936 (94,95% T)	Alcano
2855 (95% T)	Anillo de 6 miembros (o más)
1713 (71% T)	
1242 (75% T)	-

Respecto a este estudio, se encuentran componentes que se puede esperar en un compuesto adhesivo, en específico concuerda en varios puntos y formas con un adhesivo sensible a presión [35].

Como se puede observar en los espectros IR, se concluye que en ambos adhesivos existen los mismos componentes, dado que sus espectros son muy similares, por lo tanto, la causa de variación en sus propiedades se debe a la variabilidad en la concentración de estos componentes, ya que también se observa una ligera diferencia en el porcentaje de transmitancia en algunos picos.

3.1.2 Análisis SEM/EDS de película PET

Para la fabricación de los cables planos en cuestión, se manejan dos tipos de películas PET las cuales no presentan diferencias dimensionales entre ellas, sin embargo, teóricamente sí otorgan distintos valores de adherencia, por lo que se infiere que los adhesivos varían en su composición y no en la cantidad de adhesivo. Para determinar los componentes que otorgan las propiedades a este material y suponen diferencias de desempeño entre ellos, se hace uso de la microscopía electrónica de barrido para la medición de las dimensiones del espesor de la capa de la película PET y de la película de adhesivo, así como para detectar la presencia de los diferentes elementos que las componen mediante análisis espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Una compilación de los resultados obtenidos se enlista en la Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2 Composición de la zona del adhesivo de P1 y P2.

P1	Elemento					
	O	C	Al	Ti	As	Sb
Promedio	25.6	62.3	5.94	3.30	0.40	2.40

P2	Elemento				
	O	C	Al	Ti	Si
Promedio	26.0	65.9	4.9	2.1	0.7

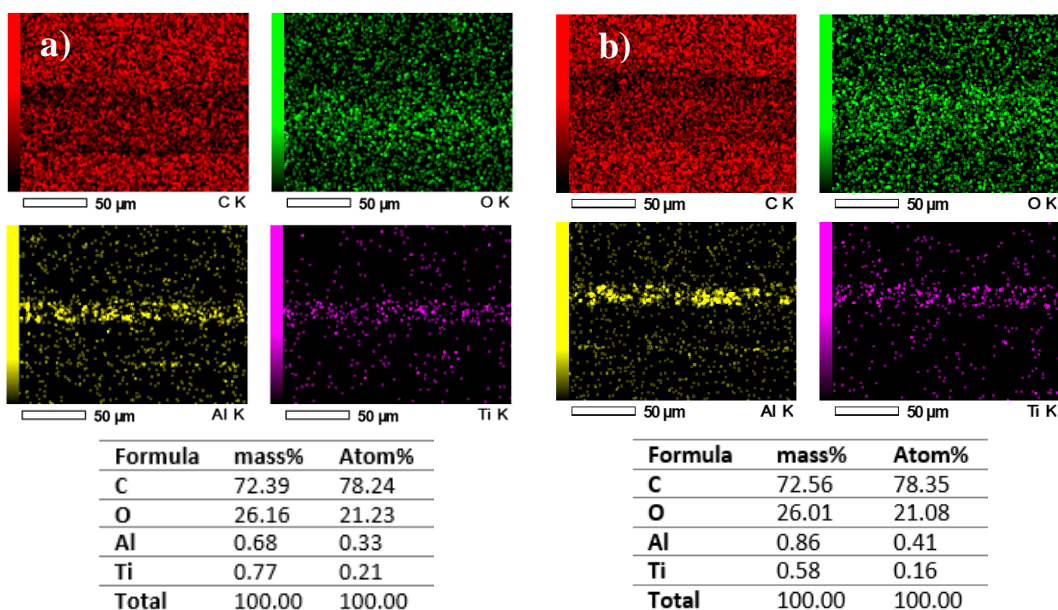


Fig. 3. 2 Mapeo elemental por EDS de zona transversal de los adhesivos de las películas a) P1 y b) P2.

Con la misma técnica se realizaron análisis mediante mapeo elemental, los resultados se muestran en la Fig. 3. 2.

Utilizando la técnica de montaje metalográfico en frío, y observando las muestras en SEM se encontraron las dimensiones descritas en la Tabla 3. 3 e ilustradas en la Fig. 3. 3. El material que se observa con mayor acumulación de carga se identifica como el adhesivo.

Tabla 3. 3 Dimensiones de espesor de la película PET.

Material	Dimensiones (μm)		
	PET	Adhesivo	Total
NC6002	30.86	16.50	47.36
NC6049	32.00	16.43	48.43

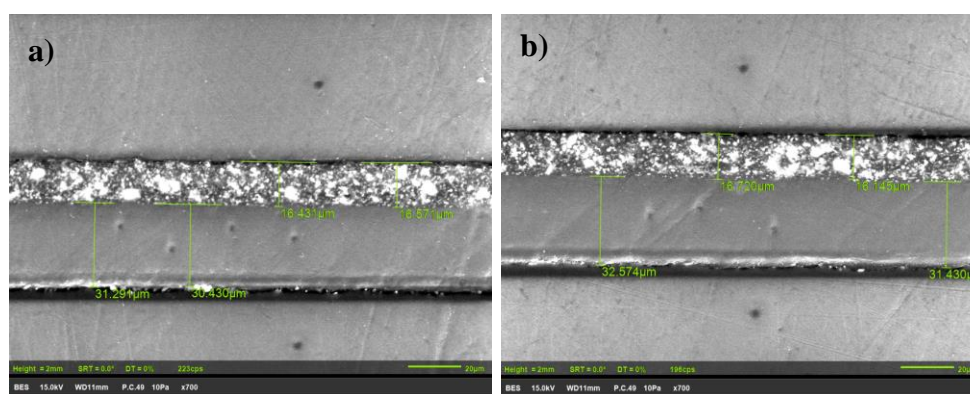


Fig. 3. 3 a) Dimensiones P1, b) Dimensiones P2.

Respecto al análisis EDS, se reafirma que las composiciones elementales son muy similares, con algunas variaciones en la presencia de Arsénico, Silicio y Antimonio, al realizar el mapeo elemental estos últimos componentes no se detectaron, presentando así mayor similitud en las composiciones, únicamente variando ligeramente en contenido de Aluminio y Titanio.

Respecto al análisis dimensional, no se encontró diferencia significativa entre ambas películas de PET, teniendo una variación entre ellas de menos de $1.0 \mu\text{m}$ como se observa en la Tabla 3. 3, por lo que la diferencia dimensional entre películas se descarta como causa de distinción en el desempeño. Sin embargo, la adquisición de estos datos es importante, ya que será necesario para compararlo con material después del proceso de laminado y posterior a la prueba de fatiga, puesto que se pretende determinar si la variación en el nivel de resistencia

a la fatiga está relacionada con el espesor de esta película y cómo este cambia durante el proceso de fabricación del cable.

3.1.3 Análisis de dureza de película PET y muestras FFC.

Se realizaron ensayos de dureza en PET con la finalidad de observar esta propiedad y evaluar el cambio antes y después de la prueba de fatiga, para determinar si existe un endurecimiento que provoque daño en los circuitos, como lo plantean algunos autores, tanto para polímeros como para aleaciones de cobre [36, 37].

De acuerdo con los datos obtenidos presentados en la Tabla 3. 4, y graficados en la Fig. 3. 4, se observa una ligera tendencia hacia arriba en la dureza de la cara exterior del PET después del proceso de laminado y aún mayor después de las pruebas de fatiga. Los ensayos se realizaron con una variación de fuerza de penetración de 0.003, 0.005 y 0.01 kg utilizando un equipo Mitutoyo modelo HM-100.

Tabla 3. 4 Mediciones de microdureza Vickers.

<i>Sample</i>	<i>Name</i>	<i>Force</i>	<i>Penetration</i>	<i>HV 0.01</i>	<i>Penetration</i>	<i>HV0.005</i>	<i>Penetration</i>	<i>HV 0.003</i>
T1	Pet Film FFC	0.01	36.8	23.7	51.5	23.0	23.9	25.2
T2	Pet Film FFC	0.01	35.5	22.3	38.9	23.6	24.3	23.8
T3	Pet Film FFC	0.01	23.6	22.9	49.8	24.8	24.1	25.9
T4	Pet Film over Cu	0.01	107.7	21.9	45.9	22.5	24.3	22.6
T5	Pet Film over Cu	0.01	88.8	21.5	52.3	24.3	21.7	21.7
T6	Pet Film over Cu	0.01	74.1	22.8	52.6	21.0	13.0	21.6
T8	Pet Film P2 Glue side	0.01	67.3	13.9	81.5	18.8	144.3	14.0
T9	Pet Film P2 Glue side	0.01	26.3	15.4	40.3	14.3	14.1	14.0
T10	Pet Film P2 Glue side	0.01	45.9	15.5	6.3	17.2	7.4	11.3
T11	Pet Film P2 PET side	0.01	164.5	25.3	107.7	21.4	201.6	20.2
T12	Pet Film P2 PET side	0.01	36.0	21.4	101.7	23.9	40.3	18.5
T13	Pet Film P2 PET side	0.01	24.8	22.4	100.8	23.6	19.9	22.1
T14	Pet Film P1 Glue side	0.01	24.1	14.9	14.9	14.6	86.0	12.9
T15	Pet Film P1 Glue side	0.01	18.1	13.9	17.5	15.5	67.2	14.2
T16	Pet Film P1 Glue side	0.01	16.0	14.0	16.0	14.3	48.1	16.0
T17	Pet Film P1 PET side	0.01	158.5	21.1	191.4	21.8	2.7	22.4
T18	Pet Film P1 PET side	0.01	193.7	21.2	206.3	22.2	7.0	22.1
T19	Pet Film P1 PET side	0.01	212.0	21.9	233.2	24.5	14.7	23.6
T20	Pet After Bending test	0.01	353.4	26.3	128.9	22.4	274.9	18.9
T21	Pet After Bending test	0.01	349.3	22.8	132.4	23.9	159.5	23.6
T22	Pet After Bending test	0.01	358.2	29.0	83.5	25.0	166.6	19.8
T23	Pet After Bending test	0.01	290.5	22.6	69.0	24.5	67.2	21.1
T24	Pet After Bending test	0.01	231.6	22.0	63.8	26.9	48.3	28.1

La tendencia se mantiene con la variación de carga, así como la penetración. Sin embargo, ésta última se encuentra en muchos de los ensayos por encima de las 50 μm , lo cual no corresponde a los espesores del adhesivo o del PET, ya que estos están en el rango de 40-45 μm .

Analizando la Fig. 3. 4 se observa que el alcance de la penetración disminuye con respecto a la carga de prueba, sin embargo, la ampliación de la distribución aumenta, es decir, en el ensayo con menor carga la dispersión de los resultados es mayor. Esto indica que, a menor carga, los resultados presentan una variación más considerable que con cargas mayores.

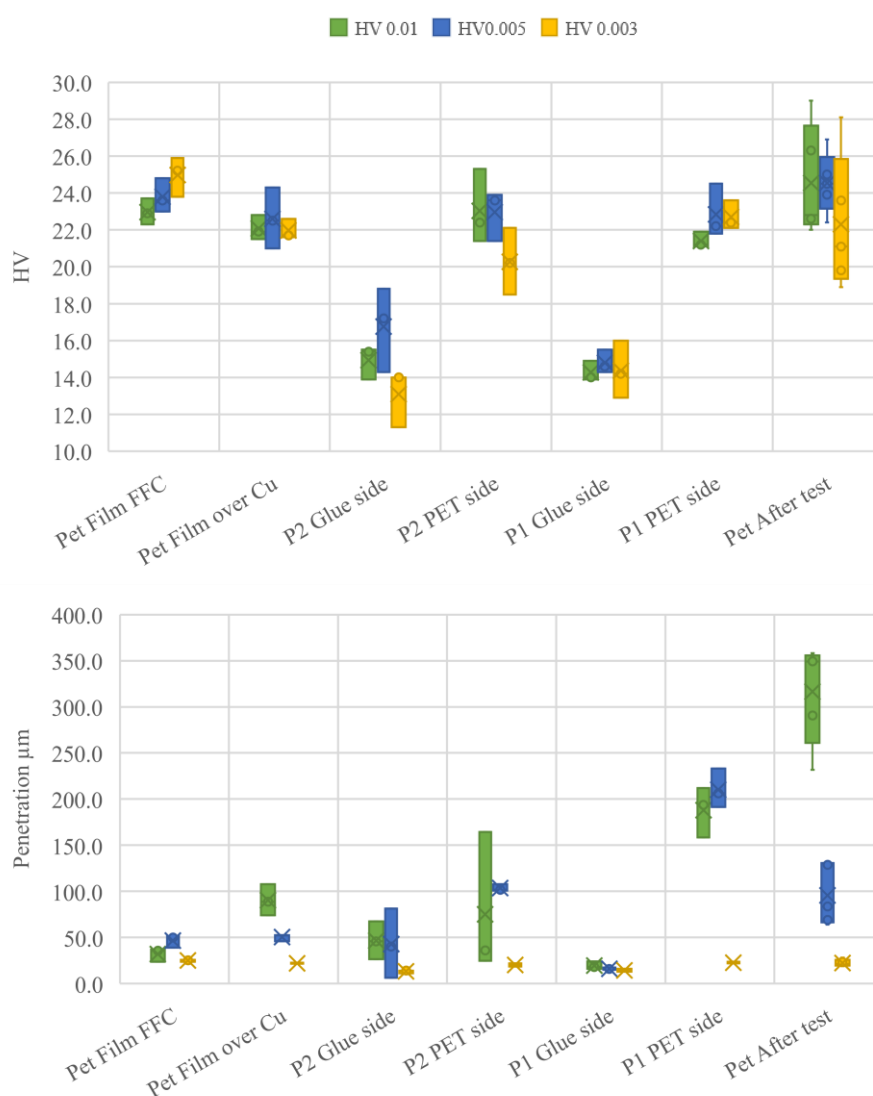


Fig. 3. 4 Gráficos de distribución de la dureza con respecto a cada muestra, con la respectiva penetración registrada en cada medición.

De acuerdo con los datos de dureza proporcionados por el proveedor del material se reporta la información en escala de dureza Shore A, con un valor de 97.1, esta es una escala para materiales blandos flexibles, como elastómeros y otros plásticos. El proveedor realiza las mediciones siguiendo los estándares JIS K 7215 y ASTM D2240.

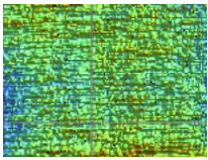
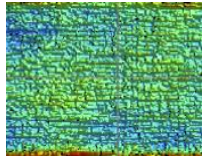
Según los datos reportados por el proveedor, para el PET, se deberían obtener valores cercanos a 300 HV, sin embargo, ya que los datos de dureza dependen siempre del método de prueba, no se considera una propiedad fundamental de los materiales. La razón principal de las diferencias de valores entre los instrumentos está relacionada tanto a la mecánica de cada uno, como a la recuperación elástica que ocurre cuando se retira la carga, además no existe una clara correlación entre las diferentes escalas de dureza, salvo casos muy específicos en los cuales se cumplan ciertas características de similitud de prueba [15, 36].

3.1.4 Análisis de circuitos de cobre mediante interferometría

La caracterización de la calidad del corte de los circuitos se llevó a cabo, iniciando con mediciones de rugosidad superficial, esto para tener una referencia del material que se someterá a pruebas de fatiga. Esta medición se toma sólo como referencia para ampliar la caracterización del material, ya que con el proceso de laminado de cable no hay manera de mejorar esta condición, salvo cambiando el proveedor del cobre o solicitando que se mejore esta condición en sus procesos de laminado del metal. En los procesos de adhesión, el parámetro de rugosidad es importante ya que afecta directamente al fenómeno de adherencia entre las películas de PET.

Las mediciones de la Tabla 3. 5 se realizaron utilizando un equipo marca Bruker modelo Contour GT de perfilometría óptica que opera mediante el principio de interferometría.

Tabla 3. 5 Mediciones de rugosidad en diferentes anchos de conductores.

Conductor	1.4 mm	0.8 mm
Imagen de perfilómetro		
Ra (µm)	0.326	0.253
Rt (µm)	3.157	2.669

Los parámetros Ra y Rt indican que la superficie de los conductores es uniforme y similar entre ambas muestras ya que la variación es menor a 0.5 µm en ambos parámetros.

3.1.5 Análisis de corte de circuitos mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM)

El corte lateral de los circuitos es una condición importante y posiblemente determinante para considerar, dado que los ciclos de fatiga se contabilizan hasta que las fallas en los circuitos se acumulan, aumentando la resistencia al paso de corriente a través de ellos. Se presume que estas fallas pueden iniciar en las zonas donde el corte de los circuitos presenta defectos.

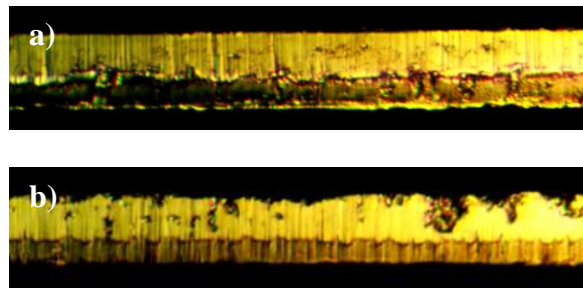


Fig. 3. 5 Imágenes de microscopio óptico con aumento de 100x, a) muestra de U1, b) muestra U2.

Se analizaron en microscopio óptico (Fig. 3. 5) y electrónico de barrido muestras del corte de diferentes sitios de manufactura de cable (U1 y U2), los cuales presentan resultados de vida distintos, dichos resultados se analizarán en secciones posteriores.

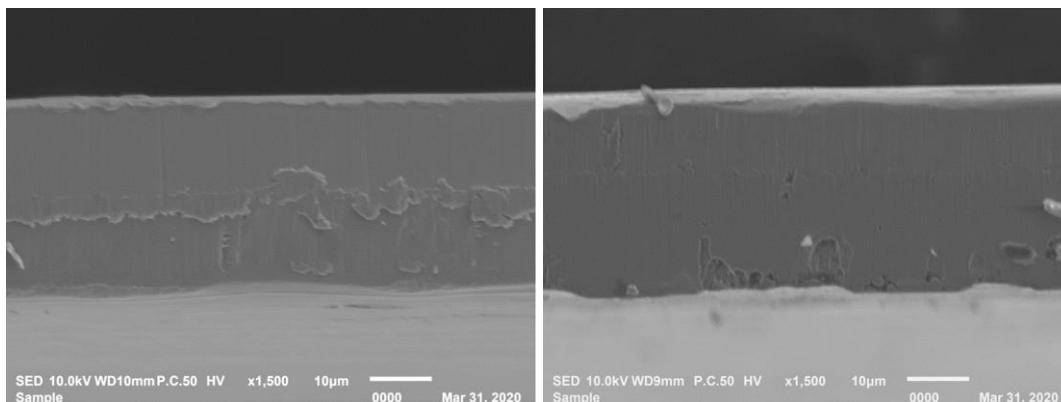


Fig. 3. 6 Imágenes SEM tomadas con un equipo JEOL JSM-IT100, vista transversal de U1 (izquierda), U2 (derecha).

En las imágenes SEM de la Fig. 3. 6 se observa que la muestra de U2 presenta mayor uniformidad en la totalidad de la zona transversal, ya que en U1 se observan rebabas en la zona de desprendimiento (mitad del conductor). Esta información se tomará como precedente para el análisis de los circuitos después de la prueba de fatiga.

3.2 Diseño de experimentos de parámetros de proceso

El diseño de experimentos se realizó partiendo de las condiciones de proceso que han arrojado mejores resultados de vida en pruebas iniciales de este proyecto, los resultados se muestran en secciones posteriores. En la Tabla 3. 6 se muestran los parámetros del proceso de partida y los seleccionados para realizar la validación de vida del producto.

Tabla 3. 6 Parámetros del proceso de laminación de partida y diseño de experimentos.

Test ID	T-179	T-214
Fecha de manufactura	Nov/12/2019	Feb/18/2020
Temp. RL No. 1 (°C)	185 ± 5	175 ± 5
Velocidad (m/min)	2.5 ± 0.1	2.5 ± 0.1
Presión de cierre 1 (MPa)	-0.325 ± 0.15	-0.325 ± 0.15
Presión de cierre 2 (MPa)	-0.300 ± 1.0	-0.300 ± 1.0
Voltaje de tensión (V)	12.5	12.5
Diseño de experimentos		
Condición (Estudio T-557)	Temperatura (°C)	Voltaje (V)
1		8
2	170 ± 5	7
3		6
4		8
5	175 ± 5	7
6		6
7		8
8	180 ± 5	7
9		6

Únicamente se propone variar el voltaje de tensión y la temperatura, ya que se ha determinado que la velocidad no tiene una influencia importante en la vida del material, sin embargo, sí en la calidad visual del producto. La variante de la presión se considera relevante, sin embargo, para reducir las variables de estudio esta se plantea como constante.

3.3 Pruebas de fatiga

3.3.1 Descripción del equipo y condiciones de prueba

El diseño de la prueba de fatiga ha sido realizado siguiendo los estándares establecidos por el IPC (*Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*, por sus siglas en inglés) para este tipo de materiales, en su estándar IPC-TM-650 [38].

Cabe destacar que los estándares IPC son guías generales que plantea esta asociación para la realización de pruebas a los materiales relacionados con productos electrónicos. En este caso particular, se toman como referencia los métodos 2.4.2.1 Ductilidad y fatiga por flexión en láminas, 2.4.2 Ductilidad de láminas de cobre y 2.4.3. Resistencia a la flexión en materiales de circuitos impresos; estos se toman en cuenta llevando a cabo ciertas adaptaciones para la aplicación específica [38, 39].

En la Fig. 3. 7, se muestra el esquema de las muestras durante la prueba de fatiga aplicada a los especímenes en cuestión. El radio de dobléz simula la posición del cable plano dentro del conector de bolsa de aire (aplicación final), el cual es el parámetro determinante en esta prueba. Por historial de pruebas se puede concluir que, a menor radio de dobléz, menores ciclos de vida puede soportar el material, ya que los esfuerzos de tensión cíclica, tensión de tracción y deformación plástica impresos en el sistema son mayores. El radio promedio de las pruebas para los SRCs tradicionales es 6.5 mm, por lo tanto, el diámetro o separación entre rieles se ajusta a 13 mm.

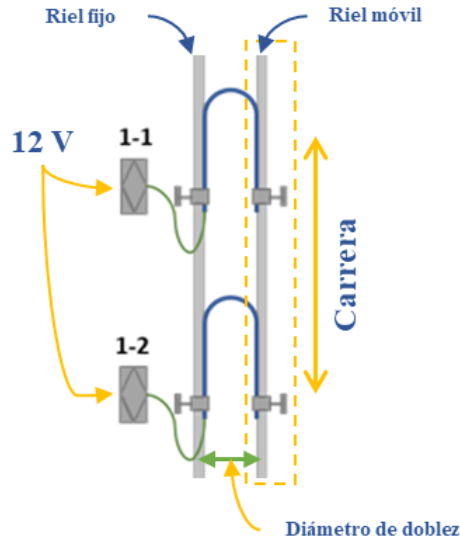


Fig. 3. 7 Esquema del montaje de las muestras en la prueba de fatiga.

La muestra eléctricamente aislada se sujeta con abrazaderas entre dos rieles metálicos de aluminio, uno fijo y el otro móvil; se conecta a una toma de corriente la cual suministra una corriente directa de 12V a toda la muestra y se monitorea la caída de voltaje que esta ocasiona (las directrices de preparación de las muestras de prueba se detallan en el apartado 3.3.2), se programa la desconexión de cada muestra una vez que cada una presente un aumento de resistencia total de 1Ω , con respecto a la resistencia inicial.

Durante la prueba, el riel móvil se desliza en la dirección indicada en la Fig. 3. 7, la amplitud de este deslizamiento se define en las condiciones de prueba como “carrera” o desplazamiento. El movimiento del fixture de prueba obedece al mecanismo de yugo escocés, el cual transforma un movimiento de rotación en un movimiento rectilíneo alternativo, como se muestra en el esquema de la Fig. 3. 8.

Para las pruebas de fatiga, comúnmente se toma en cuenta la amplitud del esfuerzo del ensayo σ_a , esta estará en función del material a probar como se detalla en las siguientes ecuaciones, considerando el punto de mayor esfuerzo por flexión con un doblé de 180° , como en una polea, y un punto de menor esfuerzo con un doblé de 0° con el cable completamente estirado [40, 41].

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \therefore \quad \sigma_a = \frac{1}{2} \left[\frac{E \cdot w}{2R} - 0 \right]$$

Donde E representa el módulo de elasticidad lineal del conductor o módulo de Young, w es el espesor del material en milímetros, y R es el radio de dobléz en milímetros. El módulo de Young para este material es 130 GPa, (información del proveedor), el espesor es de 0.035 mm, y si se considera una prueba con radio de dobléz de 6.5 mm de dobléz, se obtiene que la amplitud de estrés de esta prueba por ciclo es $S_a = 175 \text{ MPa}$.

Si se compara el nivel de estrés que cada ciclo de la prueba representa, con la resistencia del conductor de cobre (294 MPa según información del fabricante de este material), se encuentra que los esfuerzos de la prueba son menores que el esfuerzo a la rotura del material, precisamente esto es lo que caracteriza las fallas por fatiga, el que las fallas ocurran aun cuando los esfuerzos a los que se somete el material se encuentran por debajo del límite de resistencia del material [6, 42].

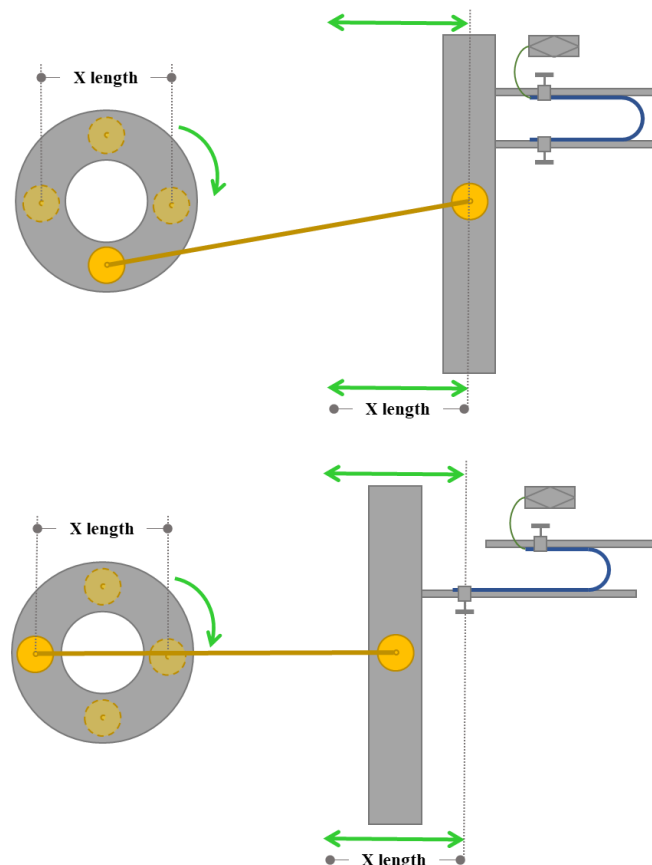


Fig. 3. 8 Esquema del movimiento rectilíneo alternativo.

Mediante un motor eléctrico se hace girar de manera continua la excéntrica, la cual obliga a que el vástago de transmisión dibuje la circunferencia en un extremo, halando el otro extremo

hacia adelante y atrás, este extremo se encuentra sujeto a una placa sobre la cual se ensambla el riel móvil de la montura de las muestras, este riel móvil se encuentra ensamblado de manera perpendicular sobre la barra de desplazamiento, como se indica en el diagrama de la Fig. 3. 8. En el esquema de la Fig. 3. 8, el parámetro indicado como “X length” es el que se denomina “carrera”, es aquella distancia que recorre el riel móvil antes de cambiar el movimiento en dirección opuesta.

El parámetro de carrera se establece también del diseño de la aplicación final, entre más pequeño sea el radio del dispositivo SRC en el cual se ensamblará el cable plano, la carrera será menor, ya que el diámetro de rotación será menor.

Una vez que las muestras se han ensamblado en el fixture de prueba (en una prueba se pueden correr hasta un máximo de 20 muestras) este es introducido a una cámara climática para correr las pruebas en condiciones de temperatura y humedad controladas. Las condiciones habituales son 85°C y una humedad relativa despreciable, menor al 10%⁴, para tener resultados en lapsos de tiempo razonablemente cortos. Se hace énfasis en lapsos razonables, ya que las condiciones de temperatura elevadas con respecto a la temperatura ambiental aumentan las probabilidades de falla, por lo que los tiempos de prueba pueden reducirse en un factor de entre 9 y 10, es decir, se logra reducir un tiempo de prueba promedio de 38 o 40 días a 3 o 4 días.

3.3.2 Preparación de las muestras de prueba

Para realizar esta prueba de fatiga, las muestras deben llevar cierta preparación con la finalidad de construir un circuito único de monitoreo por el cual pasará la corriente suministrada para probar la continuidad del material, es decir, se construye un circuito conectando en serie los diferentes circuitos de un mismo cable. En el diagrama de la Fig. 3. 9 se muestra la secuencia de la preparación de muestras hasta el ensamble en el fixture de prueba.

⁴ Durante la prueba no existe suministro de humedad a la cámara climática, por lo que la humedad relativa puede llegar a disminuir incluso por debajo del 10%.

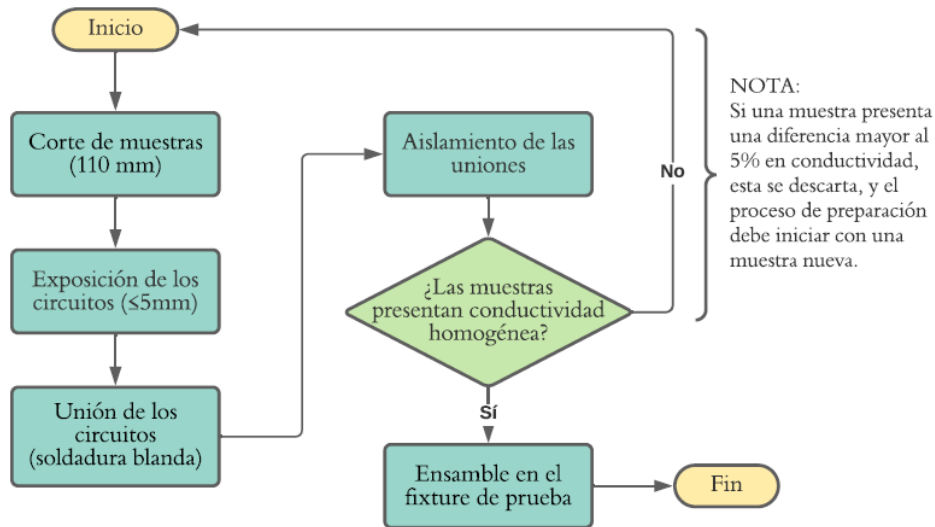


Fig. 3. 9 Diagrama de flujo de proceso de preparación de muestras.

Esta preparación inicia con el corte de las muestras a una longitud de 110 mm, de esta manera se cubre la mayor carrera posible para la cual está diseñado el fixture de prueba (100 mm), aunque el parámetro habitual es 80 mm, dadas las dimensiones de los dispositivos SRC tradicionales.

Posterior al corte de las muestras, se lleva a cabo el desbaste de estas con la finalidad de remover el PET de los extremos de los circuitos, dejarlos expuestos y poder soldarlos para formar un único circuito de monitoreo, el desbaste se lleva a cabo con una herramienta rotativa Dremel, con un cepillo de grano grueso equivalente a una lija P180.

Un cable plano de múltiples circuitos es evaluado como un único circuito, ya que se toma como referencia lo estipulado por Weibull en 1951: “una cadena que consta de varios eslabones, fallará al momento que falle cualquiera de sus eslabones”, es decir, la probabilidad de falla de la cadena entera se conoce al asumir que la cadena, como un todo, ha fallado cuando falla cualquiera de sus partes [43].

Por lo anterior, el método de construcción del circuito único consta de un método de soldado aplicando soldadura blanda (de estaño) para realizar puentes entre los circuitos intermedios y soldar a los extremos dos cables que fungen como la entrada y salida de corriente a la muestra, como se indica en la Fig. 3. 10. La soldadura se aplica con caudín a una temperatura entre 285 y 290 °C.

Una vez formado el circuito de monitoreo, se mide la resistencia de la muestra y se registra este valor para verificar que entre todas las muestras no exista una variación mayor al 5% del valor de resistencia. Esto es importante, ya que se toma como pauta para comprobar que las muestras se encuentren físicamente en condiciones similares de conducción de corriente (que tienen similar o equivalente daño térmico en la zona de soldado, daño en los circuitos debido a su manipulación o al desbaste, etc.). Las flechas verdes y azules sobre los circuitos en la Fig. 3. 10, representan la dirección de la corriente aplicada a la muestra, como se observa, se sueldan en serie todos circuitos de la muestra, por lo que la soldadura forma parte del circuito de resistencia, por ello es imperativo que este proceso se realice a las condiciones más estándar posible.

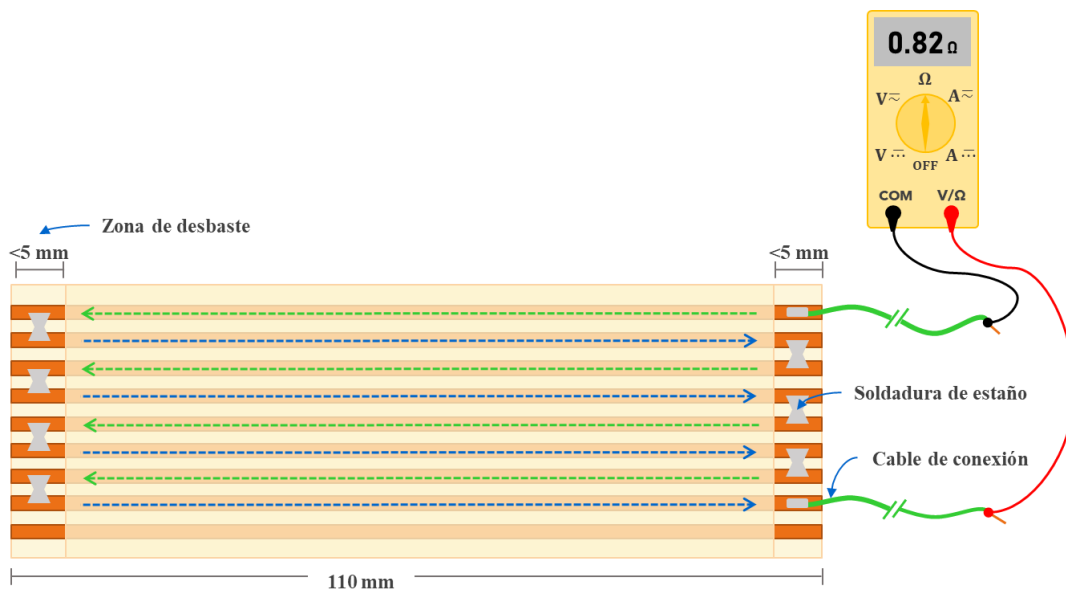


Fig. 3. 10 Diagrama de muestra de prueba y toma de resistencia por muestra.

Posterior a la construcción del circuito de monitoreo, se procede al aislamiento con cinta adhesiva resistente a la temperatura de los extremos expuestos. Esta cinta es utilizada en aislamiento de tarjetas electrónicas y uniones de cables, resistente a temperaturas de hasta 260°C.

Cuando se han preparado todas las muestras de prueba, se procede a montarlas en el fixture de prueba, siguiendo el ensamble descrito en la Fig. 3. 7; una vez que se han ensamblado todas las muestras, se introduce el fixture a una cámara climática para el proceso de precalentamiento o ambientación de las muestras antes del inicio de la prueba. Este tiempo

de ambientación es importante ya que, se sabe que la conductividad de los metales de alta pureza disminuye con respecto al aumento de temperatura [6].

Por lo anterior, es importante que se considere esta variación en la programación del voltaje de desconexión de cada muestra. Se permite que la muestra tome las condiciones de temperatura dentro de la cámara climática por un lapso de una hora. Posteriormente se procede a la programación individual del valor de desconexión, se toma como referencia la caída de voltaje inicial después del tiempo de precalentamiento de cada muestra y se resta un valor de 0.15 V, el cual se justifica si se considera el arreglo del voltímetro de cada muestra como un circuito divisor de voltaje, que cuenta con dos resistencias, una fija de 100 Ω y una variable, que es el valor de resistencia de la muestra de prueba, la cual (dependiendo de la configuración de los circuitos) tendrá una resistencia inicial entre 0.5 y 0.9 Ω , la resistencia final de la muestra deberá aumentar 1 Ω , para considerar que la muestra ha fallado. La medición de voltaje se toma en la resistencia fija R_2 , como se muestra en la Fig. 3. 11.

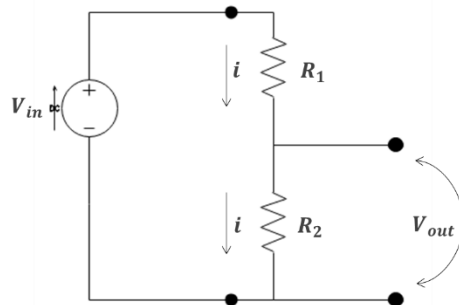


Fig. 3. 11 Arreglo divisor de voltaje para el monitoreo de cada muestra.

La ecuación que se muestra a continuación es la que describe un circuito divisor de voltaje, si se sustituyen los valores de voltaje de entrada y resistencias descritas anteriormente, se obtienen diferencias de valores de voltaje de salida inicial y final entre 0.11 y 0.15 V, por convención y por algún otro arreglo menor no considerado donde exista un aumento de resistencia se considera el valor de 0.15 V para desconexión [44].

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

El monitoreo del voltaje aplicado a cada muestra se logra debido a que se conecta el fixture de prueba a un panel de control, el cual cuenta con 20 voltímetros (uno para cada muestra),

en ellos se programa el voltaje de desconexión. En este panel de control existe un PLC el cual va registrando los ciclos que acumula cada muestra, siempre y cuando esta se encuentra registrando un voltaje superior al voltaje de desconexión, una vez que el valor de voltaje cae por debajo del valor programado, el contador deja de registrar el avance en ciclos de cada muestra. Una vez que todas las muestras han registrado su voltaje de desconexión, el fixture de prueba cesa el movimiento en automático y se considera que la prueba ha terminado.

Es importante resaltar que, en realidad la prueba termina para cada muestra una vez que esta alcanza su voltaje de desconexión, sin embargo, las muestras son retiradas del fixture de prueba hasta que todas ellas han alcanzado este valor, ya que no se considera factible ni en tiempo, ni en estabilidad de condiciones, detener el movimiento mecánico del fixture e interrumpir la estabilidad térmica de la cámara climática para remover las muestras dañadas para posteriormente reanudar la fatiga y el calentamiento. Lo anterior conlleva varios inconvenientes en el análisis de las muestras y la identificación de los mecanismos de falla, principalmente que, una vez que el material ha fallado, este sigue sufriendo fatiga, por lo que, al analizar estas muestras, se encuentran daños mucho más severos que los de una muestra que es retirada del proceso de fatiga recién esta presenta la falla.

3.4 Análisis de fallas

3.4.1 Preparación de las muestras de análisis

En la Tabla 3. 7, se presenta una matriz con información sobre las muestras sometidas a análisis para revelación de microestructura. Estas muestras han sido sometidas a pruebas de fatiga cumpliendo con los métodos de prueba establecidos por el IPC y descritos en el apartado 0.

Tabla 3. 7 Matriz de muestras a analizar.

Study	Sample	Laminate location	Cycles	Analysis location
<i>T-199</i>	4-2	U2	581,907	R&D Lab FMX
<i>T-214</i>	2-5	U1	442,562	R&D Lab FMX
<i>T-179</i>	2-2	U1	590,967	R&D Lab FMX
<i>T-199</i>	3-1	U2	655,994	UABC Lab
<i>T-214</i>	2-3	U1	420,081	UABC Lab
<i>T-179</i>	1-5	U1	591,572	UABC Lab

Se seleccionaron estas muestras ya que son las que presentan los niveles medios y más altos en las pruebas de fatiga, es decir, que su tiempo de vida antes de la desconexión fue mayor.

Se llevaron a cabo dos métodos de análisis para revelar el tamaño de grano y la propagación de las fracturas, una fue mediante encapsulado metalográfico en frío enfocado en la sección transversal de la muestra, la cual se esquematiza en la Fig. 3. 12. El segundo método de análisis consistió en desprender el PET de los circuitos y analizar la superficie de estos con la finalidad de observar la morfología de los granos, la nucleación y propagación de las fracturas a través de los circuitos.

Las muestras fueron preparadas para su análisis bajo microscopio siguiendo el estándar ASTM E3 para la preparación metalográfica y ASTM E407 para el ataque químico, de este último en concreto se utilizaron las soluciones No. 30 y No. 34 correspondientes para aleaciones de cobre de alta pureza, (solución de $\text{NH}_4+\text{H}_2\text{O}+\text{H}_2\text{O}_2$ y $\text{FeCl}_3+\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}$, respectivamente). La revelación microestructural de cada muestra se realizó en dos sesiones de exposición de 40 segundos con la primera solución y una sesión de 20 segundos con la última [45].

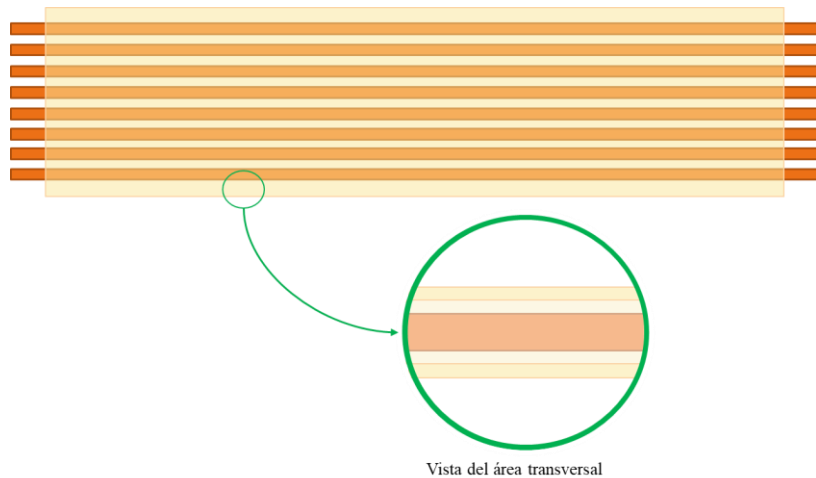


Fig. 3. 12 Esquema de la sección sometida a encapsulado metalográfico.

3.4.2 Análisis mediante microscopía óptica

a) *Análisis de la sección transversal*

La imagen de la Fig. 3. 13 se tomó después de la preparación de la muestra y el ataque químico para revelación de microestructura previamente descrito.

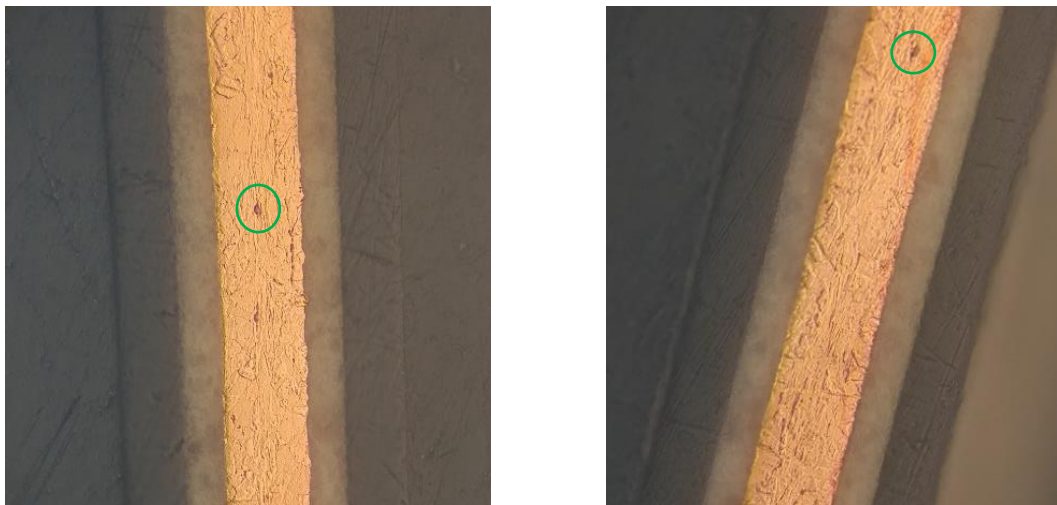


Fig. 3. 13 Microestructura de sección transversal, magnificación 500X. A la izquierda el circuito 5 (central), a la derecha el circuito ocho (orilla).

La muestra que se observa es la indicada con la nomenclatura T-214 2-3, los circuitos analizados son el número cinco y el ocho (todas las muestras analizadas constan de 9 circuitos). Ambos son obtenidos del mismo material, sin embargo, el corte es realizado con diferente herramienta, ya que el circuito cinco es de un ancho de 0.8 mm y el circuito ocho de 1.4 mm.

En la Fig. 3. 13, se observa la microestructura de ambos circuitos, en ambos se encuentra el mismo tipo de microestructura de granos alargados en la dirección de laminación en un gran porcentaje de la superficie analizada. También se observan algunas marcas sospechosas de corrosión (círculos verdes), aunque es complicado que en esa zona se den esos procesos ya que es una zona apartada de la superficie, sin embargo, debido a la fatiga a la que se ha sometido el material, se puede considerar como posibilidad algún proceso de corrosión por fatiga.

En la Fig. 3. 14 se muestra la microestructura bajo el microscopio óptico metalográfico del cobre virgen, es decir que no ha sido laminado como cable plano, por lo tanto, tampoco ha sido sometido a pruebas de fatiga. Esta microestructura se muestra similar a la de la Fig. 3. 13, aunque los granos se siguen notando alargados en la dirección de laminación, se dibujan con cierta expansión hacia los lados, este tipo de estructura es común en metales sometidos a procesos de laminación ya que las fuerzas de compresión ocasionan que los granos se compriman hacia el centro de la lámina de cobre, otorgando cierta anisotropía al material, como el hecho de que las fracturas ocurran en cierta dirección o que la resistencia a las fuerzas de tensión varíen en diferentes direcciones.



Fig. 3. 14 Microestructura del cobre virgen, vista de la parte superior, 500X.

A continuación, en la Fig. 3. 15 se observan tres fracturas que atraviesan la sección transversal del conductor, en este caso la fractura que se observa en el extremo izquierdo de la imagen de la izquierda es una fractura naciente con características de fractura intergranular,

sin embargo, la fractura de la derecha de la misma imagen se dibuja como transgranular, ya que no parece crecer por los límites de grano. La fractura de la imagen de la derecha crece por de los límites de grano, por lo que se puede clasificar en primera instancia como intergranular.

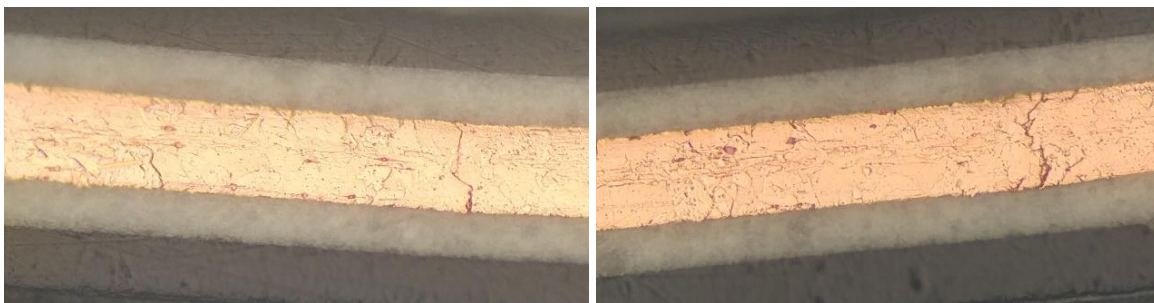


Fig. 3. 15 Fracturas en la zona transversal, muestra 1-5 T-179, circuito 5, 500X.

b) Análisis de la superficie

La imagen de la Fig. 3. 16, corresponde a la muestra 4-2 T-199, después de que se ha desprendido de la película PET, utilizando una solución de Cloroformo. Se realizó un ligero pulido para eliminar los defectos superficiales que pudieran afectar la microestructura, la cual se reveló utilizando el mismo método descrito en el apartado anterior. Se observa, en la figura de la derecha, que la fractura corre por los límites de grano, por lo que se podría caracterizar como intergranular, se observa como a medida que avanza la fractura, se van generando microfracturas a lo largo del recorrido a través de los límites de grano.

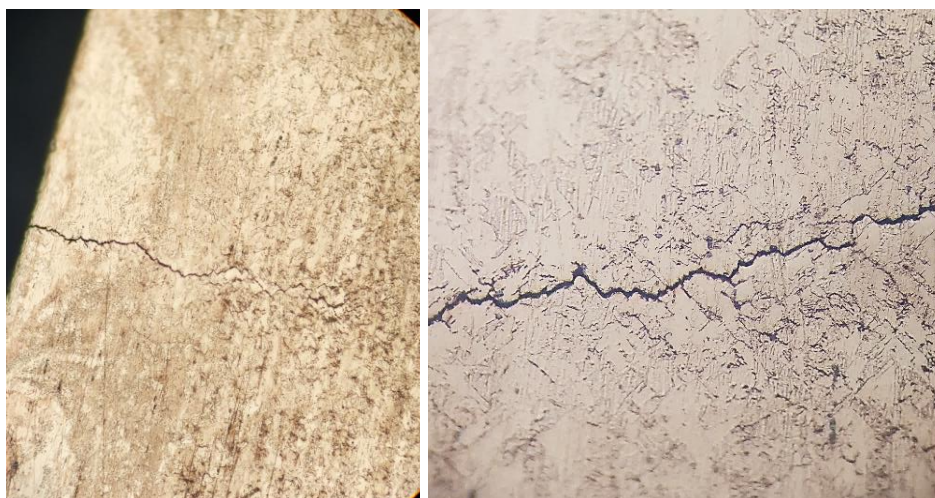


Fig. 3. 16 Muestra de cobre posterior a la remoción de la película PET y ataque químico (izquierda 100X, derecha 500X).

Para una mayor resolución de las imágenes de microscopía óptica adquiridas, se acopla a la cámara del microscopio metalográfico Leica DM ILM, una PC mediante un adaptador digital de señal video.

La muestra observada en la Fig. 3. 17 ha sido sometida a pruebas de fatiga alcanzando un valor de ciclos de vida de 581,907 (refiérase a la Tabla 3. 7). Las fracturas se observan en ciertas zonas con crecimiento transgranular y en otras con crecimiento intergranular. Las imágenes de la Fig. 3. 17 muestran una zona con menor indicios de daño por fatiga que en la Fig. 3. 18, en este caso se pueden ver los límites de grano más delimitados. Se encuentra que las fracturas se sitúan exclusivamente cargadas hacia un lado del circuito, dicho comportamiento deberá relacionarse a la orientación de las muestras durante la prueba de fatiga, es decir en la posición del fixture de prueba (descrito previamente en la sección 3.3.1).

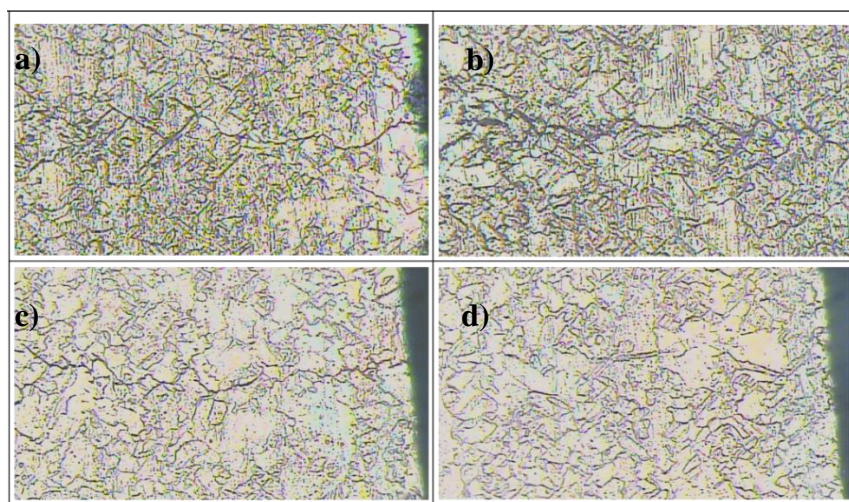


Fig. 3. 17 Sección externa de circuito (orilla), muestra fatigada 581k ciclos.

En la muestra observada en la Fig. 3. 18 predomina el comportamiento transgranular de las fracturas. Estas imágenes muestran tonalidades ligeramente distintas en los límites de grano en comparación con la Fig. 3. 17, se atribuirá esta diferencia a ligeras variaciones en el procedimiento del ataque químico.

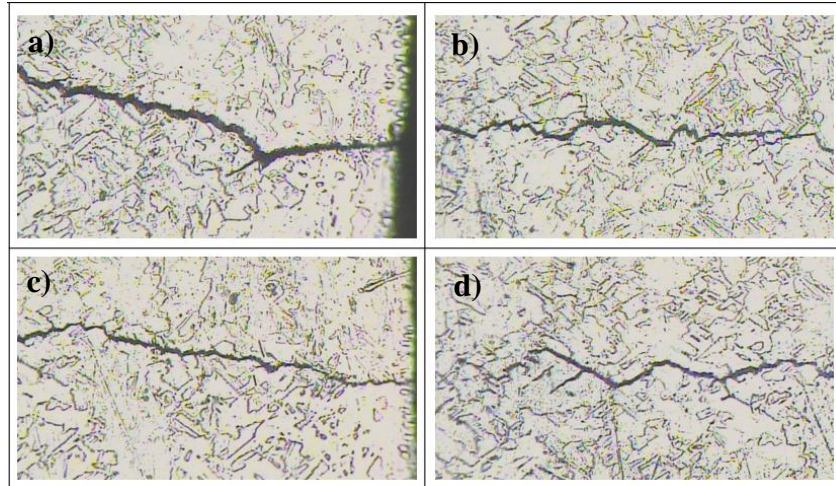


Fig. 3. 18 Sección interna de circuito, muestra fatigada 581k ciclos.

La muestra de la Fig. 3. 19 no ha sido procesada como cable laminado, solamente ha pasado por el proceso de corte para disminuir la dimensión de la sección transversal del conductor. Se coloca la Fig. 3. 19d como referencia del cambio en la microestructura antes y después de la fatiga del material. En la Fig. 3. 19a, 3.19b y 3.19c se observa que la microestructura es la característica de los metales procesados por laminación. Sin embargo, en la imagen 3.19d se observa que esta microestructura se ha modificado y ahora los granos se encuentran con una morfología aleatoria y sin seguir la orientación de laminación.

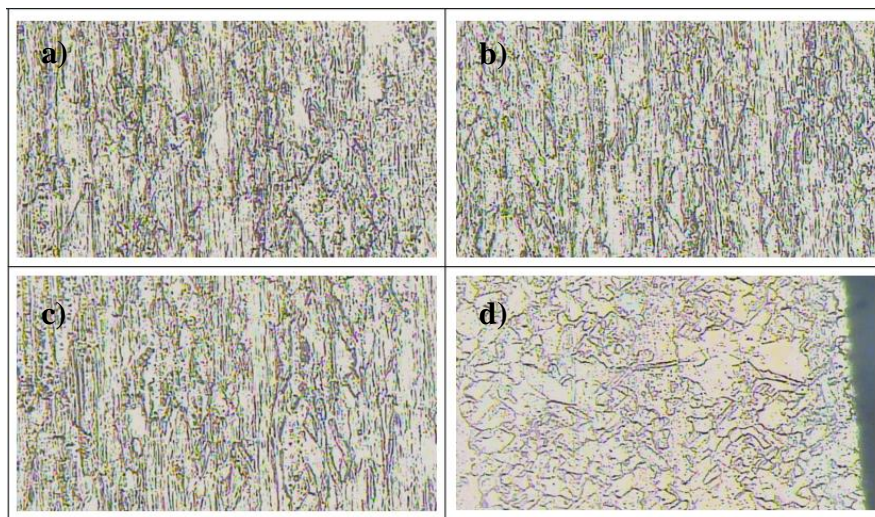


Fig. 3. 19 Comparación de la microestructura posterior y previo a la prueba de fatiga; a), b), c) cobre virgen, d) cobre después de prueba de fatiga.

3.4.3 Análisis mediante microscopía electrónica (SEM)

El cobre de alta pureza es un material muy suave, por lo que requiere esfuerzos muy bajos para presentar dislocación y sufrir deformación plástica sin llegar a la rotura; también es fácilmente deformado en frío, este es el proceso del cual proviene el material de estudio, por lo tanto, se observa una excesiva deformación en los granos del material (Fig. 3. 20), ya que este se somete a fuerzas de compresión, con la finalidad de reducir su sección transversal [5].

La designación “muestra virgen” se refiere a cobre laminado C11000 (Electrolytic tough pitch copper, ETP) el cual es de alta pureza y posee elevadas propiedades conductivas, este análisis es realizado antes del proceso de laminación del circuito con la película aislante de PET. La imagen SEM de la Fig. 3. 20, muestra que los granos se encuentran muy deformados a lo largo de la dirección de laminación, por lo que no resulta viable tomar mediciones en esta área, ya que los límites de grano no están definidos con claridad. El ataque químico de todas las muestras fue realizado con las soluciones No. 30 y No. 34 de la ASTM E407, previamente detallado en secciones anteriores.

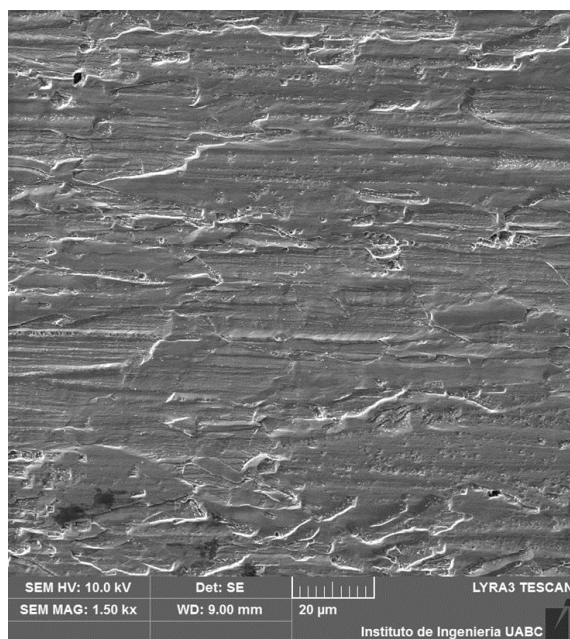


Fig. 3. 20 Imagen SEM de cobre antes del proceso de producción del cable y pruebas de fatiga.

En la Fig. 3. 21 se muestra un conjunto de imágenes SEM tomadas a las muestras después de la prueba de fatiga y de la preparación metalográfica, previamente descritos. En la Tabla 3.8 se muestran las mediciones de los tamaños de grano encontrados en estas imágenes.

En la Fig. 3. 21b y 3.21c, se ha seleccionado una zona de interés a analizar; en la figura 3.21b se observa un pequeño defecto que, después del ataque químico, se revela con mayor claridad en la Figura 3.21c, este defecto puede ser caracterizado como un defecto de dislocación, se puede comparar con el mostrado en la Fig. 3. 22, el cual también es una muestra de cobre puro [46]. Una de las causas de estos defectos es la deformación plástica que sufre el material, estas dislocaciones pueden acumularse en algún obstáculo del policristal, como alguna inclusión, o los límites de grano y formar bandas de deslizamiento, agrietar partículas, o disminuir la cohesión entre los granos, ocasionando que las fracturas se propaguen con mayor facilidad [19, 20, 37].

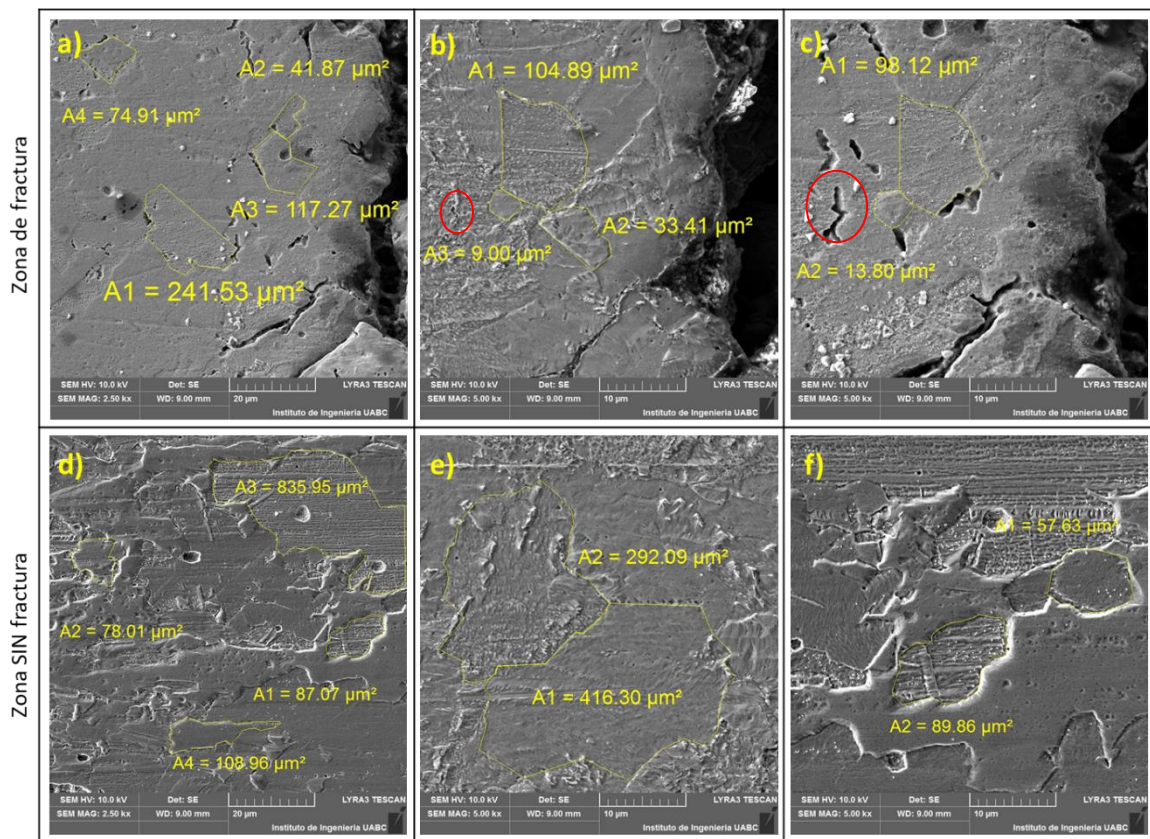


Fig. 3. 21 Imágenes SEM tomadas a una muestra de conductor de cobre ETP con fracturas por las pruebas de fatiga; a), b) y c) son zonas cercanas a una fractura principal, a) y c) son tomas después del ataque químico para revelar la microestructura, mientras que b) es una muestra antes del ataque. Las tomas d), e) y f) fueron obtenidas de la misma muestra en áreas alejadas de la fractura principal.

Tabla 3. 8 Tamaño de grano en muestras después de prueba de fatiga.

Punto	Zona con fractura (μm^2)	Zona sin fractura (μm^2)
1	74.91	292.09
2	41.87	416.3
3	117.27	835.95
4	241.53	78.01
5	104.89	87.07
6	33.41	108.96
7	9.00	57.63
8	98.12	89.86
9	13.8	-
<i>Promedio</i>	<i>81.64</i>	<i>245.73</i>
<i>Std. Dev</i>	<i>72.01</i>	<i>270.26</i>

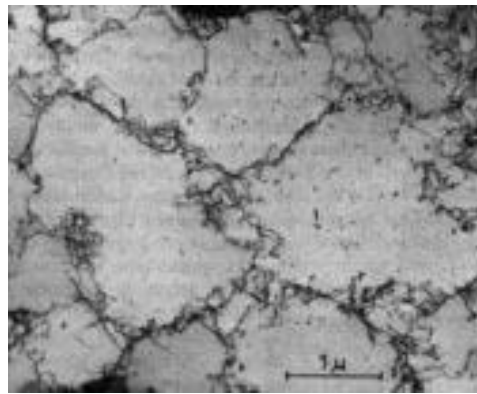


Fig. 3. 22 Imagen TEM dislocaciones en cobre puro después de deformación plástica [46].

Aunque la desviación estándar es elevada en ambos grupos de mediciones, se observa que, en promedio, los granos disminuyen su tamaño al comparar las zonas con (Fig. 3. 21a, b, c) y sin fractura (Fig. 3. 21 d, e, f). En la prueba experimental, toda la pieza es sometida a fatiga térmica de 85°C y mecánica por acción simultánea de tensión cíclica, tensión de tracción y deformación plástica (por la naturaleza de la prueba descrita en el apartado 0), además, la zona donde se analizaron las fracturas es la zona donde se tiene mayor fatiga mecánica, con un radio de dobléz de 180°.

La energía de deformación proporcionada al material por estos esfuerzos y el efecto de la temperatura ocasiona que se produzca una recristalización de los granos, dejando atrás la estructura deformada por el proceso de laminación en frío, como se observa en todas las imágenes de la Fig. 3. 20 en comparación con la Fig. 3. 21 [16].

3.4.4 Análisis de espesor de adhesivo

Como parte de la validación de la Hipótesis No. 1 de este proyecto, que plantea que el espesor del adhesivo de la película PET del cable plano funge como protección al cobre de los esfuerzos de fatiga, se precedió a medir el espesor del adhesivo de las muestras de cable plano en el área transversal de las muestras, utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-IT100. Para lograr estas imágenes, se hizo uso de las técnicas de encapsulado metalográfico en frío. En la Fig. 3. 23 se muestra como referencia, una de las imágenes SEM de las mediciones de espesor de las películas.

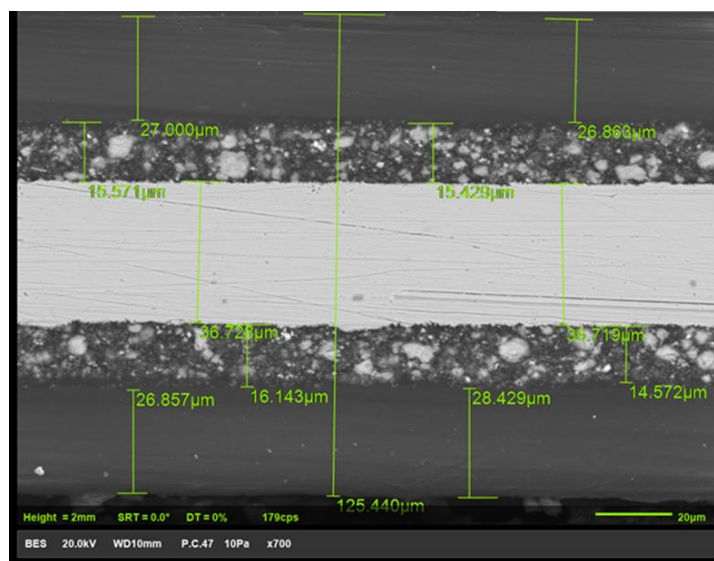


Fig. 3. 23 Imagen SEM de mediciones de sección transversal de muestra de FFC tomada con equipo SEM JEOL JSM-IT100.

En la Tabla 3. 9 se muestra una compilación de todos los datos dimensionales recabados de 20 muestras, tanto antes de la prueba de fatiga como después de esta, para verificar que existe una diferencia en el espesor del adhesivo al aplicar esfuerzos de fatiga al material.

Al graficar el espesor del adhesivo en relación con los ciclos de vida que alcanzaron las muestras (Fig. 3. 24), se puede notar que, al comparar las muestras antes y después de la prueba de fatiga, existe una diferencia de aproximadamente 2 μm. Considerando que el espesor máximo del adhesivo en el diseño de este material es de 20 μm por lado, la diferencia entre el espesor antes y después de la prueba representa más del 10% de la dimensión total

del adhesivo, por lo tanto, se puede considerar como una variación significativa de esta propiedad del material.

Tabla 3. 9 Datos de dimensionales de espesor en películas de FFC de estudio T-457.

IDENTIFICACIÓN		PREVIO A PRUEBA DE FATIGA (μm)			POSTERIOR A PRUEBA DE FATIGA (μm)	
Rollo	Muestra	Ciclos	Adhesivo	Total	Adhesivo	Total
1	1-1	422,521	15.916	122.429	15.429	125.440
1	2-1	458,925	16.258	121.571	15.645	120.731
1	3-1	430,165	15.947	122.857	15.715	122.289
1	4-1	445,491	16.287	121.714	15.360	124.151
4	1-2	396,178	16.145	120.286	15.480	124.228
4	2-2	288,691	15.931	122.720	15.574	123.433
4	3-2	485,697	15.930	122.000	16.040	122.000
4	4-2	502,532	16.288	120.143	15.403	123.581
5	1-3	470,608	15.894	120.007	12.680	128.429
5	2-3	434,944	16.073	120.714	14.395	125.875
5	3-3	590,409	16.251	120.860	13.287	125.008
5	4-3	458,690	16.252	122.005	12.750	126.000
8	1-4	401,178	16.824	122.857	15.109	122.286
8	2-4	527,723	16.715	120.435	15.574	123.433
8	3-4	565,786	16.500	121.005	15.108	121.723
8	4-4	445,283	16.308	121.077	15.752	121.143
U3	1-5	369,313	16.893	120.004	13.786	123.002
U3	2-5	419,564	16.215	120.714	15.036	122.714
U3	3-5	470,132	16.500	120.571	14.002	124.143
U3	4-5	566,559	16.215	120.720	15.109	124.150
S. Dev:			0.296	0.963	0.617	1.279

Por otro lado, el espesor total del cable completo se comporta de manera opuesta, ya que aquí se registra un aumento posterior a la prueba de fatiga, este aumento se encuentra en el cobre, presentando un incremento promedio en todas las piezas de 2 μm con respecto a la dimensión previa a la prueba.

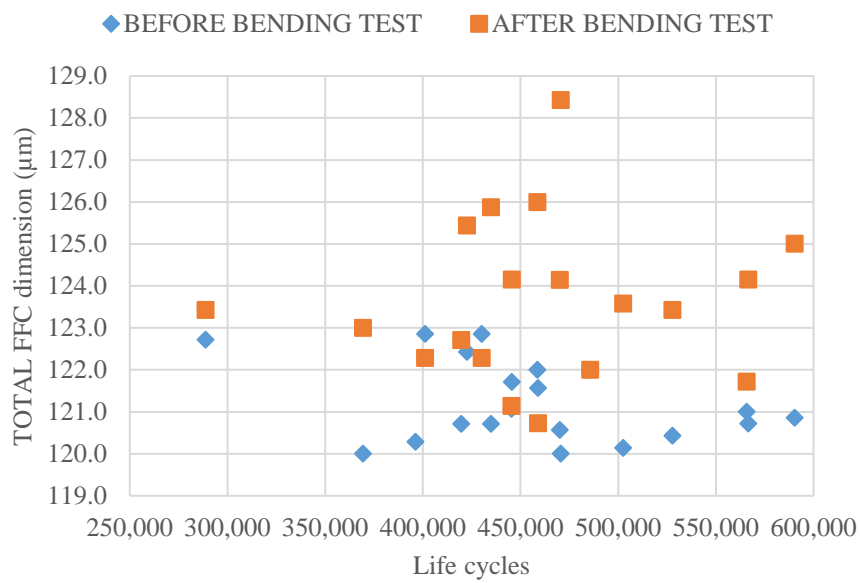
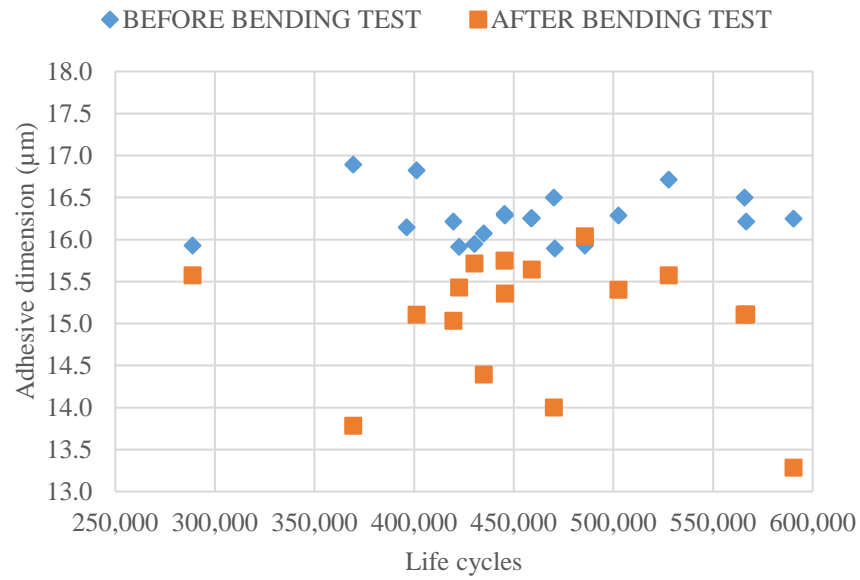


Fig. 3. 24 Gráficos de ciclos de vida respecto a espesor del adhesivo a la izquierda, espesor total del FFC a la derecha.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS: DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

4.1 Aplicación de la distribución de Weibull

Como se describió anteriormente, la distribución de Weibull es ampliamente utilizada para el análisis de supervivencia de materiales o productos. En el caso particular de este tema de estudio, los datos que se someten al análisis estadístico son los ciclos que alcanza cada muestra antes de su desconexión, estos conformarán los grupos de estudio, clasificados según las condiciones de fabricación del cable o el sitio de manufactura.

Los primeros resultados se presentan en la Tabla 4. 1, donde se comparan diferentes locaciones de manufactura de cable plano a condiciones estándar de proceso, con la finalidad de sentar un precedente del estado actual de la manufactura de este material.

Tabla 4. 1 Resultados de primeras pruebas de fatiga comparando diferentes locaciones de manufactura de cable plano.

Test No.	T-199		T-179		T-214		
Manuf. Location	U2	U3	U1	U1-1	U1-4	U1-5	U1-8
1-1	659,480	486,771	631,166	106,326	274,364	329,709	268,207
1-2	690,691	458,896	558,582	149,735	397,354	340,465	286,388
1-3	623,380	399,252	505,548	206,349	420,081	377,266	322,618
1-4	561,830	306,292	591,572	239,694	442,562	395,272	342,581
1-5	619,086	476,514	631,118	359,614	465,593	430,441	376,733
2-1	655,994	485,694	590,967	-	-	-	-
2-2	711,737	436,633	482,221	-	-	-	-
2-3	632,857	547,017	660,330	-	-	-	-
2-4	581,907	502,177	435,049	-	-	-	-
2-5	677,944	-	499,251	-	-	-	-
3-1	-	-	570,304	-	-	-	-
3-2	-	-	675,241	-	-	-	-
3-3	-	-	653,940	-	-	-	-
3-4	-	-	537,753	-	-	-	-
3-5	-	-	431,653	-	-	-	-
4-1	-	-	563,222	-	-	-	-
4-2	-	-	610,269	-	-	-	-
4-3	-	-	534,601	-	-	-	-
4-4	-	-	538,143	-	-	-	-
4-5	-	-	-	-	-	-	-

Las condiciones estándar del proceso de manufactura del material de las pruebas de la Tabla 4. 1, son las que se presentan en la Tabla 4. 2, las cuatro columnas de la derecha de la Tabla 4. 1, pertenecen a la locación U1, sin embargo, se les agrega una identificación adicional que indica la posición de cada cable en el proceso de laminación de este. En la Fig. 4. 1 se esquematiza de manera general la referencia a estas posiciones.

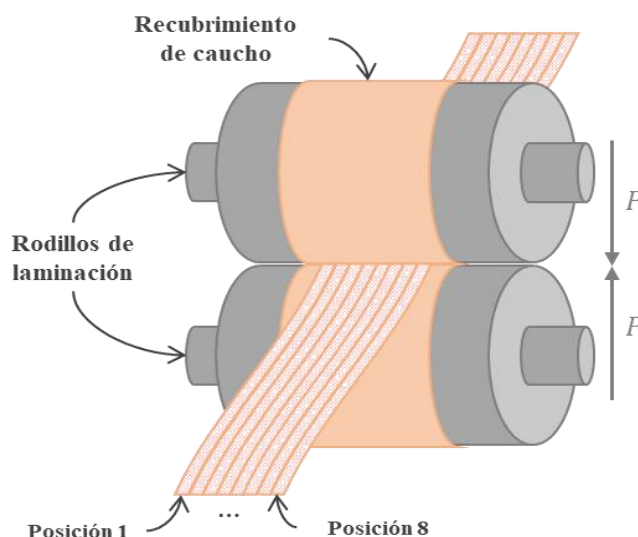


Fig. 4. 1 Posición de los cables planos durante el proceso de laminación.

Durante el proceso de laminación normalmente se producen ocho cables planos simultáneamente, como se muestra en la Fig. 4. 1. Las posiciones se identifican numerando del 1 al 8, este dato es importante para la evaluación de vida del material, ya que a medida que los rodillos de laminación se van desgastando, la presión que se ejerce para la compresión del adhesivo con los circuitos, comienza a presentar variación en la estabilidad de la superficie. En este esquema se presenta únicamente un par de rodillos de laminación recubiertos con caucho, sin embargo, el proceso consta de dos pares de estos rodillos por los cuales pasa el cable plano para concluir el curado del adhesivo de las películas PET y asegurar la correcta posición de los conductores. Para las pruebas de validación, generalmente, se toman las posiciones del centro del rodillo (4 y 5) y de las orillas (1 y 8). Las temperaturas indicadas en los parámetros de manufactura, tanto de la Tabla 3. 6 (diseño de experimentos) como de la Tabla 4. 2, son correspondientes al primer par de rodillos del proceso.

Tabla 4. 2 Condiciones de manufactura de partida.

Test ID	T-179	T-214
Fecha de manufactura	Nov/12/2019	Feb/18/2020
Temp. RL No. 1 (°C)	185 ± 5	175 ± 5
Velocidad (m/min)	2.5 ± 0.1	2.5 ± 0.1
Presión de cierre 1 (MPa)	-0.325 ± 0.15	-0.325 ± 0.15
Presión de cierre 2 (MPa)	-0.300 ± 1.0	-0.300 ± 1.0
Voltaje de tensión (V)	12.5	12.5

Los resultados de las pruebas de fatiga del material manufacturado con las condiciones del diseño de experimentos presentado en la Tabla 3. 6 de la sección 3.2, se presentan en la Tabla 4. 3.

Tabla 4. 3 Resultados de ciclos de fatiga de estudio T-557 con material manufacturado con parámetros de diseño de experimentos definido en apartado 3.2.

Muestra	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
R-1	389,963	540,952	647,853	380,506	445,610	439,487	366,900	370,611	344,374
R-2	582,509	666,196	648,275	411,643	558,629	607,416	476,215	382,385	298,840
R-3	351,824	292,641	534,340	493,365	410,985	522,050	487,666	336,301	380,839
R-4	337,581	596,223	779,194	625,064	660,940	613,882	534,624	379,999	455,267
R-5	581,692	478,235	452,119	515,340	559,646	631,521	382,328	338,485	399,845
R-6	416,042	604,922	577,701	711,900	594,040	632,353	401,858	329,366	359,459
R-7	555,703	597,488	662,150	472,545	530,993	629,258	339,533	328,523	423,949
R-8	406,841	620,133	566,742	431,957	654,120	458,091	372,027	392,154	401,061
R-9	525,614	658,603	843,116	800,239	484,522	521,661	510,474	367,622	420,515
R-10	645,625	479,825	705,727	556,680	692,557	558,763	-	-	-

Previo a los cálculos de los parámetros de forma (β) y vida característica (α) para cada grupo de muestras, cada uno de estos se somete a una rápida evaluación con el software Minitab 17 para facilitar la comprobación de que los datos obtenidos se ajustan a este tipo de distribución. Minitab cuenta con una opción para la comparación del ajuste de los datos a distintas distribuciones, esta información se presenta en la Fig. 4. 2, donde se muestra el valor estadístico de Anderson-Darling para cada grupo de datos, este es un parámetro que utiliza un método de estimación de máxima verosimilitud (MLE por sus siglas en inglés, *maximum likelihood estimation*), indica si los datos se ajustan a la distribución en cuestión, entre menor es el valor de este parámetro los datos se ajustan con mayor exactitud a dicha distribución [47].

En la Fig. 4. 2 se presenta la comparación de las distribuciones Weibull, Log-normal, Exponencial y Log-logística, se encuentra que las distribuciones Weibull, Log-logística y Log-normal se ajustan a los datos con mayor exactitud, sin embargo, comúnmente la distribución Log-logística se utiliza en modelaje de crecimiento para fenómenos bioestadísticos y económicos; la Log-normal se usa comúnmente para descripción de fiabilidad en análisis financieros, aunque es intercambiable con Weibull en predicción de fallas, sin embargo, con la distribución Log-normal se obtienen predicciones de falla menores que Weibull en la extrapolación de las muestras; por lo anterior, y por historial de aplicabilidad en análisis de supervivencia y predicción de falla de producto, se selecciona la distribución de Weibull [48, 49].

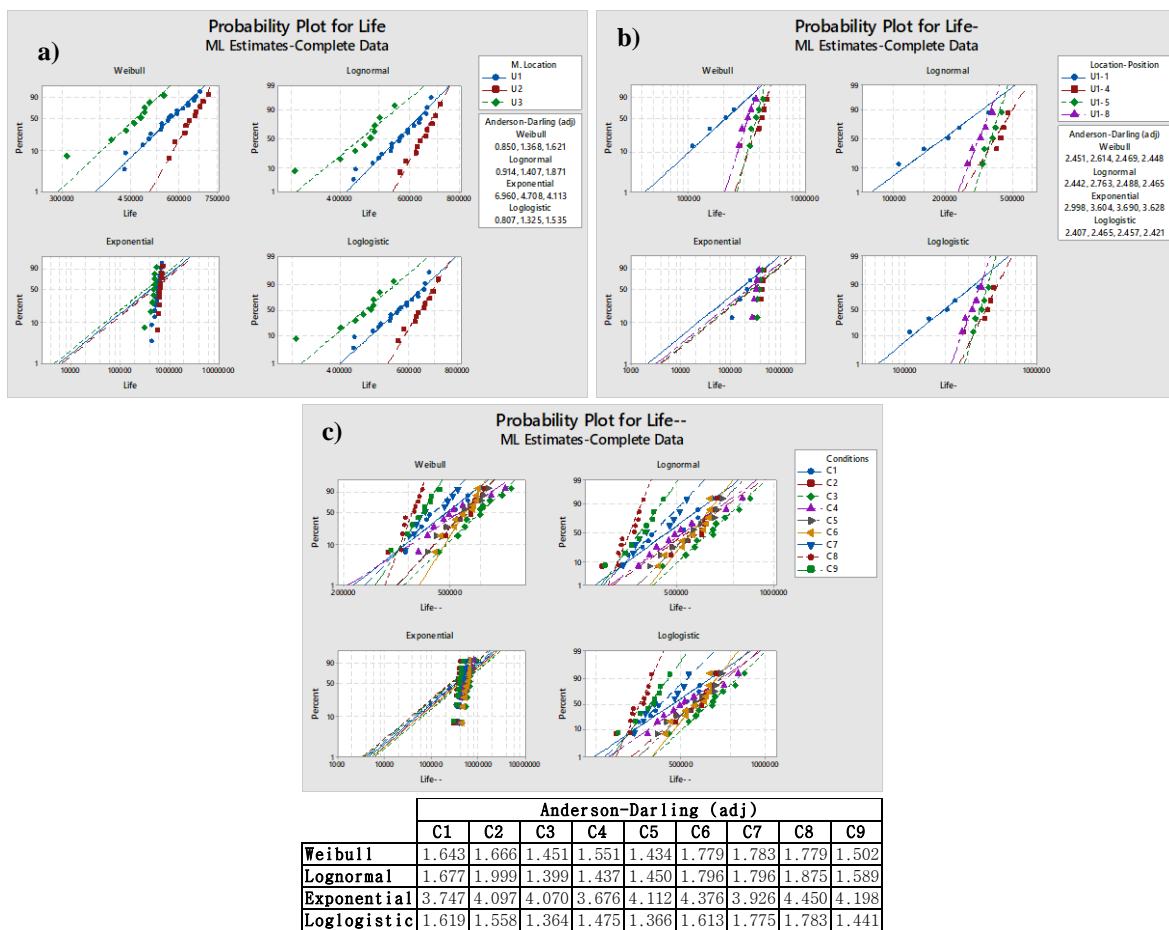


Fig. 4. 2 Comparación de ajuste de datos a los diferentes tipos de distribuciones en los estudios a) T-199 y T-172, b) T-214 y c) T-557.

En la Fig. 4. 3 se muestran los gráficos obtenidos con Minitab 17 utilizando la distribución Weibull para el análisis de distribución paramétrica de las 4 pruebas realizadas, se muestra el gráfico con la función de “análisis estadístico” como cálculo de confiabilidad y supervivencia, se analiza la distribución de datos como datos con censura a la derecha, ya que estos datos se encuentran recabados con información de fallas exactas y en algunos casos con censura por fallas o Tipo II.

En el gráfico de la

Fig. 4. 4 se muestra el análisis de distribución para los datos del estudio T-199, en el gráfico de función de distribución de probabilidad se observa cierta asimetría en la distribución de los tres grupos de datos, los tres cargados a la derecha en su rango individual. Este comportamiento es común para los experimentos de supervivencia, ya que es poco probable que la supervivencia de los componentes no rebase la mitad del tiempo de experimentación, a este tipo de tendencia se le conoce como asimetría positiva, ya que los datos se cargan hacia la derecha de la distribución [50].

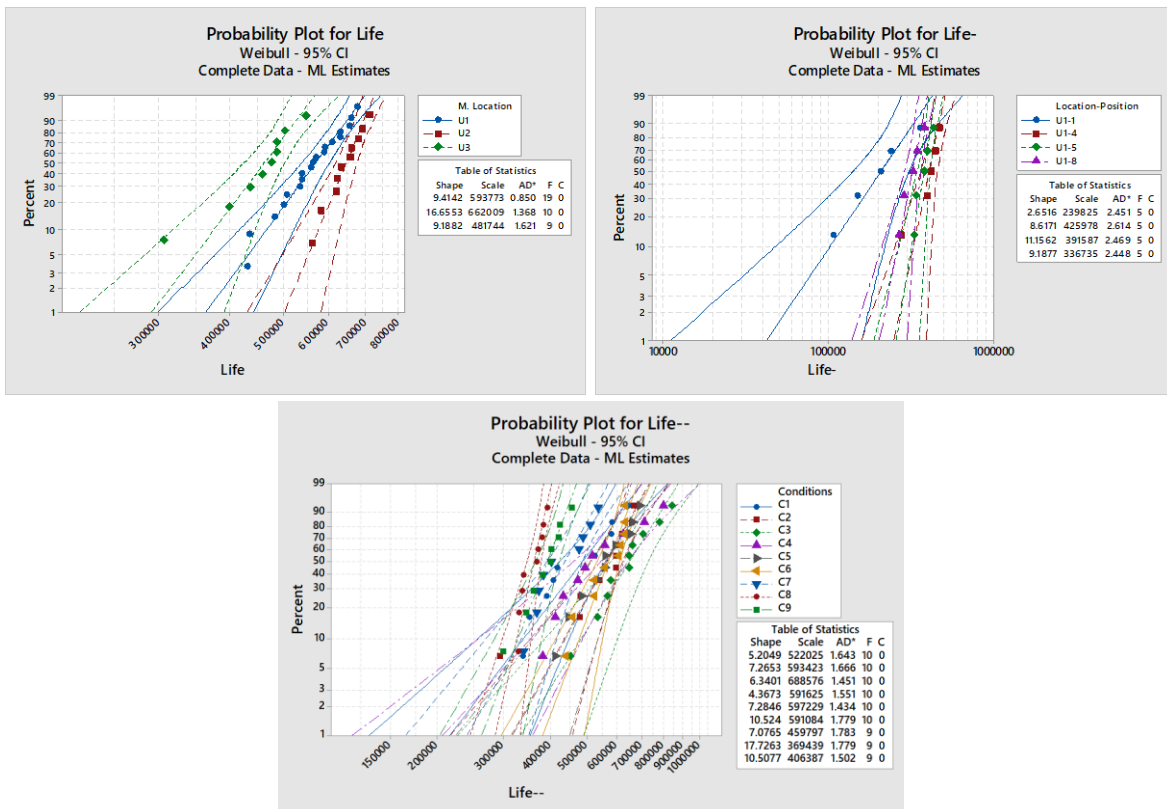


Fig. 4. 3 Curvas de probabilidad como análisis de distribución paramétrica de:
a) T-199 y T-179, b) T-214 y c) T-557.

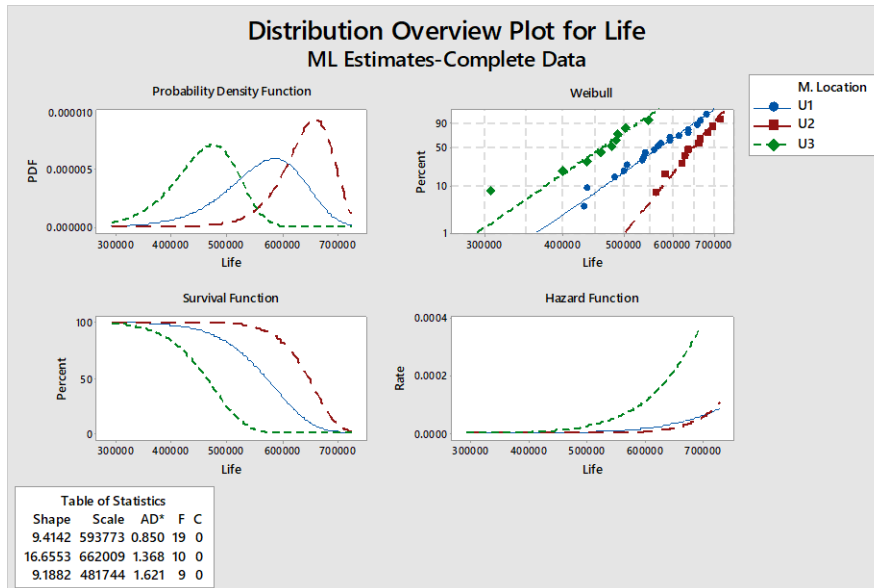


Fig. 4. 4 Gráfico de distribución para datos de estudio T-199.

Una vez que se ha comprobado que los datos se ajustan a la distribución de Weibull, se procede a la obtención de datos para la regresión lineal, con la cual se busca obtener gráficamente los parámetros α y β de cada grupo de datos para, posteriormente, calcular el valor del parámetro B10 para cada grupo de datos.

Esta regresión lineal implica la aplicación de una escala logarítmica de los ciclos de vida y de los rangos de medias o medianas, la elección entre el uso de rango de medias o medianas se hace basándose en la cantidad de muestras a estudiar, el criterio aplicado es “si el tamaño de la muestra es igual o menor a 30 datos, se utiliza el rango de medianas, caso contrario, rango de medias” [51]. Las ecuaciones matemáticas para el cálculo de medianas y medias se presentan a continuación.

$$MR_i \cong \frac{MON_i - 0.3}{N + 0.4}$$

$$mR_i \cong \frac{MON_i}{N + 0.4}$$

Donde MR_i representa el rango de medianas y mR_i el rango de medias, MON_i representa el número de orden medio, en este caso se toma como la posición de cada dato dentro del grupo de datos, en orden ascendente. En este caso, como los grupos de datos analizados no sobrepasan las 20 muestras, se toma como base el análisis con el rango de medianas, MR_i ,

esta aproximación se conoce como aproximación de Bernard y es ampliamente utilizada como función de distribución acumulativa discreta [30, 31, 51].

A continuación, se presenta la secuencia para la obtención de los parámetros α , β y B10. En la Tabla 4. 4 se muestran los datos de la regresión lineal para el estudio T-199, U2.

- 1) Se agrupa el numero n de ciclos de falla en orden ascendente.
- 2) Utilizando la aproximación de Bernard, se determina el rango de medianas para cada dato de falla ajustado en el orden establecido en el inciso 1.
- 3) Utilizando regresión lineal se encuentran los parámetros α y β de la siguiente manera. Para la regresión lineal se aplica el método de mínimos cuadrados:

$$X = \ln(\text{cycles}); Y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right] \text{ considerando } F(t) = MR_i$$

De esta regresión se obtiene una ecuación de la forma: $Y = A + BX$, donde $\beta = B$ y $\alpha = \exp \left(-\frac{A}{\beta} \right)$, el coeficiente A es la ordenada al origen de la curva resultante de la regresión lineal, mientras que B representará la pendiente de la misma curva.

- 4) Utilizando la función de fiabilidad para la supervivencia de la población, se obtiene el parámetro B10:

$$t = \alpha [-\ln R(t)]^{\frac{1}{\beta}}$$

tomando $R(t) = 0.9$, ya que se considera que el 90% de la población continúa funcional.

Tabla 4. 4 Datos de regresión lineal para estudio T-199, U2.

Sample No.	Lc	F(t)	X		Y		Y = A + BX	
			$\frac{1}{1-F(t)}$	$\ln(Lc)$	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right]$
1	561,830	0.0673	1.0722	13.2390	-2.6638	175.2699	7.0961	-2.4560
2	581,907	0.1635	1.1954	13.2741	-1.7233	176.2008	2.9696	-1.9344
3	619,086	0.2596	1.3506	13.3360	-1.2020	177.8489	1.4449	-1.0145
4	623,380	0.3558	1.5522	13.3429	-0.8217	178.0333	0.6751	-0.9118
5	632,857	0.4519	1.8246	13.3580	-0.5086	178.4362	0.2587	-0.6877
6	655,994	0.5481	2.2128	13.3939	-0.2304	179.3967	0.0531	-0.1543
7	659,480	0.6442	2.8108	13.3992	0.0329	179.5387	0.0011	-0.0756
8	677,944	0.7404	3.8519	13.4268	0.2990	180.2795	0.0894	0.3346
9	690,691	0.8365	6.1176	13.4454	0.5940	180.7801	0.3528	0.6113
10	711,737	0.9327	14.8571	13.4755	0.9927	181.5881	0.9854	1.0571

n= 10

*Lc, abreviación utilizada para *Life cycles* (ciclos de vida).

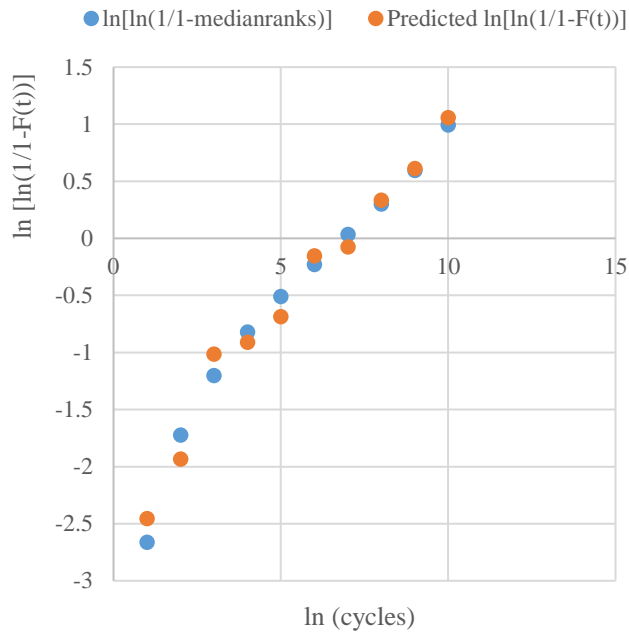


Fig. 4. 5 Gráfico de regresión lineal de estudio T-199 para la locación U2.

En la Fig. 4. 5 se muestra el gráfico de la regresión lineal en comparación con los datos calculados con la ecuación obtenida de esta regresión lineal, para esta curva se obtiene un coeficiente de correlación del 0.9916, el cual se muestra en la Tabla 4. 5, donde se encuentran los parámetros de forma y de vida característica para este estudio, así como la ordenada al origen y el cálculo del parámetro B10 Life.

Tabla 4. 5 Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-199, U2.

Correlación	0.9916
A	-199.1070
β	14.8540
α	662,843.87
B10 LIFE	569,660

En la Tabla 4. 6 se presentan los resultados de α , β y B10 de todos los estudios (refiérase a los anexos para encontrar los datos de regresión lineal para los cálculos de cada grupo de datos).

En la Fig. 4. 6 se muestra gráficamente la comparación del parámetro B10 de todos los estudios, incluyendo datos de las muestras obtenidas con el diseño de experimentos de

variación en las condiciones de laminación. Se encuentra que, controlando las condiciones de proceso, tomando la combinación de parámetros con mejor resultado de vida de la locación de manufactura U1, se logra superar el nivel de vida de producto de la locación U3, aun así, U1 se sitúa aproximadamente un 15% por debajo de los resultados de la locación U2.

Tabla 4. 6 Comparación de parámetros α , β y B10 de todos los estudios presentados.

Estudio	Identificación	Correlación	A	β	α	B10 LIFE
T-199	U2	0.9916	-199.1070	14.8540	662,843.87	569,660
	U3	0.9589	-82.0082	6.2601	489,012.32	341,351
T-179	U1	0.9887	-116.7690	8.7828	594,350.99	460,009
T-114	U1-1	0.9901	-27.5096	2.2180	243,517.44	88,287
	U1-4	0.9359	-60.0362	4.6220	437,610.90	268,931
	U1-5	0.9678	-118.6250	9.2084	393,263.57	308,000
	U1-8	0.9834	-95.2540	7.4814	338,437.12	250,521
T-557	C1	0.9529	-59.5795	4.5235	525,050.77	319,260
	C2	0.9299	-56.4196	4.2345	611,628.92	359,490
	C3	0.9857	-80.5571	5.9919	689,870.00	473,872
	C4	0.9505	-58.5818	4.4076	591,921.05	355,245
	C5	0.9889	-84.7204	6.3684	599,107.50	420,766
	C6	0.9654	-105.2089	7.9126	594,989.05	447,708
	C7	0.9425	-81.4842	6.2475	461,690.32	322,045
	C8	0.9326	-188.0484	14.6654	370,481.00	317,779
	C9	0.9931	-111.3088	8.6154	408,296.33	314,439

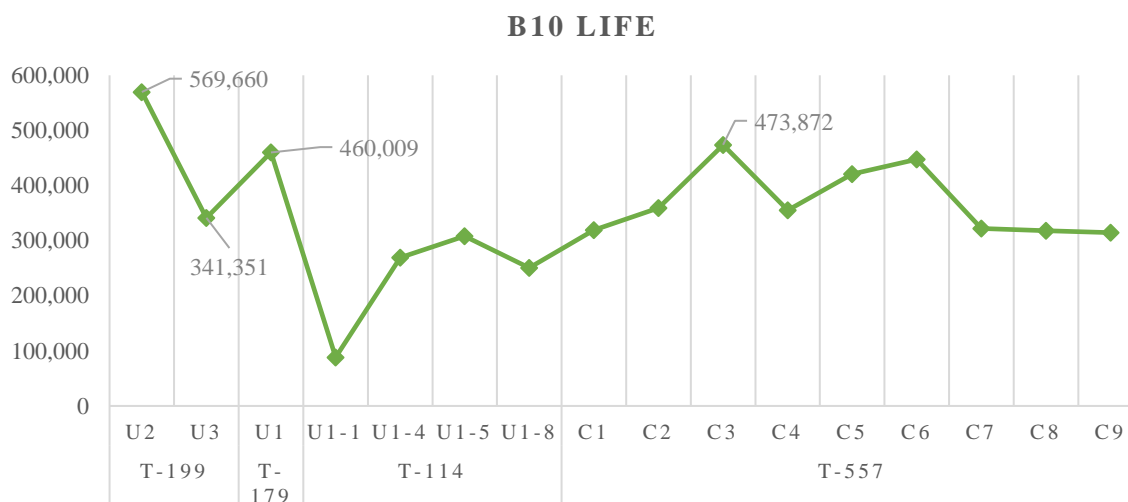


Fig. 4. 6 Gráfico comparativo de parámetro B10 de todos los estudios presentados.

Tomando los datos de los estudios T-199 U2 con un B10 de 569 mil, T-199 U3 con 341 mil, T-179 U1 y T-557 U1 con 460 mil y 473 mil ciclos, respectivamente, ambos para U1, se encuentra que el nivel de vida de la locación U1 se mantiene por encima de la locación U3 en un 28%.

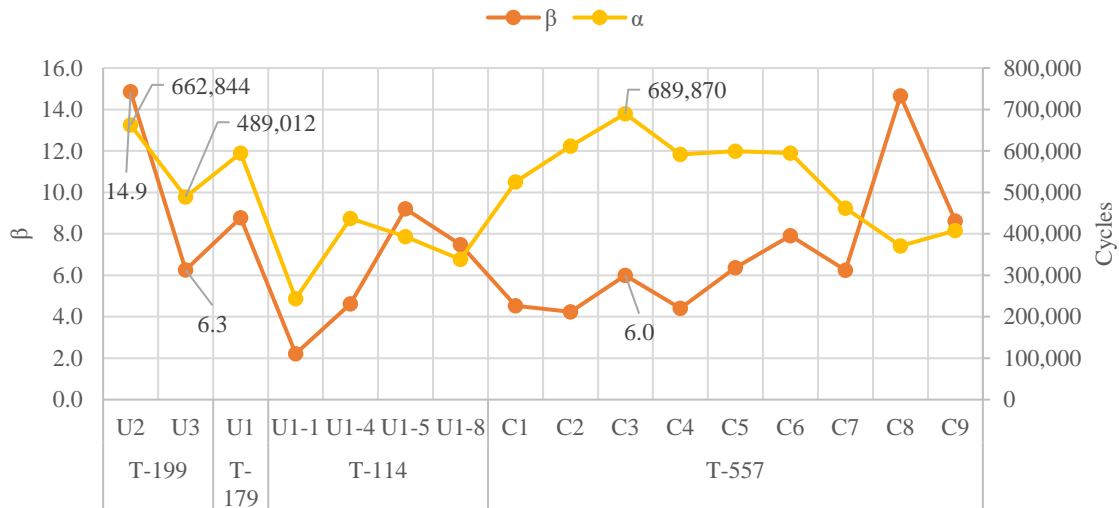


Fig. 4. 7 Gráfico comparativo de parámetros α y β de todos los estudios presentados.

Es importante resaltar que, si bien el parámetro B10 puede tomarse como referencia, cabe mencionar que, α y β también describen el comportamiento de la población de estudio. Se observa en la Fig. 4. 7 que, aunque B10 para C3 de T-557 fue mayor que para T-199 U3, sus valores de β son muy similares, lo cual indica que las distribuciones de ambas poblaciones presentarán asimetría hacia la derecha en densidad de población, sin embargo, como α es aproximadamente 200 mil ciclos mayor en C3 T-557, indica que la distribución entera de la población se encontrará en un rango más alto que T-199 U3. En otras palabras, U3 y U1-C3 tendrán la misma forma en la distribución de fallas de la población, sin embargo, en U1-C3 las fallas estarán desplazadas a la derecha, como se observa en la Fig. 4. 8. En el caso de la locación U2, el parámetro de forma (β), es el que determina la mayor probabilidad de supervivencia, ya que se observa que la vida característica (α) es incluso unos ciclos por debajo del valor para U1-C3, pero como β es menor en U1, la distribución se amplía ocasionando mayor dispersión en los datos.

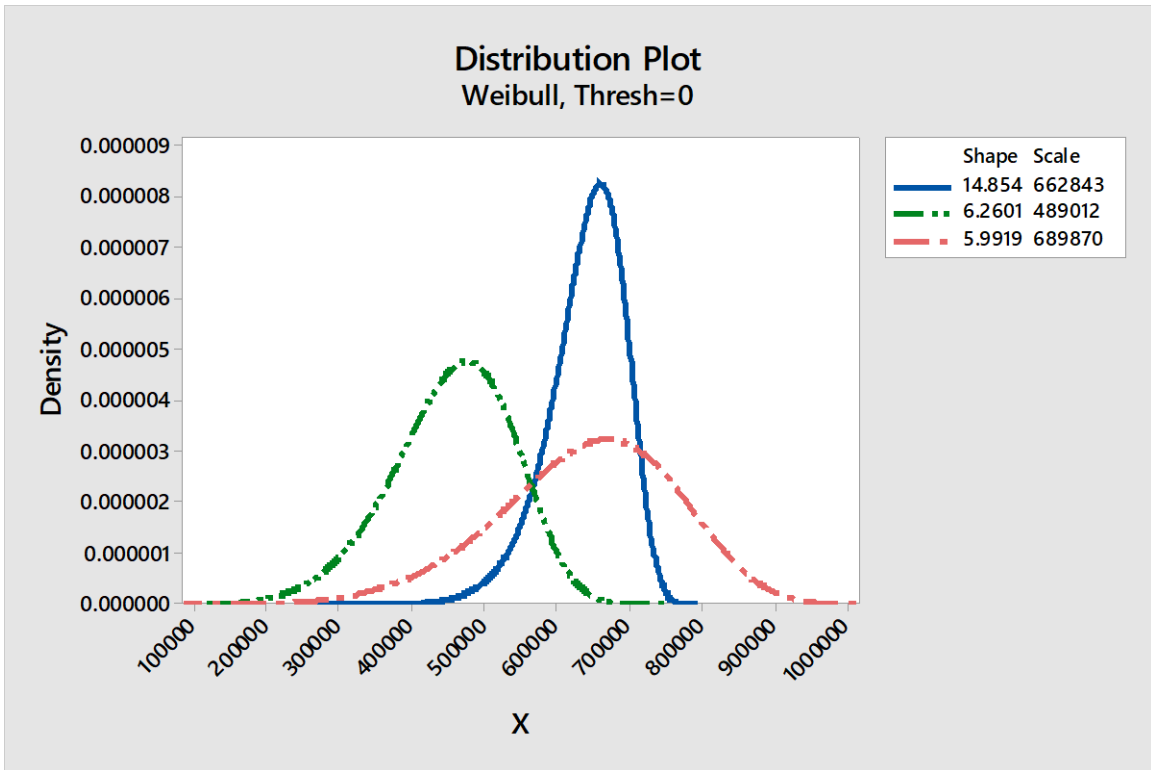


Fig. 4. 8 Gráfico de distribución de estudios T-199 U2 (azul), T-199 U3 (verde) y T-557 U1-C3 (rosa).

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS: FATIGA MECÁNICA Y MECANISMOS DE FRACTURA

5.1 Relación espesor de adhesivo y tiempo de vida

Además de los datos presentados al inicio del apartado 3.4.4, sobre el espesor del adhesivo del cable plano, se presentan en la Tabla 5. 1 datos dimensionales del espesor del adhesivo de algunas muestras recabadas antes de la prueba de fatiga para el estudio T-403 y T-457 (refiérase al inciso E y F de los Anexos para encontrar los datos de este estudio). En la Fig. 5. 1 se encuentra el gráfico de los datos de la Tabla 5. 1.

Tabla 5. 1 Datos de espesor y parámetro B10 Life de estudio T-403 y T-457.

Condición	B10 Life	Espesor (μm)
C1	316,892	12.734
C2	329,307	12.237
C3	356,916	13.145
C4	251,537	11.824
C5	440,148	11.787
C6	379,318	11.573
C7	396,591	11.502
U1-1	410,768	16.102
U1-4	258,082	16.159
U1-5	368,951	16.078
U1-8	362,873	16.073
U3	325,313	16.074

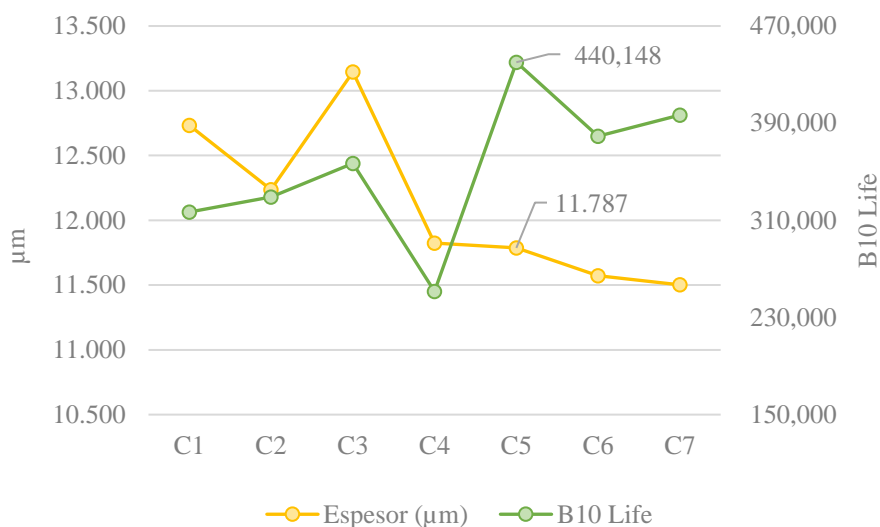


Fig. 5. 1 Gráfico de parámetro B10 contra espesor del adhesivo de cada condición.

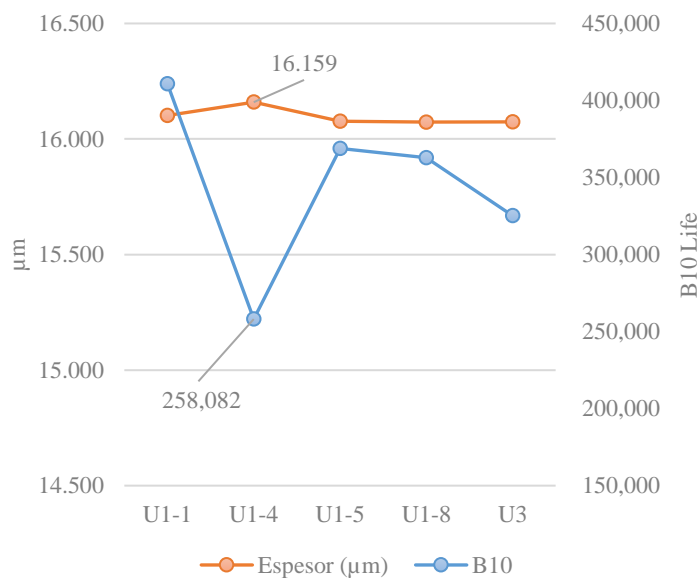


Fig. 5. 2 Gráfico de parámetro B10 y espesor de adhesivo antes de prueba de fatiga de material para estudio T-457 presentado en Tabla 3.9.

Los datos fueron obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido con preparación de encapsulado metalográfico en frío con resina poliéster, la muestra se analizó en la sección transversal. En ambos casos presentados, los rangos de espesor varían aproximadamente entre 1.0 y 1.5 μm .

En las Fig. 5. 1 y Fig. 5. 2 se presentan curvas de estudios distintos con piezas manufacturadas en condiciones distintas, en ambas se observa un comportamiento similar: se encuentra que

existe cierta tendencia en sentido inverso, a medida que el espesor del adhesivo es menor, el tiempo de vida registrado es más alto. Sin embargo, en la Fig. 5. 1 se observa con mayor énfasis la tendencia, se atribuye esta estabilidad a que el proceso se llevó a un mayor control en las variables, además en la Fig. 5. 2 las diferentes condiciones representan la posición del cable durante el proceso de laminación, pero las condiciones de temperatura, voltaje y presión no cambian, a diferencia de la Fig. 5. 1, en el cual cada condición es distinta.

Este dato es de relevancia ya que, aunado al mecanismo de propagación de fracturas en los conductores, el cual inicia en las orillas de acuerdo con la evidencia presentada en la sección 3.4.2 y 0, se puede afirmar una relación directa entre el espacio vacío del material adhesivo en las orillas de los conductores, es decir la compactación de este con el conductor. Menor espesor corresponde mayor compactación por lo tanto menor espacio vacío entre las orillas del conductor y el adhesivo.

5.2 Mecanismos de fractura presentes en circuitos de cobre

De acuerdo con los resultados mostrados en la sección 3.4 sobre análisis de fallas de las muestras sometidas a fatiga. Se encuentran las siguientes características.

- a) En la Fig. 3. 13 se encuentran indicios de inclusiones en el material, los cuales representan puntos de concentración de esfuerzos donde es posible considerar el inicio de fracturas. Cabe destacar que, estos defectos son inherentes al material y no se asocian ni al proceso de corte ni al de laminación del cable plano, sino a la manufactura del conductor de cobre. Se descartan estos indicios como posibles productos de corrosión debido a la zona en que se encuentran y por falta de los componentes necesarios para que este proceso ocurra (ánodo, cátodo, electrolito, medio, etc.) [52, 53].

Si se compara la Fig. 3. 13 con la Fig. 3. 14, se observan ciertas similitudes, sin embargo, es importante destacar que en la Fig. 3. 13 se muestra la zona transversal del circuito en la dirección de laminación, mientras que en la Fig. 3. 14 se analiza la zona superficial de este, por lo que la comparación es de planos distintos.

- b) En todos los circuitos analizados mediante microscopía se observan zonas con fracturas transgranulares e intergranulares, por lo que se sugiere un mecanismo típico de fallas por fatiga, donde se combinan estos dos métodos de propagación de grietas. Cabe destacar que no se muestran imágenes del interior de las fracturas, donde se encontrarían las estrías características de las fracturas por fatiga en cobres. Debido a la naturaleza dúctil de este material es predecible encontrar excesiva deformación antes de presentar fracturas [54].
- c) Como se estableció en la sección 3.3.1, sobre la descripción del equipo de prueba, en la Fig. 3. 7 que indica el ensamble de la muestra en el fixture, es importante resaltar que el incorrecto ensamble en esta sección puede aumentar o disminuir la resistencia a la fatiga en los circuitos al aumentar la oblicuidad entre las paredes de los rieles y la muestra, estas ligeras variaciones angulares representan que la dirección de fatiga se dé en diferentes planos cristalográficos del conductor [13, 55].

5.3 Transformación morfológica en circuitos de cobre sometidos a fatiga

De acuerdo con los datos de microscopía presentados en las secciones 3.4.2 y 0 se encuentra que las muestras analizadas después de la prueba de fatiga presentan una transformación en la morfología de los granos de los conductores.

Las temperaturas para tratamientos térmicos en cobres puros se manejan en rangos desde 200°C y superior a los 700°C, para procesos de recristalización y refinamiento de grano, generalmente aplicados a láminas sometidas a deformación en frío [13, 56].

Sin embargo, existen estudios en los que se describe que el cobre de alta pureza puede llegar a recristalizar a temperaturas incluso por debajo de los 100°C. En los cobres de ultra alta pureza, por encima de 4N⁵, la recristalización puede ocurrir incluso a temperatura ambiente, a tiempos de exposición prolongados. Así mismo, se da la recristalización por procesos de deformación principalmente los que incluyen temperatura, lo cual ocasiona a su vez una disminución en propiedades como resistencia a la tensión y la energía de activación para procesos de recristalización, la cual depende también de la pureza del material, a menor grado de pureza, mayor energía es necesaria para la activación de la reacción [57–60].

Las pruebas de fatiga de la presente investigación se llevan a cabo en una cámara climática a una temperatura controlada de 85°C, sin embargo, en la superficie de los conductores esta temperatura puede llegar a elevarse por acción de la corriente que circula a través de ellos, y del trabajo mecánico que se introduce en el material. Por lo tanto, se considera posible sugerir un proceso de recristalización en estas condiciones, en mayor medida por la acción de la temperatura ambiental del equipo y los esfuerzos a los que se somete el material que a la acción de la corriente, ya que como este material es un conductor, el aumento de la temperatura en él es alrededor de 3°C, considerando cálculos básicos de potencia y corriente, y considerando el calor específico del material (refiérase al inciso G de los anexos para mayor detalle) [9, 42, 61, 62].

De acuerdo con Ryosuke, sobre el tamaño de grano y la orientación de estos en la resistencia a la fatiga de este tipo de material, se concluye que a menor tamaño de grano y orientación

⁵ Le letra “N” designa la cantidad de nueves en la composición de un material; por ejemplo, un cobre 4N, tendrá una composición 99.99 %.

aleatoria se alcanzan mayores ciclos de vida [13]; así como que habrá diferencia en los movimientos de dislocación presentes en el material a medida que el cobre va cambiando su microestructura [55].

En el caso del material analizado los ciclos de vida alcanzado son entre 400 y 500 mil ciclos. A medida que el análisis se realiza alejado a las zonas de fractura, los granos se delimitan de mayor área, esto indica que en la zona de fractura existe una concentración mayor de energía lo que ocasiona un mayor grado de recristalización [62]; por lo que se tienen muestras con diferentes estructuras a lo largo de un mismo conductor como consecuencia de la concentración de esfuerzos durante la prueba.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La primera hipótesis planteada al inicio de este proceso de investigación establece que:

“Las variables del proceso de laminación fuera de control o erróneamente establecidas producen deficiente homogeneidad en la distribución del adhesivo en ambos lados del material de aislamiento del cable plano, provocando que los esfuerzos de flexión y tensión durante la prueba de vida afecten directamente a los circuitos, ocasionando así fatiga prematura”

Se concluye que, el control de los parámetros de laminación es de relevancia para el desempeño del material, al controlarlos en el rango establecido se logra aumentar la vida característica de los materiales procesados como cable plano.

La segunda hipótesis establece lo siguiente:

“Al controlar el espesor y las propiedades mecánicas del adhesivo de la película PET se logra prolongar los ciclos de vida del cable plano flexible sometido a pruebas de fatiga”

Respecto al factor de espesor del adhesivo, se concluye que se encuentra una relación inversa entre este factor y los ciclos de vida, lo cual se relaciona a la compactación de los espacios de las orillas de los conductores.

Se comprueba, que las transformaciones que sufre el adhesivo durante el proceso de laminación son clave para el aumento de los ciclos de vida. Queda abierta la línea de investigación sobre el grado de cristalización de estos polímeros durante el proceso de laminación.

Se encontró que durante las pruebas de fatiga el material de los conductores sufre importante transformación morfológica, dada la evidencia de estudios anteriores, se afirma que este tipo de transformación mejora el desempeño del producto ante los esfuerzos mecánicos.

Como resultante de este proyecto queda el desarrollo de la metodología de prueba, incluyendo un método estándar de fabricación de muestras y uso de los equipos de prueba.

Se plantean las siguientes recomendaciones para mejorar el análisis y procesamiento de los materiales analizados en esta investigación.

- 1) Para mayor entendimiento del comportamiento de los materiales en cuestión, se recomienda para futuros proyectos, la realización de pruebas de fatiga variando los esfuerzos impresos en el material para lograr la obtención de curvas de Wöhler o S-N, lo cual representa una herramienta útil para el diseño de producto y desarrollo tecnológico para dispositivos con aplicaciones de rotación.
- 2) Con la finalidad de comprender en su totalidad la transformación de los materiales en este proceso, se recomienda estudiar con un enfoque mecánico el material adhesivo, así como la influencia del proceso de laminación en la transformación de los conductores.
- 3) Se recomienda evaluar la posibilidad de un proceso previo de recristalización del material conductor, con la finalidad de reducir y definir el tamaño y los límites de grano y con ello aumentar los ciclos de vida del cable.
- 4) Para lograr un mayor nivel de vida característica del material, se recomienda mejorar el proceso de corte de los circuitos, con la finalidad de establecer un corte uniforme a lo largo de todos los conductores que conforman la pieza y reducir la probabilidad de inicio de fracturas debido a deficiencias en el corte. De esta manera, se relega el inicio de fracturas a defectos morfológicos del material como dislocaciones, inclusiones no metálicas, orientación cristalográfica de los granos, entre otros defectos inherentes al material, pero fuera del control del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ueno, Yoshifumi; Takamatsu, Hiroshi; Kudo N (2007) EE. UU. Patent No. 2007/0193770 A1 Flexible Flat Cable. 1:19
- [2] Park JC, Ahn EY (2013) EE. UU. Patent No. 2013/0000953 A1 Steering Roll Connector for a vehicle. 54:309–315
- [3] Da Silva, Lucas F. M.; Ochner, Andreas; Adams RD. (2011) Handbook of Adhesion Technology, 1st. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01169-6>
- [4] James L, Dale S (2011) Adhesives Technology for Electronic Applications, Second. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64364-6>
- [5] ASM International (1992) ASM Metals Handbook Vol. 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Second. ASM International
- [6] Askeland DR, Wright WJ (2014) The Science and Engineering of Materials, 7th Ed. Cengage Learning
- [7] William D. Callister J (2007) Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [8] ASM International (2001) Introduction and Overview. In: Davis JR (ed) ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys. ASM International, pp 3–9
- [9] Perez Montiel H (2015) Física General, Primera Ed. Grupo Editorial Patria, México D. F.
- [10] Konings RJM (2012) Comprehensive Nuclear Materials, Second edi. Surgical Pitfalls. <https://doi.org/10.1016/b978-141602951-9.50001-3>
- [11] Díaz-Garduño D (2015) Estudio de Cobre Recristalizado por Nanoidentación. Instituto Politécnico Nacional
- [12] Duque-Jaramillo J, Llano-Sánchez LE, Villazón-Amarís H (2006) Estructura cristalina del cobre, propiedades macroscópicas mecánicas y de procesamiento. Ciencia e Ingeniería Neogranadina 16:9
- [13] Matsuo R (2020) Influence of the Crystal Orientation and the Grain Size on the Flexing Property of Tough Pitch Copper. Furukawa Electric Review 33–39
- [14] Matsuo, Ryosuke; Mitose K (2018) EUR Patent No. 3 279 346 A1 Rectangular Rolled Copper Foil, Flexible Flat Cable, Rotating Connector, and Method for manufacturing Rectangular Rolled Copper Foil. 1:1–21

- [15] ASM International (2004) *Characterization and Failure Analysis of Plastics*, Second. ASM International, Materials Park, Ohio
- [16] ASM International (1998) *ASM Metals Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture*, Second. ASM International
- [17] ASM International (2000) *ASM Metals Handbook Vol. 8 Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International
- [18] Bell DT (2015) *PET film artificial weathering: the action of degradation agents on bulk and surface properties*. University of Birmingham
- [19] Miyajima Y, Okubo S, Abe H, Okumura H, Fujii T, Onaka S, Kato M (2015) Dislocation density of pure copper processed by accumulative roll bonding and equal-channel angular pressing. *Materials Characterization* 104:101–106
- [20] De Sousa TG, Sordi VL, Brandão LP (2018) Dislocation density and texture in copper deformed by Cold Rolling and Ecap. *Materials Research* 21:1–6
- [21] Skoog D, Holler FJ, Crouch SR (2008) *Principios de análisis instrumental*, Sexta. Cengage Learning Latinoamérica
- [22] Coates J (2000) Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. *Encyclopedia of Analytical Chemistry* 10815–10837
- [23] Ipohorski M, Bozzano PB (2013) Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e Investigación* 63:43–53
- [24] Ul-Hamid A (2018) A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy. *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98482-7>
- [25] Reimer L (1998) *Scanning Electron Microscopy. Physics of Image Formation and Microanalysis*, 2nd. Editi. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York
- [26] Devore JL (2018) *Fundamentos de probabilidad y estadística aplicada*, 1st editio. Cengage Learning Latinoamérica
- [27] Ruiz Morales E, Tajonar Sanabria F, Arenas Martínez YG, Reyes Cervantes HJ, Juárez Hernández B (2017) Una aplicación del modelo Weibull en el análisis de supervivencia. In: *Semana Internacional de la Estadística y la Probabilidad*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla., p 4
- [28] Ramírez-Castaño S (2014) *Análisis de datos de falla*. Universidad Nacional de

Colombia - Sede Manizales

- [29] Neale MJ (2001) *Lubrication and Reliability Handbook*, First edit. Butterworth-Heinemann
- [30] Lee YL, Makam S, McKelvey S, Lu MW (2015) Durability Reliability Demonstration Test Methods. *Procedia Engineering* 133:31–59
- [31] Abernethy RB (2010) *The New Weibull Handbook*, Fifth Edit. Robert B. Abernethy, North Palm Beach, Florida
- [32] Pretsch E, Bühlmann P, Affolter C (2000) *Structure determination of organic compounds: Tables of spectral data*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [33] García-Braham R (2019) *Absorciones características de grupos funcionales FTIR (Compilación)*.
- [34] García-Braham R (2019) *Tablas de asignaciones de bandas FTIR (compilación)*.
- [35] Ramírez-Barrón SN, Sánchez-Valdés S, Puente-Urbina BA, Martínez-Montemayor S, Esparza-González SC, Betancourt-Galindo R (2019) Preparación de un Adhesivo Sensible a la Presión (PSA) con la incorporación de nanopartículas de ZnO. Estudio de sus Propiedades Físicoquímicas y Antimicrobianas. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica* 40:1–10
- [36] Crawford RJ (1982) Microhardness testing of plastics. *Polymer Testing* 3:37–54
- [37] Levine LE, Geantil P, Larson BC, Tischler JZ, Kassner ME, Liu W, Stoudt MR, Tavazza F (2011) Disordered long-range internal stresses in deformed copper and the mechanisms underlying plastic deformation. *Acta Materialia* 59:5803–5811
- [38] Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits (2003) *IPC-TM-650 Test Methods Manual*.
- [39] Vargas-Osuna LE (2006) *Delaminación de materiales en interfases de microcircuitos*. Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería
- [40] Budynas RG, Nisbett JK (2012) *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*, 9na edición. McGraw-Hill
- [41] Prado-Souza P (2016) *Diseño de una fatigadora de cables de acero a flexión sobre poleas*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
- [42] Li G, Thomas BG, Stubbins JF (2000) Modeling creep and fatigue of copper alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials*

Science 31A:2491–2502

- [43] Weibull W (1951) A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics* Vol. 18:293–297
- [44] Malvino A, Bates DJ (2007) *Principios de la electrónica*, 7th Editio. McGraw-Hill
- [45] ASTM International (2012) E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM International, West Conshohocken, PA 1–21
- [46] Kubin LP, Devincre B, Tang M (1998) Mesoscopic modelling and simulation of plasticity in fcc and bcc crystals: Dislocation intersections and mobility. *Journal of Computer-Aided Materials Design* 5:34–54
- [47] Minitab LLC. (2019) El estadístico de Anderson-Darling. In: Soporte de Minitab 18. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/>. Accessed 5 May 2021
- [48] Minitab LLC. (2019) Distribución Loglogística. In: Soporte de Minitab 18. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/loglogistic-distribution/#:~:text=La distribuci3n loglogística es una,escala%2C ubicaci3n y valor umbral.&text=La distri.>
- [49] Minitab LLC. (2019) Distribución lognormal en el análisis de fiabilidad. In: Soporte de Minitab 18. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/reliability/supporting-topics/distribution-models/lognormal-distribution/>. Accessed 5 May 2021
- [50] Devore JL (2010) *Probabilidad y estadica para ingeniería y ciencias*, Octava ed. Cengage Learning Latinoamerica
- [51] Khan MS, Pasha G (2009) The plotting of observations for the inverse Weibull distribution on probability paper. *Journal of Advanced Research in Statistics and Probability* 1:11–22
- [52] Roberge PR (2008) *Corrosion Engineering: Principles and Practice*. <https://doi.org/10.1036/0071482431>
- [53] Salazar-Jiménez JA (2015) Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Revista Tecnología*

en Marcha 28:127–136

- [54] ASM International (1992) ASM Metals Handbook Vol. 12 Fractography. ASM International
- [55] Young FW, Noggle TS (1960) Evidence for dislocation reactions in copper. *Journal of Applied Physics* 31:604–606
- [56] Li M, Zinkle SJ (2012) Physical and mechanical properties of copper and copper alloys. In: *Comprehensive Nuclear Materials*. Elsevier Ltd., pp 667–690
- [57] Tanabe N, Kurosaka A, Suzuki K, Kohno O (1995) Fatigue of High Purity Copper Wire. *Journal de Physique IV Proceedings* 05:389–396
- [58] Wang JT, Zhang Y, Liu JQ (2008) Continuous recrystallization phenomenon in high purity copper during equal channel angular pressing up to high strain at room temperature. *Materials Science Forum* 584-586 PA:929–937
- [59] Gao W, Belyakov A, Miura H, Sakai T (1999) Dynamic recrystallization of copper polycrystals with different purities. *Materials Science and Engineering A* 265:233–239
- [60] Park JH, An JH, Kim YJ, Huh YH, Lee HJ (2008) Tensile and high cycle fatigue test of copper thin film. *Material Science & Engineering Technology (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik)* 39:187–192
- [61] Whitaker JC (2005) *The Electronics Handbook*, Second edi. IEEE Circuits and Devices Magazine. <https://doi.org/10.1109/mcd.2006.1615246>
- [62] Cheng AS, Laird C (1981) Mechanisms of fatigue hardening in copper single crystals: The effects of strain amplitude and orientation. *Materials Science and Engineering* 51:111–121
- [63] Papavinasam S (2014) *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry, First*. Corrosion Control in the Oil and Gas Industry. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04629-X>

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. 1 Diagrama de sección transversal de un diseño de cable plano utilizado en la industria automotriz.	6
Fig. 1. 2 Diagrama de conexión de columna de dirección y controles de dispositivos del vehículo.	7
Fig. 1. 3 El cable plano (derecha) se ensambla dentro del SRC permitiéndole rotar y mantener una conexión; (diseño de referencia, cortesía Furukawa Automotive México).	7
Fig. 2. 1 Diagrama de superficies de adhesión.	11
Fig. 2. 2 Secuencia de procesos en falla por fatiga en materiales metálicos [16].	22
Fig. 3. 1 Espectro infrarrojo de ambos adhesivos y de la película PET por la cara externa.	30
Fig. 3. 2 Mapeo elemental por EDS de zona transversal de los adhesivos de las películas a) P1 y b) P2.	32
Fig. 3. 3 a) Dimensiones P1, b) Dimensiones P2.	33
Fig. 3. 4 Gráficos de distribución de la dureza con respecto a cada muestra, con la respectiva penetración registrada en cada medición.	35
Fig. 3. 5 Imágenes de microscopio óptico con aumento de 100x, a) muestra de U1, b) muestra U2.	38
Fig. 3. 6 Imágenes SEM tomadas con un equipo JEOL JSM-IT100, vista transversal de U1 (izquierda), U2 (derecha).	38
Fig. 3. 7 Esquema del montaje de las muestras en la prueba de fatiga.	41
Fig. 3. 8 Esquema del movimiento rectilíneo alternativo.	42
Fig. 3. 9 Diagrama de flujo de proceso de preparación de muestras.	44
Fig. 3. 10 Diagrama de muestra de prueba y toma de resistencia por muestra.	45
Fig. 3. 11 Arreglo divisor de voltaje para el monitoreo de cada muestra.	46
Fig. 3. 12 Esquema de la sección sometida a encapsulado metalográfico.	49
Fig. 3. 13 Microestructura de sección transversal, magnificación 500X. A la izquierda el circuito 5 (central), a la derecha el circuito ocho (orilla).	49
Fig. 3. 14 Microestructura del cobre virgen, vista de la parte superior, 500X.	50
Fig. 3. 15 Fracturas en la zona transversal, muestra 1-5 T-179, circuito 5, 500X.	51

Fig. 3. 16 Muestra de cobre posterior a la remoción de la película PET y ataque químico (izquierda 100X, derecha 500X).	51
Fig. 3. 17 Sección externa de circuito (orilla), muestra fatigada 581k ciclos.	52
Fig. 3. 18 Sección interna de circuito, muestra fatigada 581k ciclos.	53
Fig. 3. 19 Comparación de la microestructura posterior y previo a la prueba de fatiga; a), b), c) cobre virgen, d) cobre después de prueba de fatiga.....	53
Fig. 3. 20 Imagen SEM de cobre antes del proceso de producción del cable y pruebas de fatiga.	54
Fig. 3. 21 Imágenes SEM tomadas a una muestra de conductor de cobre ETP con fracturas por las pruebas de fatiga; a), b) y c) son zonas cercanas a una fractura principal, a) y c) son tomas después del ataque químico para revelar la microestructura, mientras que b) es una muestra antes del ataque. Las tomas d), e) y f) fueron obtenidas de la misma muestra en áreas alejadas de la fractura principal.	55
Fig. 3. 22 Imagen TEM dislocaciones en cobre puro después de deformación plástica [46].	56
Fig. 3. 23 Imagen SEM de mediciones de sección transversal de muestra de FFC tomada en equipo SEM JEOL JSM-IT100.	57
Fig. 3. 24 Gráficos de ciclos de vida respecto a espesor del adhesivo a la izquierda, espesor total del FFC a la derecha.	59
Fig. 4. 1 Posición de los cables planos durante el proceso de laminación.	61
Fig. 4. 2 Comparación de ajuste de datos a los diferentes tipos de distribuciones en los estudios a) T-199 y T-172, b) T-214 y c) T-557.	63
Fig. 4. 3 Curvas de probabilidad como análisis de distribución paramétrica de: a) T-199 y T-179, b) T-214 y c) T-557.	65
Fig. 4. 4 Gráfico de distribución para datos de estudio T-199.	65
Fig. 4. 5 Gráfico de regresión lineal de estudio T-199 para la locación U2.....	67
Fig. 4. 6 Gráfico comparativo de parámetro B10 de todos los estudios presentados.....	69
Fig. 4. 7 Gráfico comparativo de parámetros α y β de todos los estudios presentados.....	69
Fig. 4. 8 Gráfico de distribución de estudios T-199 U2 (azul), T-199 U3 (verde) y T-557 U1-C3 (rosa).	70

Fig. A 1 Gráfico de regresión lineal de estudio T-199 para la locación U3.....	88
Fig. A 2 Gráfico de regresión lineal de estudio T-179 para la locación U1.....	89
Fig. A 3 Gráficos de regresión lineal de estudio T-214 a) U1-1, b) U1-4, c) U1-5, d) U1-8.	90
Fig. A 4 Gráficos de regresión lineal de estudio T-557 C1 a C9.	92
Fig. A 5 Gráficos de regresión lineal de estudio T-403 C1 a C7.	96
Fig. A 6 Gráficos de regresión lineal de estudio T-457 U1-1, 4, 5, 8 y C3.	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1 Clasificación de adhesivos por función [3].	15
Tabla 3. 1 Bandas de transmisión significativa en espectros de adhesivos [32–34].	31
Tabla 3. 2 Composición de la zona del adhesivo de P1 y P2.	32
Tabla 3. 3 Dimensiones de espesor de la película PET.	33
Tabla 3. 4 Mediciones de microdureza Vickers.	34
Tabla 3. 5 Mediciones de rugosidad en diferentes anchos de conductores.	37
Tabla 3. 6 Parámetros del proceso de laminación de partida y diseño de experimentos.....	39
Tabla 3. 7 Matriz de muestras a analizar.	48
Tabla 3. 8 Tamaño de grano en muestras después de prueba de fatiga.	56
Tabla 3. 9 Datos de dimensionales de espesor en películas de FFC de estudio T-457.	58
Tabla 4. 1 Resultados de primeras pruebas de fatiga comparando diferentes locaciones de manufactura de cable plano.	60
Tabla 4. 2 Condiciones de manufactura de partida.....	62
Tabla 4. 3 Resultados de ciclos de fatiga de estudio T-557 con material manufacturado con parámetros de diseño de experimentos definido en apartado 3.2.	62
Tabla 4. 4 Datos de regresión lineal para estudio T-199, U2.	66
Tabla 4. 5 Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-199, U2.....	67
Tabla 4. 6 Comparación de parámetros α , β y B10 de todos los estudios presentados.	68
Tabla A 1 Datos de regresión lineal para estudio T-199, U3.	88

Tabla A 2	Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-199, U3.....	88
Tabla A 3	Datos de regresión lineal para estudio T-179, U1.	89
Tabla A 4	Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-179, U1.....	90
Tabla A 5	Datos de regresión lineal para estudio T-214.	91
Tabla A 6	Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-214.....	91
Tabla A 7	Datos de regresión lineal para estudio T-557, C1 a C4.	93
Tabla A 8	Datos de regresión lineal para estudio T-557, C5 a C8.	94
Tabla A 9	Datos de regresión lineal para estudio T-557, C9.....	95
Tabla A 10	Datos de regresión lineal para estudio T-403, C1 a C4.	97
Tabla A 11	Datos de regresión lineal para estudio T-403, C5 a C7.	98
Tabla A 12	Datos de regresión lineal para estudio T-457, U1-1, 4, 5 y 8, C3.	100

ANEXOS.

A) Regresión lineal y parámetros calculados de estudio T-199, U3.

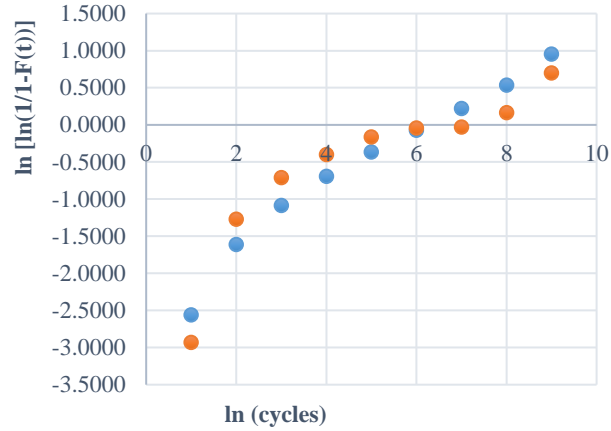


Fig. A 1 Gráfico de regresión lineal de estudio T-199 para la locación U3.

Tabla A 1 Datos de regresión lineal para estudio T-199, U3.

Sample No.	Lc ⁶	F(t)	$\frac{1}{1-F(t)}$	X		Y		Y = A + BX
				ln(Lc)	$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	x ²	y ²	Predicted $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$
1	306,292	0.0745	1.0805	12.6323	-2.5589	159.5749	6.5482	-2.9288
2	399,252	0.1809	1.2208	12.8973	-1.6120	166.3416	2.5985	-1.2695
3	436,633	0.2872	1.4030	12.9868	-1.0829	168.6582	1.1727	-0.7092
4	458,896	0.3936	1.6491	13.0366	-0.6927	169.9524	0.4798	-0.3979
5	476,514	0.5000	2.0000	13.0743	-0.3665	170.9361	0.1343	-0.1621
6	485,694	0.6064	2.5405	13.0933	-0.0700	171.4354	0.0049	-0.0426
7	486,771	0.7128	3.4815	13.0955	0.2211	171.4934	0.0489	-0.0288
8	502,177	0.8191	5.5294	13.1267	0.5365	172.3105	0.2879	0.1663
9	547,017	0.9255	13.4286	13.2122	0.9545	174.5632	0.9111	0.7017

n = 9

Tabla A 2 Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-199, U3.

Correlación	0.9589
A	-82.0082
β	6.2601
α	489,012.32
B10 LIFE	341,351

⁶ Lc, abreviación utilizada para Life cycles (ciclos de vida).

B) Regresión lineal y parámetros calculados de estudio T-179, U1.

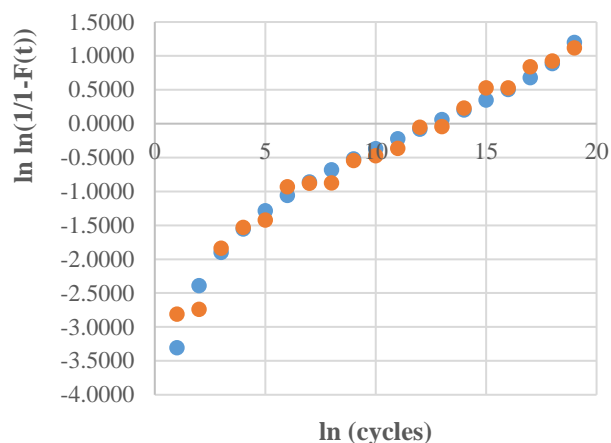


Fig. A 2 Gráfico de regresión lineal de estudio T-179 para la locación U1.

Tabla A 3 Datos de regresión lineal para estudio T-179, U1.

Sample No.	Lc	F(t)	$\frac{1}{1-F(t)}$	X		Y		Y = A + BX	
				ln(Lc)	$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	
1	431,653	0.0361	1.0374	12.9754	-3.3036	168.3604	10.9140	-2.80915	
2	435,049	0.0876	1.0960	12.9832	-2.3891	168.5638	5.7080	-2.74033	
3	482,221	0.1392	1.1617	13.0862	-1.8980	171.2475	3.6025	-1.83619	
4	499,251	0.1907	1.2357	13.1209	-1.5530	172.1571	2.4118	-1.53137	
5	505,548	0.2423	1.3197	13.1334	-1.2822	172.4862	1.6440	-1.42129	
6	534,601	0.2938	1.4161	13.1893	-1.0559	173.9570	1.1149	-0.93053	
7	537,753	0.3454	1.5276	13.1952	-0.8588	174.1121	0.7375	-0.87890	
8	538,143	0.3969	1.6581	13.1959	-0.6818	174.1312	0.4649	-0.87253	
9	558,582	0.4485	1.8131	13.2332	-0.5191	175.1164	0.2695	-0.54513	
10	563,222	0.5000	2.0000	13.2414	-0.3665	175.3354	0.1343	-0.47248	
11	570,304	0.5515	2.2299	13.2539	-0.2207	175.6665	0.0487	-0.36273	
12	590,967	0.6031	2.5195	13.2895	-0.0790	176.6112	0.0062	-0.05015	
13	591,572	0.6546	2.8955	13.2905	0.0613	176.6384	0.0038	-0.04116	
14	610,269	0.7062	3.4035	13.3217	0.2028	177.4665	0.0411	0.23213	
15	631,118	0.7577	4.1277	13.3552	0.3490	178.3627	0.1218	0.52717	
16	631,166	0.8093	5.2432	13.3553	0.5050	178.3647	0.2550	0.52784	
17	653,940	0.8608	7.1852	13.3908	0.6791	179.3127	0.4611	0.83916	
18	660,330	0.9124	11.4118	13.4005	0.8898	179.5733	0.7917	0.92456	
19	675,241	0.9639	27.7143	13.4228	1.2006	180.1722	1.4413	1.12068	
n =	19								

Tabla A 4 Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-179, U1.

Correlación	0.9887
A	-116.7690
β	8.7828
α	594,350.99
B10 LIFE	460,009

C) Regresión lineal y parámetros calculados para estudio T-214.

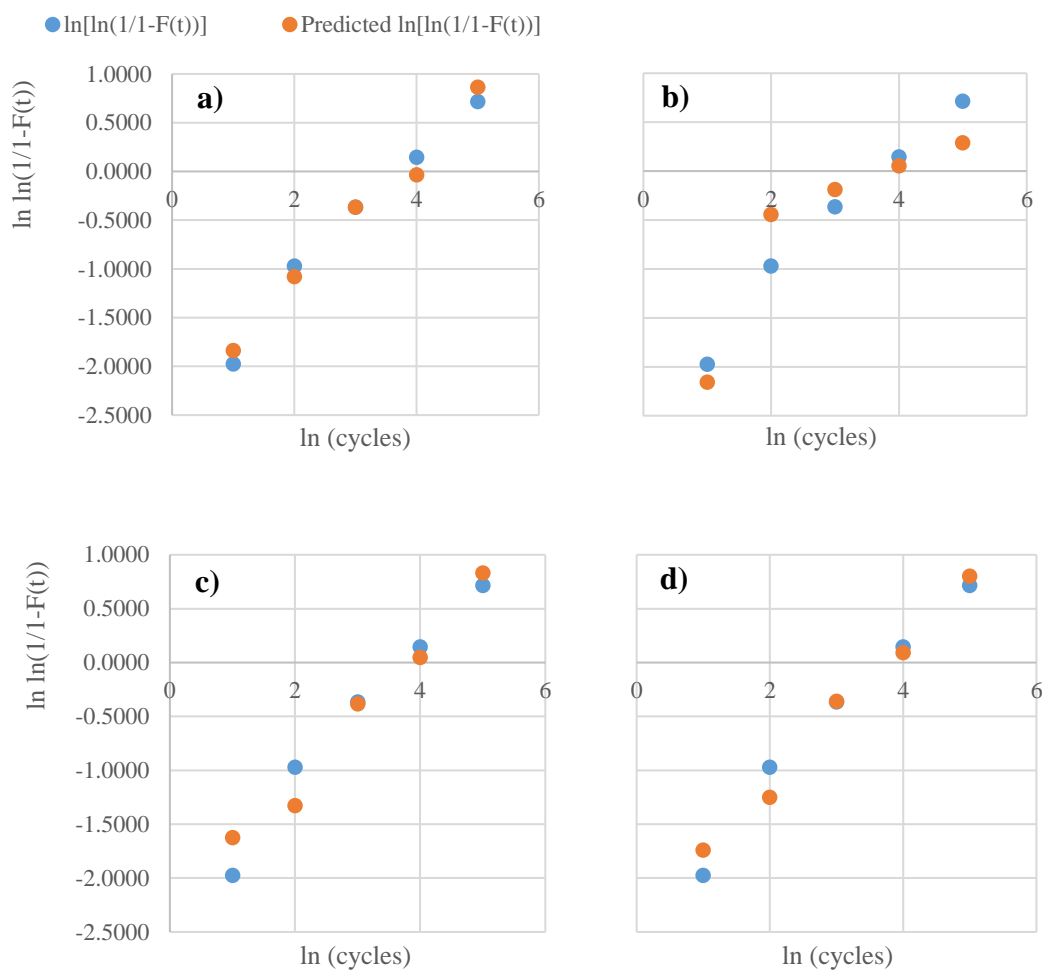


Fig. A 3 Gráficos de regresión lineal de estudio T-214 a) U1-1, b) U1-4, c) U1-5, d) U1-8.

Tabla A 5 Datos de regresión lineal para estudio T-214.

Sample No.	Lc	F(t)	X		Y		Y = A + BX	
			$\frac{1}{1 - F(t)}$	ln (Lc)	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$
U1-1								
1	106,326	0.1296	1.1489	11.5743	-1.9745	133.9636	3.8985	-1.8380
2	149,735	0.3148	1.4595	11.9166	-0.9727	142.0059	0.9461	-1.0787
3	206,349	0.5000	2.0000	12.2373	-0.3665	149.7521	0.1343	-0.3673
4	239,694	0.6852	3.1765	12.3871	0.1448	153.4407	0.0210	-0.0351
5	359,614	0.8704	7.7143	12.7928	0.7145	163.6554	0.5104	0.8647
U1-4								
1	274,364	0.1296	1.1489	12.5222	-1.9745	156.8058	3.8985	-2.1579
2	397,354	0.3148	1.4595	12.8926	-0.9727	166.2187	0.9461	-0.4460
3	420,081	0.5000	2.0000	12.9482	-0.3665	167.6560	0.1343	-0.1890
4	442,562	0.6852	3.1765	13.0003	0.1448	169.0087	0.0210	0.0520
5	465,593	0.8704	7.7143	13.0511	0.7145	170.3304	0.5104	0.2865
U1-5								
1	329,709	0.1296	1.1489	12.7060	-1.9745	161.4416	3.8985	-1.6232
2	340,465	0.3148	1.4595	12.7381	-0.9727	162.2584	0.9461	-1.3276
3	377,266	0.5000	2.0000	12.8407	-0.3665	164.8837	0.1343	-0.3824
4	395,272	0.6852	3.1765	12.8873	0.1448	166.0833	0.0210	0.0469
5	430,441	0.8704	7.7143	12.9726	0.7145	168.2875	0.5104	0.8318
U1-8								
1	268,207	0.1296	1.1489	12.4995	-1.9745	156.2379	3.8985	-1.7400
2	286,388	0.3148	1.4595	12.5651	-0.9727	157.8818	0.9461	-1.2493
3	322,618	0.5000	2.0000	12.6842	-0.3665	160.8895	0.1343	-0.3581
4	342,581	0.6852	3.1765	12.7443	0.1448	162.4162	0.0210	0.0910
5	376,733	0.8704	7.7143	12.8393	0.7145	164.8474	0.5104	0.8020
n =	5							

Tabla A 6 Parámetros resultantes de la regresión lineal del estudio T-214.

	U1-1	U1-4	U1-5	U1-8
Correlación	0.9901	0.9359	0.9678	0.9834
A	-27.5096	-60.0362	-118.6250	-95.2540
β	2.2180	4.6220	9.2084	7.4814
α	243,517.44	437,610.90	393,263.57	338,437.12
B10 LIFE	88,287	268,931	308,000	250,521

D) Regresión lineal y parámetros calculados de estudio T-557.

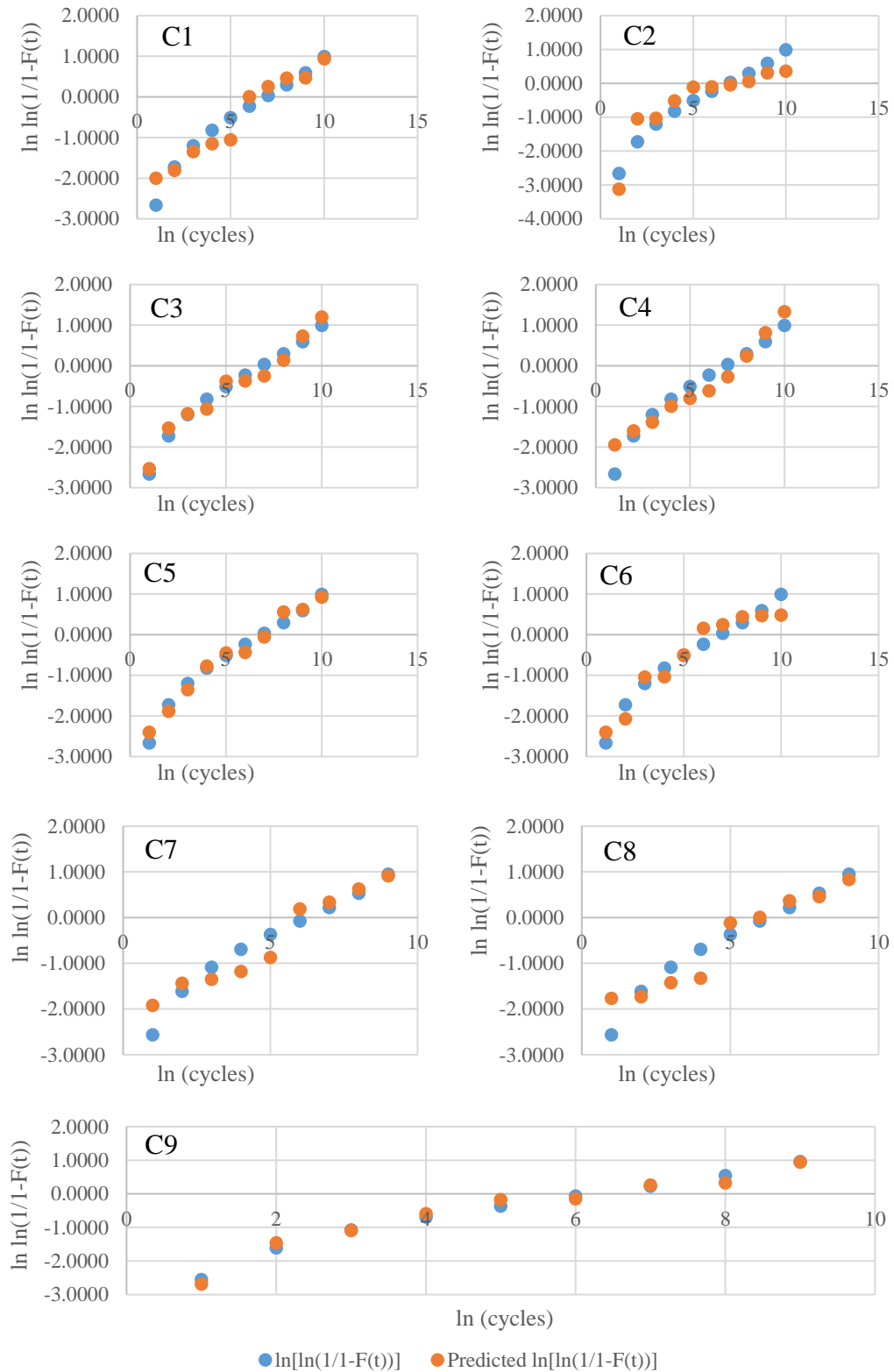


Fig. A 4 Gráficos de regresión lineal de estudio T-557 C1 a C9.

Tabla A 7 Datos de regresión lineal para estudio T-557, C1 a C4.

Sample No.	Lc*	F(t)	X			Y		Y = A + BX	
			$\frac{1}{1 - F(t)}$	ln (Lc)	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$	
C1	1	337,581	0.0673	1.0722	12.7296	-2.6638	162.0417	7.0961	-1.9980
	2	351,824	0.1635	1.1954	12.7709	-1.7233	163.0955	2.9696	-1.8110
	3	389,963	0.2596	1.3506	12.8738	-1.2020	165.7349	1.4449	-1.3455
	4	406,841	0.3558	1.5522	12.9162	-0.8217	166.8276	0.6751	-1.1538
	5	416,042	0.4519	1.8246	12.9385	-0.5086	167.4059	0.2587	-1.0526
	6	525,614	0.5481	2.2128	13.1723	-0.2304	173.5101	0.0531	0.0048
	7	555,703	0.6442	2.8108	13.2280	0.0329	174.9797	0.0011	0.2567
	8	581,692	0.7404	3.8519	13.2737	0.2990	176.1910	0.0894	0.4634
	9	582,509	0.8365	6.1176	13.2751	0.5940	176.2283	0.3528	0.4698
	10	645,625	0.9327	14.8571	13.3780	0.9927	178.9702	0.9854	0.9351
C2	1	292,641	0.0673	1.0722	12.5867	-2.6638	158.4251	7.0961	-3.1216
	2	478,235	0.1635	1.1954	13.0779	-1.7233	171.0304	2.9696	-1.0418
	3	479,825	0.2596	1.3506	13.0812	-1.2020	171.1172	1.4449	-1.0277
	4	540,952	0.3558	1.5522	13.2011	-0.8217	174.2687	0.6751	-0.5200
	5	596,223	0.4519	1.8246	13.2984	-0.5086	176.8466	0.2587	-0.1080
	6	597,488	0.5481	2.2128	13.3005	-0.2304	176.9030	0.0531	-0.0991
	7	604,922	0.6442	2.8108	13.3129	0.0329	177.2321	0.0011	-0.0467
	8	620,133	0.7404	3.8519	13.3377	0.2990	177.8940	0.0894	0.0585
	9	658,603	0.8365	6.1176	13.3979	0.5940	179.5031	0.3528	0.3133
	10	666,196	0.9327	14.8571	13.4093	0.9927	179.8104	0.9854	0.3619
C3	1	452,119	0.0673	1.0722	13.0217	-2.6638	169.5647	7.0961	-2.5319
	2	534,340	0.1635	1.1954	13.1888	-1.7233	173.9441	2.9696	-1.5308
	3	566,742	0.2596	1.3506	13.2477	-1.2020	175.5005	1.4449	-1.1780
	4	577,701	0.3558	1.5522	13.2668	-0.8217	176.0083	0.6751	-1.0632
	5	647,853	0.4519	1.8246	13.3814	-0.5086	179.0624	0.2587	-0.3765
	6	648,275	0.5481	2.2128	13.3821	-0.2304	179.0798	0.0531	-0.3726
	7	662,150	0.6442	2.8108	13.4032	0.0329	179.6470	0.0011	-0.2457
	8	705,727	0.7404	3.8519	13.4670	0.2990	181.3597	0.0894	0.1362
	9	779,194	0.8365	6.1176	13.5660	0.5940	184.0368	0.3528	0.7296
	10	843,116	0.9327	14.8571	13.6449	0.9927	186.1822	0.9854	1.2020
C4	1	380,506	0.0673	1.0722	12.8493	-2.6638	165.1034	7.0961	-1.9476
	2	411,643	0.1635	1.1954	12.9279	-1.7233	167.1309	2.9696	-1.6009
	3	431,957	0.2596	1.3506	12.9761	-1.2020	168.3787	1.4449	-1.3886
	4	472,545	0.3558	1.5522	13.0659	-0.8217	170.7174	0.6751	-0.9928
	5	493,365	0.4519	1.8246	13.1090	-0.5086	171.8460	0.2587	-0.8027
	6	515,340	0.5481	2.2128	13.1526	-0.2304	172.9904	0.0531	-0.6107
	7	556,680	0.6442	2.8108	13.2297	0.0329	175.0262	0.0011	-0.2705
	8	625,064	0.7404	3.8519	13.3456	0.2990	178.1053	0.0894	0.2401
	9	711,900	0.8365	6.1176	13.4757	0.5940	181.5943	0.3528	0.8135
	10	800,239	0.9327	14.8571	13.5927	0.9927	184.7606	0.9854	1.3291

Tabla A 8 Datos de regresión lineal para estudio T-557, C5 a C8.

Sample No.	Lc	F(t)	X			Y		Y = A + BX	
			$\frac{1}{1-F(t)}$	ln(Lc)	$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	
C5	1	410,985	0.0673	1.0722	12.9263	-2.6638	167.0895	7.0961	-2.4002
	2	445,610	0.1635	1.1954	13.0072	-1.7233	169.1872	2.9696	-1.8850
	3	484,522	0.2596	1.3506	13.0909	-1.2020	171.3721	1.4449	-1.3519
	4	530,993	0.3558	1.5522	13.1825	-0.8217	173.7784	0.6751	-0.7686
	5	558,629	0.4519	1.8246	13.2332	-0.5086	175.1187	0.2587	-0.4455
	6	559,646	0.5481	2.2128	13.2351	-0.2304	175.1668	0.0531	-0.4339
	7	594,040	0.6442	2.8108	13.2947	0.0329	176.7491	0.0011	-0.0541
	8	654,120	0.7404	3.8519	13.3910	0.2990	179.3201	0.0894	0.5595
	9	660,940	0.8365	6.1176	13.4014	0.5940	179.5980	0.3528	0.6255
	10	692,557	0.9327	14.8571	13.4481	0.9927	180.8526	0.9854	0.9231
C6	1	439,487	0.0673	1.0722	12.9934	-2.6638	168.8275	7.0961	-2.3970
	2	458,091	0.1635	1.1954	13.0348	-1.7233	169.9066	2.9696	-2.0690
	3	521,661	0.2596	1.3506	13.1648	-1.2020	173.3113	1.4449	-1.0407
	4	522,050	0.3558	1.5522	13.1655	-0.8217	173.3309	0.6751	-1.0348
	5	558,763	0.4519	1.8246	13.2335	-0.5086	175.1250	0.2587	-0.4971
	6	607,416	0.5481	2.2128	13.3170	-0.2304	177.3417	0.0531	0.1636
	7	613,882	0.6442	2.8108	13.3276	0.0329	177.6238	0.0011	0.2473
	8	629,258	0.7404	3.8519	13.3523	0.2990	178.2838	0.0894	0.4431
	9	631,521	0.8365	6.1176	13.3559	0.5940	178.3797	0.3528	0.4715
	10	632,353	0.9327	14.8571	13.3572	0.9927	178.4149	0.9854	0.4819
C7	1	339,533	0.0745	1.0805	12.7353	-2.5589	162.1885	6.5482	-1.9200
	2	366,900	0.1809	1.2208	12.8128	-1.6120	164.1690	2.5985	-1.4357
	3	372,027	0.2872	1.4030	12.8267	-1.0829	164.5248	1.1727	-1.3490
	4	382,328	0.3936	1.6491	12.8540	-0.6927	165.2262	0.4798	-1.1784
	5	401,858	0.5000	2.0000	12.9039	-0.3665	166.5094	0.1343	-0.8671
	6	476,215	0.6064	2.5405	13.0736	-0.0700	170.9197	0.0049	0.1935
	7	487,666	0.7128	3.4815	13.0974	0.2211	171.5415	0.0489	0.3420
	8	510,474	0.8191	5.5294	13.1431	0.5365	172.7409	0.2879	0.6275
	9	534,624	0.9255	13.4286	13.1893	0.9545	173.9581	0.9111	0.9163
C8	1	328,523	0.0745	1.0805	12.7024	-2.5589	161.3500	6.5482	-1.7627
	2	329,366	0.1809	1.2208	12.7049	-1.6120	161.4151	2.5985	-1.7251
	3	336,301	0.2872	1.4030	12.7258	-1.0829	161.9450	1.1727	-1.4195
	4	338,485	0.3936	1.6491	12.7322	-0.6927	162.1098	0.4798	-1.3246
	5	367,622	0.5000	2.0000	12.8148	-0.3665	164.2194	0.1343	-0.1136
	6	370,611	0.6064	2.5405	12.8229	-0.0700	164.4270	0.0049	0.0051
	7	379,999	0.7128	3.4815	12.8479	0.2211	165.0691	0.0489	0.3720
	8	382,385	0.8191	5.5294	12.8542	0.5365	165.2300	0.2879	0.4638
	9	392,154	0.9255	13.4286	12.8794	0.9545	165.8792	0.9111	0.8338

Tabla A 9 Datos de regresión lineal para estudio T-557, C9.

Sample No.	Lc	F(t)	X			Y		Y = A + BX	
			$\frac{1}{1-F(t)}$	ln(Lc)	$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	
1	298,840	0.0745	1.0805	12.6077	-2.5589	158.9532	6.5482	-2.6887	
2	344,374	0.1809	1.2208	12.7495	-1.6120	162.5493	2.5985	-1.4669	
3	359,459	0.2872	1.4030	12.7924	-1.0829	163.6444	1.1727	-1.0975	
4	380,839	0.3936	1.6491	12.8501	-0.6927	165.1259	0.4798	-0.5998	
C9 5	399,845	0.5000	2.0000	12.8988	-0.3665	166.3799	0.1343	-0.1802	
6	401,061	0.6064	2.5405	12.9019	-0.0700	166.4582	0.0049	-0.1540	
7	420,515	0.7128	3.4815	12.9492	0.2211	167.6827	0.0489	0.2540	
8	423,949	0.8191	5.5294	12.9574	0.5365	167.8934	0.2879	0.3241	
9	455,267	0.9255	13.4286	13.0286	0.9545	169.7454	0.9111	0.9381	

E) Regresión lineal y parámetros calculados de estudio T-403.

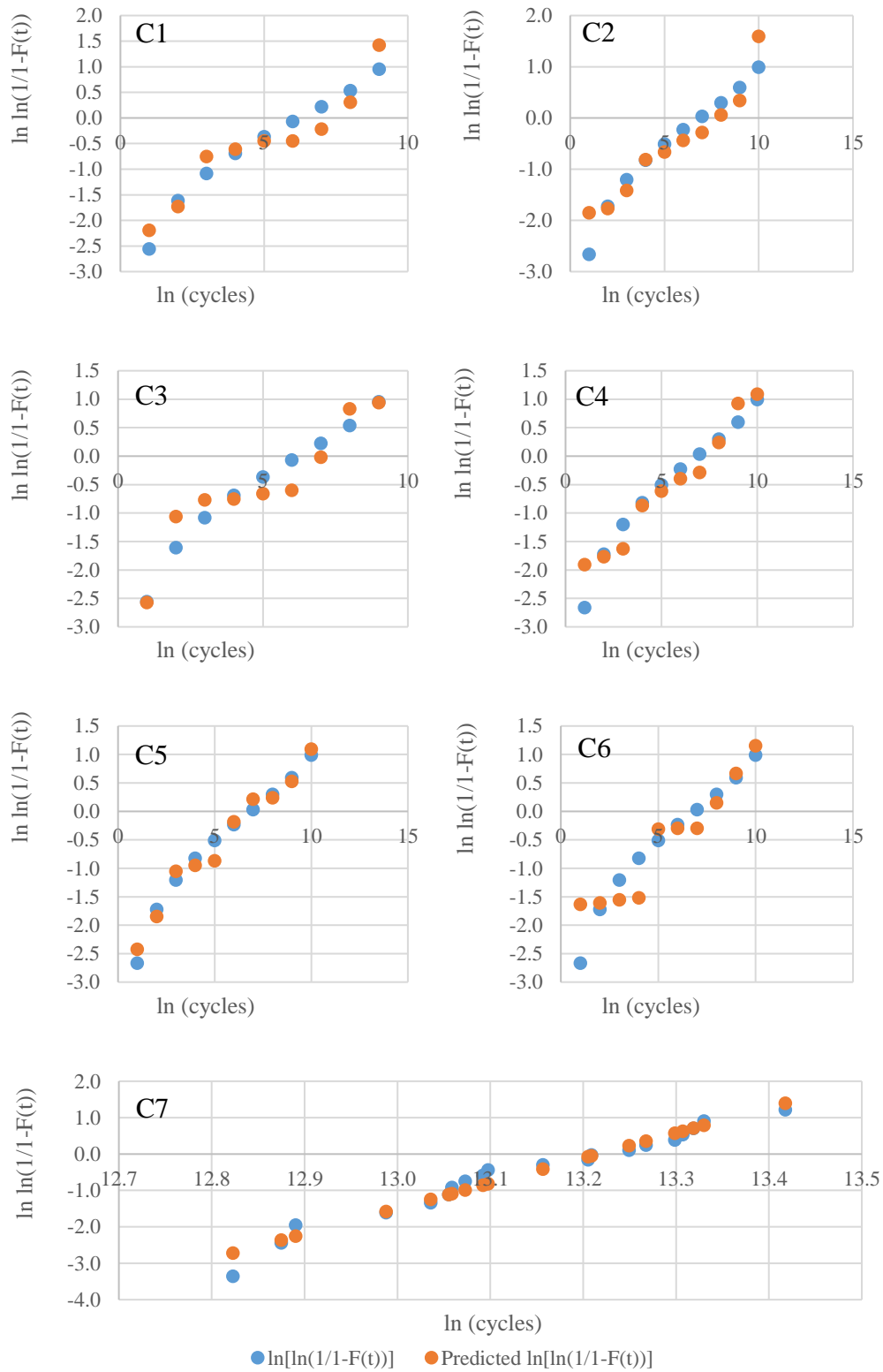


Fig. A 5 Gráficos de regresión lineal de estudio T-403 C1 a C7.

Tabla A 10 Datos de regresión lineal para estudio T-403, C1 a C4.

Sample No.	Lc	F(t)	X			Y		Y = A + BX	
			$\frac{1}{1 - F(t)}$	ln (Lc)	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$	
C1	1	319,210	0.0745	1.0805	12.6736	-2.5589	160.6203	6.5482	-2.1918
	2	338,100	0.1809	1.2208	12.7311	-1.6120	162.0808	2.5985	-1.7300
	3	381,877	0.2872	1.4030	12.8529	-1.0829	165.1959	1.1727	-0.7520
	4	388,633	0.3936	1.6491	12.8704	-0.6927	165.6470	0.4798	-0.6111
	5	396,480	0.5000	2.0000	12.8904	-0.3665	166.1619	0.1343	-0.4506
	6	396,490	0.6064	2.5405	12.8904	-0.0700	166.1626	0.0049	-0.4504
	7	408,206	0.7128	3.4815	12.9195	0.2211	166.9142	0.0489	-0.2164
	8	435,802	0.8191	5.5294	12.9849	0.5365	168.6088	0.2879	0.3090
	9	500,599	0.9255	13.4286	13.1236	0.9545	172.2278	0.9111	1.4224
	10								
C2	1	346,436	0.0673	1.0722	12.7555	-2.6638	162.7016	7.0961	-1.8506
	2	350,171	0.1635	1.1954	12.7662	-1.7233	162.9753	2.9696	-1.7661
	3	366,102	0.2596	1.3506	12.8107	-1.2020	164.1132	1.4449	-1.4153
	4	395,291	0.3558	1.5522	12.8874	-0.8217	166.0845	0.6751	-0.8106
	5	402,737	0.4519	1.8246	12.9060	-0.5086	166.5658	0.2587	-0.6635
	6	414,563	0.5481	2.2128	12.9350	-0.2304	167.3137	0.0531	-0.4353
	7	422,711	0.6442	2.8108	12.9544	0.0329	167.8176	0.0011	-0.2819
	8	441,292	0.7404	3.8519	12.9975	0.2990	168.9340	0.0894	0.0573
	9	457,519	0.8365	6.1176	13.0336	0.5940	169.8740	0.3528	0.3420
	10	536,187	0.9327	14.8571	13.1922	0.9927	174.0352	0.9854	1.5928
C3	1	340,670	0.0745	1.0805	12.7387	-2.5589	162.2737	6.5482	-2.5718
	2	424,047	0.1809	1.2208	12.9576	-1.6120	167.8994	2.5985	-1.0614
	3	442,289	0.2872	1.4030	12.9997	-1.0829	168.9927	1.1727	-0.7709
	4	443,290	0.3936	1.6491	13.0020	-0.6927	169.0515	0.4798	-0.7553
	5	449,557	0.5000	2.0000	13.0160	-0.3665	169.4167	0.1343	-0.6584
	6	453,261	0.6064	2.5405	13.0242	-0.0700	169.6304	0.0049	-0.6018
	7	493,184	0.7128	3.4815	13.1086	0.2211	171.8364	0.0489	-0.0195
	8	557,618	0.8191	5.5294	13.2314	0.5365	175.0707	0.2879	0.8276
	9	566,820	0.9255	13.4286	13.2478	0.9545	175.5041	0.9111	0.9405
	10								
C4	1	262,102	0.0673	1.0722	12.4765	-2.6638	155.6628	7.0961	-1.9075
	2	266,459	0.1635	1.1954	12.4930	-1.7233	156.0744	2.9696	-1.7701
	3	271,002	0.2596	1.3506	12.5099	-1.2020	156.4971	1.4449	-1.6293
	4	296,841	0.3558	1.5522	12.6010	-0.8217	158.7840	0.6751	-0.8703
	5	306,063	0.4519	1.8246	12.6315	-0.5086	159.5560	0.2587	-0.6154
	6	314,100	0.5481	2.2128	12.6575	-0.2304	160.2115	0.0531	-0.3994
	7	318,235	0.6442	2.8108	12.6705	0.0329	160.5427	0.0011	-0.2904
	8	339,132	0.7404	3.8519	12.7341	0.2990	162.1584	0.0894	0.2396
	9	368,165	0.8365	6.1176	12.8163	0.5940	164.2572	0.3528	0.9241
	10	375,465	0.9327	14.8571	12.8359	0.9927	164.7609	0.9854	1.0877

Tabla A 11 Datos de regresión lineal para estudio T-403, C5 a C7.

Sample No.	Lc	F(t)	X		Y		Y = A + BX		
			$\frac{1}{1-F(t)}$	ln (Lc)	$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right]$	
C5	1	432,918	0.0673	1.0722	12.9783	-2.6638	168.4364	7.0961	-2.4200
	2	457,859	0.1635	1.1954	13.0343	-1.7233	169.8934	2.9696	-1.8463
	3	494,985	0.2596	1.3506	13.1123	-1.2020	171.9320	1.4449	-1.0478
	4	499,877	0.3558	1.5522	13.1221	-0.8217	172.1900	0.6751	-0.9471
	5	503,751	0.4519	1.8246	13.1298	-0.5086	172.3926	0.2587	-0.8681
	6	538,594	0.5481	2.2128	13.1967	-0.2304	174.1533	0.0531	-0.1831
	7	559,977	0.6442	2.8108	13.2357	0.0329	175.1825	0.0011	0.2156
	8	561,418	0.7404	3.8519	13.2382	0.2990	175.2505	0.0894	0.2420
	9	577,424	0.8365	6.1176	13.2663	0.5940	175.9956	0.3528	0.5299
	10	610,111	0.9327	14.8571	13.3214	0.9927	177.4596	0.9854	1.0938
C6	1	405,036	0.0673	1.0722	12.9117	-2.6638	166.7128	7.0961	-1.6298
	2	406,069	0.1635	1.1954	12.9143	-1.7233	166.7786	2.9696	-1.6057
	3	408,293	0.2596	1.3506	12.9197	-1.2020	166.9197	1.4449	-1.5540
	4	409,808	0.3558	1.5522	12.9234	-0.8217	167.0154	0.6751	-1.5189
	5	465,642	0.4519	1.8246	13.0512	-0.5086	170.3331	0.2587	-0.3106
	6	466,382	0.5481	2.2128	13.0528	-0.2304	170.3746	0.0531	-0.2955
	7	466,434	0.6442	2.8108	13.0529	0.0329	170.3775	0.0011	-0.2945
	8	489,093	0.7404	3.8519	13.1003	0.2990	171.6181	0.0894	0.1543
	9	516,504	0.8365	6.1176	13.1548	0.5940	173.0498	0.3528	0.6702
	10	543,563	0.9327	14.8571	13.2059	0.9927	174.3958	0.9854	1.1533
C7	1	370,553	0.0343	1.0355	12.8228	-3.3548	164.4230	11.2547	-2.7200
	2	390,306	0.0833	1.0909	12.8747	-2.4417	165.7575	5.9620	-2.3609
	3	396,438	0.1324	1.1525	12.8903	-1.9521	166.1592	3.8108	-2.2530
	4	436,955	0.1814	1.2216	12.9876	-1.6088	168.6774	2.5883	-1.5800
	5	458,546	0.2304	1.2994	13.0358	-1.3399	169.9325	1.7953	-1.2465
	6	467,487	0.2794	1.3878	13.0551	-1.1157	170.4363	1.2448	-1.1129
	7	469,133	0.3284	1.4891	13.0586	-0.9210	170.5281	0.8482	-1.0886
	8	475,799	0.3775	1.6063	13.0728	-0.7467	170.8968	0.5575	-0.9910
	9	485,008	0.4265	1.7436	13.0919	-0.5871	171.3984	0.3447	-0.8584
	10	487,695	0.4755	1.9065	13.0974	-0.4381	171.5431	0.1919	-0.8202
11	517,380	0.5245	2.1031	13.1565	-0.2965	173.0944	0.0879	-0.4116	
12	543,196	0.5735	2.3448	13.2052	-0.1599	174.3780	0.0256	-0.0748	
13	545,113	0.6225	2.6494	13.2087	-0.0260	174.4710	0.0007	-0.0504	
14	567,742	0.6716	3.0448	13.2494	0.1074	175.5472	0.0115	0.2309	
15	578,165	0.7206	3.5789	13.2676	0.2430	176.0296	0.0590	0.3567	
16	596,327	0.7696	4.3404	13.2985	0.3839	176.8513	0.1474	0.5706	
17	601,461	0.8186	5.5135	13.3071	0.5349	177.0794	0.2861	0.6299	
18	608,487	0.8676	7.5556	13.3187	0.7042	177.3886	0.4959	0.7102	
19	615,312	0.9167	12.0000	13.3299	0.9102	177.6858	0.8285	0.7874	
20	671,698	0.9657	29.1429	13.4176	1.2156	180.0310	1.4776	1.3938	

F) Regresión lineal y parámetros calculados de estudio T-457.

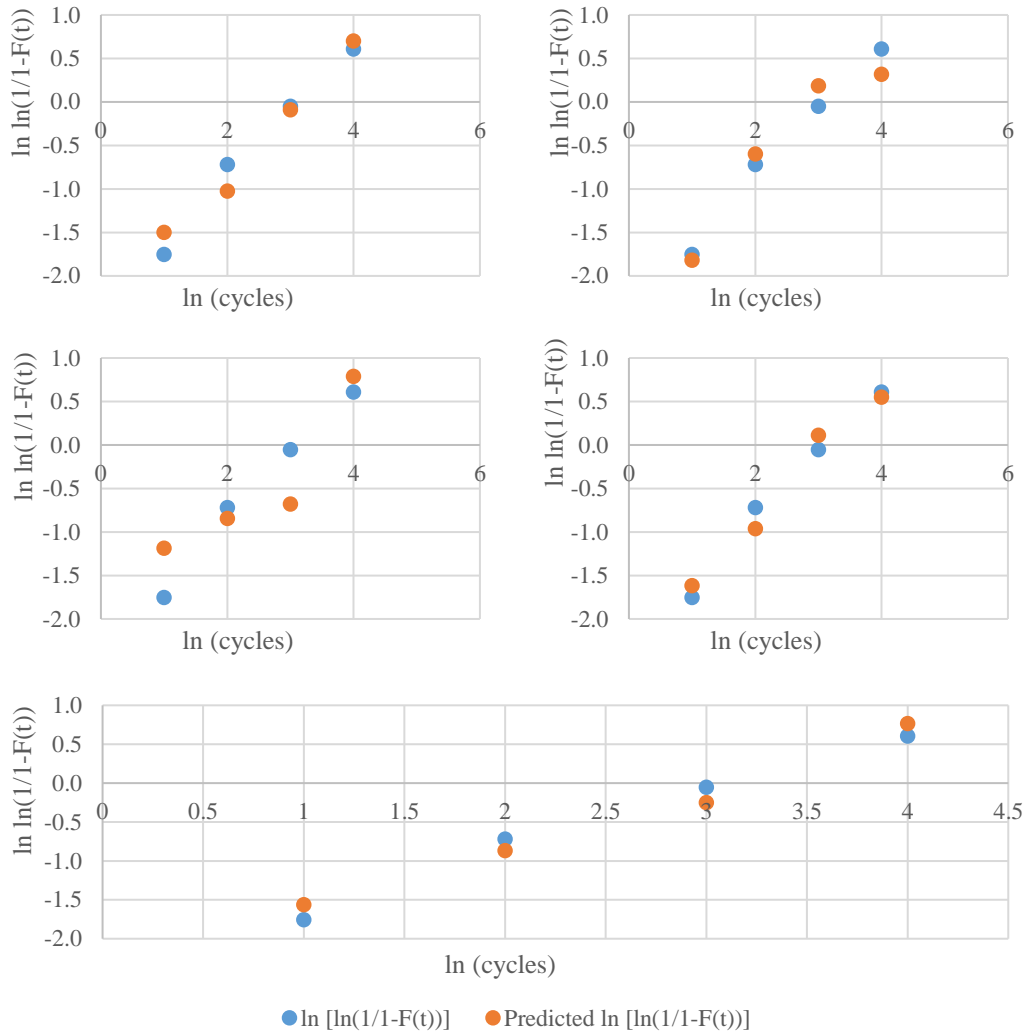


Fig. A 6 Gráficos de regresión lineal de estudio T-457 U1-1, 4, 5, 8 y C3.

Tabla A 12 Datos de regresión lineal para estudio T-457, U1-1, 4, 5 y 8, C3.

Sample No.	Lc	F(t)	$\frac{1}{1-F(t)}$	X		Y		Y = A + BX	
				ln(Lc)	$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	x^2	y^2	Predicted $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$	
U1-1	1	422521	0.1591	1.1892	12.9540	-1.7529	167.8060	3.0726	-1.4994
	2	430165	0.3864	1.6296	12.9719	-0.7167	168.2708	0.5137	-1.0221
	3	445491	0.6136	2.5882	13.0069	-0.0503	169.1803	0.0025	-0.0902
	4	458925	0.8409	6.2857	13.0366	0.6088	169.9540	0.3707	0.7007
U1-4	1	288691	0.1591	1.1892	12.5731	-1.7529	158.0832	3.0726	-1.8183
	2	396178	0.3864	1.6296	12.8896	-0.7167	166.1423	0.5137	-0.5982
	3	485697	0.6136	2.5882	13.0933	-0.0503	171.4356	0.0025	0.1871
	4	502532	0.8409	6.2857	13.1274	0.6088	172.3290	0.3707	0.3184
U1-5	1	434944	0.1591	1.1892	12.9830	-1.7529	168.5576	3.0726	-1.1856
	2	458690	0.3864	1.6296	13.0361	-0.7167	169.9407	0.5137	-0.8416
	3	470608	0.6136	2.5882	13.0618	-0.0503	170.6101	0.0025	-0.6757
	4	590409	0.8409	6.2857	13.2886	0.6088	176.5861	0.3707	0.7918
U1-8	1	401178	0.1591	1.1892	12.9022	-1.7529	166.4657	3.0726	-1.6172
	2	445283	0.3864	1.6296	13.0065	-0.7167	169.1681	0.5137	-0.9590
	3	527723	0.6136	2.5882	13.1763	-0.0503	173.6156	0.0025	0.1128
	4	565786	0.8409	6.2857	13.2460	0.6088	175.4558	0.3707	0.5523
U3	1	369313	0.1591	1.1892	12.8194	-1.7529	164.3370	3.0726	-1.5608
	2	419564	0.3864	1.6296	12.9470	-0.7167	167.6241	0.5137	-0.8673
	3	470132	0.6136	2.5882	13.0608	-0.0503	170.5837	0.0025	-0.2486
	4	566559	0.8409	6.2857	13.2473	0.6088	175.4919	0.3707	0.7656

G) Aumento de temperatura en el conductor.

Una aproximación muy general del incremento de temperatura por acción de la corriente está dada por la siguiente ecuación.

$$P = i^2 R \quad \text{si se considera el tiempo entonces: } Q = i^2 R \cdot t$$

Donde P es la potencia disipada por una resistencia, i es la corriente y R es el valor de la resistencia, Q representará el calor disipado considerando el tiempo de exposición a la corriente indicada, se toman 2.5 días de prueba, considerando una resistencia de 1.7Ω y una corriente de 0.1191 A , se obtiene un flujo de calor de $Q = 312,519.73 \text{ J}$, considerando este flujo de calor en la ecuación de la primera ley de la termodinámica:

$$Q = C_e m (T_f - T_i)$$

Tomando una temperatura inicial (T_i) de 85°C , una capacidad calorífica del cobre ETP de $386 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$, y una masa del conductor de 0.26184 gramos, se obtiene una temperatura final de la superficie del conductor de 88.09°C .