

**PATRÓN DE FRACTURA DE ESTRUCTURAS TRILOR® CON VOLADIZOS CORTOS: EVALUACIÓN
CON SEM**

AUTORES

DANIELA VANESSA RODRÍGUEZ DE ARCO
JUAN JOSÉ MARTÍNEZ BETANCOURT

**COLEGIO ODONTOLÓGICO
INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA COLEGIOS DE COLOMBIA - UNICOC
ESPECIALIZACIÓN EN REHABILITACIÓN ORAL**

**SANTIAGO DE CALI
24 DE JUNIO DE 2026**



**PATRÓN DE FRACTURA DE PRÓTESIS HÍBRIDA TRILOR® CON VOLADIZOS CORTOS:
EVALUACIÓN CON SEM.**

AUTORES

DANIELA VANESSA RODRÍGUEZ DE ARCO
JUAN JOSÉ MARTÍNEZ BETANCOURT

DIRECTOR

GLORIA JUDITH HERRERA LARA.
ESPECIALISTA EN REHABILITACIÓN ORAL.

ASESOR METODOLÓGICO

ALEJANDRA ORDOÑEZ.
Magister en Epidemiología.

ASESOR ESTADÍSTICO

JULIÁN ANDRÉS TAMAYO.
Magister en Logística.

**COLEGIO ODONTOLÓGICO
INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA COLEGIOS DE COLOMBIA - UNICOC
ESPECIALIZACIÓN EN REHABILITACIÓN ORAL**



Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, 24 de junio de 2026

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a nuestras familias y a nuestra tutora la Dra. Gloria Herrera que creyó en nosotros desde el primer minuto.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos:

A nuestras familias que han sido nuestro apoyo incondicional, a las personas que conocimos en el camino y nos motivan a seguir adelante y a nuestra tutora la Dra. Gloria Herrera, que siempre nos ha llevado por el mejor camino siendo una madre para nosotros y nuestros más profundos agradecimientos a UNICOC, por forjarnos con disciplina, estudio y dejarnos esa marca en el corazón de cada uno, gracias a todo el equipo UNICOC, desde sus directrices, docentes, estudiantes y todo el personal que esta gran institución tiene.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
2.1	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	15
3.	MARCO TEÓRICO	16
4.	OBJETIVOS	28
4.1	OBJETIVO GENERAL	28
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
5.	METODOLOGÍA	29
5.1	DISEÑO DEL ESTUDIO	30
5.2	POBLACIÓN OBJETIVO	30
5.2.1	Criterios de selección	31
5.3	TAMAÑO DE MUESTRA Y DISEÑO DE MUESTREO	31
5.3.1	Cálculo del tamaño de muestra.	31
5.4	DEFINICIÓN DE VARIABLES	32
5.4.1	Variables.	32
5.4.2	Cuadro operacional de las variables	32
5.5	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	32
5.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	34
5.7	CONSIDERACIONES ÉTICAS	35
6.	RESULTADOS	36
7.	DISCUSIÓN	56
8.	CONCLUSIONES	59
9.	RECOMENDACIONES	59

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	60
ANEXOS	65

Tabla 1 Características del Trilor®.	15
Tabla 2 Tabla de Resistencia a la Carga (Newton - N)	17
Tabla 3. Tipo de variable, descripción y método de evaluación.	32
Tabla 4. Modos de falla	32
Tabla 5. Tipo de fallo voladizos 7 mm	49
Tabla 6. Tipo de fallo voladizos 10 mm	49

LISTA DE TABLAS

LISTA DE GRÁFICOS

Ilustración 1 Tipos de fallo	17
Ilustración 2 Fig 2. Microscopio electrónico de barrido (FEI, modelo Quanta 250), Universidad de Caldas	28
Ilustración 3 Fig 3. Estructura TRILOR con revestimiento acrílico de termocurado fracturada.	29
Ilustración 4 Fig 5. Falla cohesiva, como se señala las líneas de fractura son Grietas dentro del espesor de la supraestructura	30
Ilustración 5 Fig 6. Fallo mixto se observa desprendimiento del material además de grietas en la estructura	31
Ilustración 6 Fig 7. Fallo Cohesivo, se observan grietas en la estructura.	32
Ilustración 7 Fig 8. Se observa fallo Mixto, desprendimiento de la estructura y grietas en la superficie.	33

GLOSARIO

Baño/Metalizado en oro: Proceso de recubrir una muestra no conductora (como un polímero) con una fina capa de oro para que pueda ser observada en un SEM sin que se cargue electrostáticamente.

Edentulismo: Ausencia parcial o total de los dientes.

Estructura protésica: Esqueleto o marco de una prótesis (un reemplazo artificial) que proporciona soporte y estabilidad a las demás partes.

Fotogrametría: Técnica para obtener mediciones e información morfológica de objetos a través de fotografías. En este contexto, se usa para documentar y analizar patrones de fractura.

Fractura dúctil: Tipo de fractura donde el material sufre una deformación plástica significativa (se estira o dobla) antes de romperse.

Matriz resinosa termoendurecible: Resina que, al aplicarle calor, se endurece de forma permanente formando una estructura rígida e insoluble.

Mesoestructura: Marco o estructura intermedia que proporciona soporte y distribución de cargas entre los implantes y la parte estética de la prótesis.

Microscopio Electrónico de Barrido (SEM - Scanning Electron Microscopy): Microscopio que utiliza un haz de electrones para obtener imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra, permitiendo ver detalles a nivel micrométrico y nanométrico.

Módulo de elasticidad (o Módulo de Young): Medida de la rigidez de un material. Indica cuánto se deforma un material bajo una carga aplicada. Un valor similar al del hueso es deseable para una mejor distribución de las fuerzas.

Patrón de fractura: Característica visual (grieta, astillamiento, desprendimiento) que muestra cómo se rompe un material bajo carga, lo que revela información sobre su comportamiento y posibles puntos débiles.

Polímero reforzado con fibra: Material compuesto formado por una matriz de plástico (polímero) fortalecida con fibras (como vidrio o carbono) que le confieren alta resistencia y rigidez.

Prótesis híbrida implantosoportada: Prótesis dental fija que se sujeta sobre implantes y combina una estructura rígida (usualmente metálica o de polímero) con dientes y encía artificiales hechos de acrílico o cerámica.

Resistencia flexural: Capacidad de un material para resistir fuerzas de flexión o doblamiento sin fracturarse.

Tecnopolímero: Término comercial o técnico para referirse a polímeros de alto rendimiento utilizados en aplicaciones técnicas y médicas, como el Trilor®.

Tenacidad a la fractura: Capacidad de un material que contiene una grieta para resistir la fractura frágil. Es una medida de la energía absorbida antes de la fractura.

Trilor®: Marca comercial de un tecnopolímero reforzado con fibra de vidrio utilizado para fabricar estructuras de prótesis dentales.

Voladizo (Cantilever): Parte de una prótesis dental que se extiende más allá de su último punto de soporte (el último implante). Es una zona de alta tensión mecánica.

1. INTRODUCCIÓN

El TriLor® es un material compuesto reforzado con fibra de vidrio en el campo de la odontología protésica (1). Desarrollado con una matriz de resina termoendurecible y un refuerzo multidireccional de fibra de vidrio, este material contiene una combinación única de propiedades mecánicas y estéticas, que otorgan menos peso, un módulo elástico muy similar al del hueso cortical según estudios y una mejor estética. (1,2).

Al explorar nuevas alternativas en el campo de la odontología protésica, se encuentra el material TriLor® que puede convertirse en una opción a los materiales tradicionales (3). Buscar un material que no solo sea duradero y ligero, sino que también sea compatible con los tejidos del cuerpo, mejorando así la calidad y la duración de las prótesis dentales y, por ende, la experiencia del paciente es una opción viable a largo plazo (4). TriLor® ha sido sometido a estudios científicos para validar su uso en prótesis y rehabilitación oral, centrándose especialmente en su comportamiento físico y químico bajo condiciones bucales simuladas (5).

Un estudio anterior de Quintana y colaboradores, (2024) se evaluó la Resistencia flexural de una estructura para prótesis híbrida fabricada con polímero reforzado con fibra de vidrio TriLor® (2). Para ello, se sometieron a prueba diferentes diseños de estas prótesis, variando la longitud del voladizo distal, evaluando la resistencia en esta zona. (2) En la continuación del mismo estudio de Panesso y colaboradores (2024) evaluaron las propiedades mecánicas de una prótesis híbrida fabricada con polímero reforzado con fibra de vidrio TriLor® ((6), donde se utilizaron 4 estructuras de TriLor® con su enfilado, las mismas se sometieron a ciclos de envejecimiento (termociclado) semejantes a 1 año en un medio con saliva artificial utilizando una fuerza aproximada de 900 N, en el laboratorio químico de la facultad la Universidad Nacional. (6) El proceso de termociclado se realiza con saliva artificial a 37C° con un pH de 7, las muestras fueron sometidas a

5.000 ciclos para simular 1 año en boca (7), después fueron sometidas a un proceso de prueba de esfuerzo realizada con maquina universal Instron.

El soporte fue el mismo utilizado por Quintana y colaboradores, (2024) para las pruebas de flexión realizada a estructuras de TriLor® sin revestimiento acrílico que se llevaron a cabo en la primera fase de esta línea de investigación (2). En la parte superior de la máquina, se instaló la punta diseñada, la cual se ubicó en el surco central del último molar, desde mesial hasta distal, la prueba para el voladizo de 7 mm fue seguida de la vía de acceso del último implante ubicado en zona de molares y para el de 10 mm fue ubicado entre el implante y el final del voladizo. la prueba se realizó entre los implantes que se encontraban en zona de 32-33, 42-43, específicamente entre zona de 31-41 (6).

El presente estudio hace parte de la misma línea de investigación. La muestra del presente estudio consistió en 10 estructuras de TriLor® 6 estructuras sin revestimiento acrílico (2) y 4 revestidas con acrílico (6), las cuales fueron observadas bajo un Microscopio Electrónico de Barrido (FEI – modelo QUANTA 250) de la Universidad de Caldas, Manizales, y solo una de las estructuras utilizada para la prueba piloto se le aplico un Sistema de Recubrimiento de Muestras (oro) Mini Sputter Coater SC7620. (8).

Este estudio se centró en analizar a nivel microscópico cómo es el patrón de fractura de las prótesis híbridas con voladizos cortos fabricadas con el polímero reforzado con fibra de vidrio TriLor®. Por lo tanto, se evaluó el tipo de fractura presente en las estructuras, una de las estructuras, exactamente la estructura con revestimiento acrílico 10 mm B, se le realizó un baño metalizado en oro para ser observados bajo un Microscopio Electrónico de Barrido (FEI – modelo QUANTA 250) de la Universidad de Caldas, Manizales, este baño tiene como finalidad principal hacer que las muestras no conductoras sean conductoras de electricidad. Esto evita la acumulación de electrones, previene la carga de la muestra y mejora la emisión de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución y

contraste de superficies (9–11). En esta tercera etapa de la línea de investigación se evaluó el patrón de fractura de las prótesis híbridas TriLor® con voladizos cortos mediante análisis por microscopio electrónico de barrido. (2)

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Durante muchos años se ha desarrollado desde el campo de la odontología tratamientos para restaurar tanto la función como la apariencia estética comprometidas por el edentulismo, además de una estructura que no proporcione tanto peso. (12).

Tradicionalmente se han utilizado materiales como el cobalto-cromo y el titanio, empleados en la confección de prótesis dentales (13). Sin embargo, estos materiales presentan inconvenientes como el riesgo de reacciones alérgicas, mayor peso específico y discordancias estéticas con los dientes naturales (14). Asimismo, su elevada dureza puede dificultar la adecuada distribución de las fuerzas masticatorias y su distinta conductividad térmica puede generar molestias térmicas para el paciente (15). Por su parte, los polímeros de alto rendimiento, como Trinia® y TriLor® son polímeros de alto rendimiento, tiene un módulo de elasticidad 18 GPa y 26 GPa, respectivamente lo que le otorga la capacidad de soportar y absorber las fuerzas distribuyéndolas de forma uniforme (5). Estos valores son cercanos al módulo de elasticidad del hueso cortical, lo que crea un entorno menos rígido para el conjunto implante pilar prótesis (16).

Las prótesis híbridas implantoportadas de arcada completa en voladizo se han convertido en un tratamiento protésico alternativo con altas tasas de supervivencia en las difíciles situaciones de pacientes edéntulos con espacios protésicos aumentados, pérdida ósea alveolar intensa y falta de soporte adecuado para los tejidos blandos (16,17). La tensión generada durante la función se transfiere al marco del implante o a la interfaz implante-hueso, y puede provocar complicaciones mecánicas o biológicas (16,18).

Estudios previos como el de Gustavo Quintana y colaboradores (2024) (2) el de Panesso y colaboradores (2024) (6), han demostrado que el diseño de los voladizos y la elección del material influyen significativamente en la resistencia de

estas prótesis, concluyendo que los voladizos de 7mm presentan mayor resistencia flexural comparado con los voladizos de 10mm (2). No obstante, aún existen brechas en el conocimiento sobre el mecanismo de fractura específico del TriLor® y cómo este se ve afectado por la longitud del voladizo (5). La integridad estructural del material TriLor® depende de sus propiedades mecánicas, específicamente de su resistencia a los esfuerzos de compresión, flexión y tracción, los cuales permiten disipar de manera eficiente las fuerzas masticatorias. (2).

Sin embargo, evidencia encontrada no analiza los patrones de fractura en entornos controlados y por lo tanto dificulta la optimización de estos materiales para mejorar su desempeño clínico (14). De esta manera, es fundamental investigar y caracterizar el comportamiento de fractura de las prótesis híbridas de TriLor® mediante técnicas microscópicas, con el fin de proporcionar información valiosa que guíe su desarrollo y aplicación en el ámbito médico (5). El patrón de fractura de estos dispositivos es crucial para entender su rendimiento y la posible necesidad de ajustes en su diseño. La evaluación al microscopio de estas fracturas permite identificar los modos de fallo, ya sea por estrés excesivo, fatiga del material o defectos de fabricación. Sin embargo, existen limitaciones en la comprensión de cómo estas variables influyen en la integridad estructural de las prótesis (19).

Aunque los experimentos IN VITRO no recrean la complejidad dinámica del sistema estomatognático, ofrecen valiosos datos sobre las propiedades y características intrínsecas de nuevos materiales o técnicas. Estos hallazgos constituyen un pilar fundamental para evaluar su eficacia en estudios clínicos más rigurosos (20).

2.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Existe variación en el patrón de fractura microscópico, evaluado mediante SEM, en prótesis híbridas con estructura de TriLor® con voladizos cortos?

3. MARCO TEÓRICO

TriLor® se ha consolidado como una opción en odontología por su combinación de propiedades mecánicas, biocompatibilidad y facilidad de uso en la fabricación de diversas estructuras protésicas, debido a su alta resistencia, flexibilidad similar al hueso y facilidad de manejo (1). Se trata de un tecno polímero reforzado con fibra de vidrio, que permite crear estructuras ligeras y duraderas sin necesidad de usar metal (1,2).

Este material presenta una serie de características que lo distinguen de otros materiales dentales. *Ver tabla 1.*

Tabla 1 Características del TriLor®.

Característica	Ventajas	Desventajas	Usos	Contraindicaciones
Composición	Material compuesto resistente, biocompatible (5)	Puede ser más costoso que otros materiales	Prótesis fijas, removibles ((5)	No recomendado para pacientes alérgicos a alguno de sus componentes
Propiedades mecánicas	Alta resistencia a la flexión y fractura (2)	Menor módulo de elasticidad que el metal	Estructuras protésicas que requieren alta resistencia (5)	No indicado para casos con cargas oclusales extremadamente altas
Estética	Aspecto natural y translúcido (21)	Puede ser más sensible a la tinción que otros materiales	Restauraciones estéticas ((1)	No recomendado en zonas con alta probabilidad de tinción (café, vino)
Biocompatibilidad	Excelente biocompatibilidad,	Puede requerir técnicas	Prótesis implantosoportadas (1)	No contraindicaciones

	menor riesgo de reacciones alérgicas (5)	de cementación específicas (5)		específicas, salvo alergias
Procesamiento	Fácil de procesar y personalizar (1)	Requiere equipos y técnicas específicas (2)	Laboratorio dental especializado ((1)	No es un material de uso universal, requiere capacitación del odontólogo ((2)

Con las características ya mencionadas. Debido a estas propiedades, TriLor® se emplea en tratamientos de restauración dental que emplean tecnologías de diseño asistido por ordenador (CAD) y fresado asistido por ordenador (CAM) (1,2,5)

Respecto a la resistencia, como ya se había mencionado en el estudio anterior de las estructuras sin revestimiento acrílico de Gustavo Quintana y colaboradores (2), se evaluó la resistencia flexural de los voladizos de este material donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Los resultados de la resistencia flexural para las estructuras probadas con el polímero reforzado con fibra de vidrio TriLor® fueron los siguientes:

1. Voladizo de 7 mm:

- Resistencia en la zona central: 490 MPa (IQR: 457,8 - 504)
- Resistencia en el lado izquierdo: 239,1 MPa (IQR: 219 - 273,2)
- Resistencia en el lado derecho: 208,3 MPa (IQR: 206,1 - 228,2)

2. Voladizo de 10 mm:

- Resistencia en la zona central: 394,5 MPa (IQR: 388,3 - 434,1)
- Resistencia en el lado izquierdo: 193,5 MPa (IQR: 182,4 - 209,9)
- Resistencia en el lado derecho: 163,9 MPa (IQR: 162,4 - 166,9) (2)

Los resultados revelaron una mayor resistencia a la flexión en la zona central de las muestras con un voladizo de 7 mm, alcanzando un valor máximo de 490 MPa, en comparación con los 394,5 MPa obtenidos en las muestras con un voladizo de 10 mm (2,12).

Los resultados del estudio de Panesso y colaboradores (2024) (6) se dividen en fallas.

Durante la prueba se observaron 4 tipos de fallas:

Falla 1: Fractura superficial del diente.

Falla 2: Fractura completa del diente.

Falla 3: Fractura de recubrimiento acrílico.

Falla 4: Fractura de la barra.

Tabla 2 Tabla de Resistencia a la Carga (Newton - N)

Prótesis	Dimensión	Ubicación	Falla 1	Falla 2	Falla 3	Falla 4
A	7 mm	Centro	892	1088	2540	1552
		Vol. Izq.	1395*	1395*	1395*	1395*
		Vol. Der.	1866	1866	1120	630
B	7 mm	Centro	1142	696	1458	1201
		Vol. Izq.	1021	848.7	750	465
		Vol. Der.	1550*	1550*	1322*	1322*
A	10 mm	Centro	504*	504*	1736	1762
		Vol. Izq.	235	997*	997*	997*
		Vol. Der.	1800	1530	1624	1670
B	10 mm	Centro	1100	1007	2115	985
		Vol. Izq.	1389*	1389*	1389*	1389*
		Vol. Der.	828*	828*	828*	828*

3.1 Tipos de fallos.

Existen diversos factores que afectan el patrón de fractura de un material, entre los cuales se encuentra, la calidad, donde las fibras de vidrio y las de resina utilizada en la fabricación, influye directamente en la resistencia y durabilidad (15). Las fuerzas oclusales excesivas o una oclusión desbalanceada pueden acelerar el desgaste y la fractura del material (5,13).

Otro aspecto importante es el diseño de la prótesis y las técnicas de cementación, si estos aspectos son inadecuados o deficientes puede concentrar las tensiones en determinadas áreas aumentando el riesgo de fractura (14).

Es importante que para poder entender qué tipos de fallos se pueden presentar en estos materiales, se debe conocer qué mecanismos de uniones adhesivas existen. (14,17).

3.2 Unión Adhesiva

El mecanismo de una unión adhesiva depende de la resistencia de la unión entre el sustrato y el adhesivo (adhesión) y de las fuerzas internas del adhesivo (cohesión) (18). Además, la función principal de una unión adhesiva estructural es transmitir una carga externa a los demás miembros estructurales. Si la unión no es capaz de transmitir la carga de manera adecuada, sufrirá un daño que posiblemente, desembocará en el fallo de la unión. Así, las uniones por adhesivo pueden fracasar adhesiva o cohesivamente (19).

La evaluación de la unión adhesiva una vez producida la fractura puede desvelar fallos que hayan sido producidos por un tratamiento inadecuado de las superficies a unir, por una falta de cohesión por un curado inadecuado o que el adhesivo no haya alcanzado las propiedades mecánicas deseadas (22). Es decir, estas uniones adhesivas pueden fallar o romperse de diferentes maneras, dependiendo

de factores como el tipo de adhesivo, las propiedades de los sustratos, y las condiciones de carga y ambiente (19)..

Estos modos de fallo que se pueden presentar en las uniones adhesivas se pueden resumir en tres posibles tipos (7):

1. **Fallo por cohesión:** Cuando se produce la ruptura del adhesivo.
2. **Fallo por adhesión:** Cuando la separación se produce en la interfase sustrato-adhesivo.
3. **Rotura del sustrato:** Cuando el propio sustrato rompe antes que la unión adhesiva o que la interfase sustrato-adhesivo.

Cuando se diseña una unión adhesiva se pretende que la rotura no sea en ningún caso. Ver imagen 1.



Imagen 1. Tipo de fallos (imagen generada con IA) ((23))

La rotura del sustrato se produce cuando se ha sobredimensionado la zona de unión, este fallo se considera un defecto de diseño, ya que se ha utilizado una cantidad de adhesivo superior a la mecánicamente necesaria (7).

En el diseño de una unión adhesiva se debe evitar la ruptura por adhesión, Es preferible una ruptura por cohesión, ya que es posible conocer las propiedades

mecánicas del adhesivo, y de esta forma predecir las cargas a la rotura en modo cohesivo para diferentes tipos de esfuerzo (24).

El adhesivo utilizado en una estructura TriLor® no es un adhesivo tradicional, es una matriz resinosa termoendurecible que, junto con el refuerzo de fibra de vidrio, forma un material compuesto. En otras palabras, el "adhesivo" es la propia resina que une las fibras de vidrio y permite que el material actúe como una sola pieza con propiedades mecánicas específicas (5).

El material TriLor® es un tecnopolímero, no un adhesivo en sí mismo, aunque la resina que lo compone actúa como adhesivo interno, como matriz, ligando las fibras y permitiendo que el material composite resultante tenga las propiedades mecánicas deseadas (2).

En ese sentido, las estructuras TriLor® pueden presentar fallos en sus uniones adhesivas que están directamente relacionados con los mecanismos mencionados anteriormente, pero con particularidades propias de su naturaleza compuesta.

En cuanto a fallas de tipo cohesivas en el adhesivo que se presentan en una estructura TriLor®, pueden ser debido a uso de adhesivos no optimizados para composites o por degradación del adhesivo por exposición a UV o humedad (20).

Por lo que es importante usar adhesivos con alta resistencia cohesiva y compatibles con polímeros y proteger la unión de factores ambientales (recubrimientos, sellantes) (19).

Según investigaciones como la de Khosroabadi y col (25) informan que el PEEK, tiene una baja energía superficial, debido a que es un material inherente e hidrofóbico el desafío real, es la tensión superficial de los cementos de resina la cual a menudo es más alta que la energía superficial de estos polímeros, lo que provoca que el cemento no se una debidamente al material, y cause un fracaso en la adhesión, debido a que no tiene la capacidad de penetrar la estructura y generar microentenciones (26).

No obstante, TriLor® no esta tan alejado de esta realidad, al ser una estructura en fibra de vidrio comparte esta similitud con el PEEK, estructuras completamente lisas, que no tienen la capacidad de retener el cemento para su unión con otros materiales. (26)

Solución clínica: No es tan sencilla, la idea es crear microrentenciones en la superficie usando el arenado lo cual es vital, pero no suficiente. Se suele requerir una silanización o el uso de primers específicos para polímeros que contengan monómeros que ensanchen ligeramente la superficie para permitir el entrelazamiento de las cadenas poliméricas. (25,26)

Relacionado con las fallas de tipo adhesivas (interfaz adhesivo-TriLor®), pueden ser causadas por una baja energía superficial del polímero (dificulta la adhesión) o contaminantes en la superficie (19). Es importante realizar un Pretratamiento superficial: Limpieza con solventes (acetona), abrasión (lijado) o plasma y uso de primers (aumentan la humectación del adhesivo) (22).

3.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM *Scanning Electron Microscopy*)

Un análisis por microscopía proporciona imágenes detalladas de la morfología de la fractura en 3D y detecta características como grietas, poros, fractura frágil/dúctil y patrones de propagación (8). Para ello es necesario la preparación de la muestra, la zona fracturada debe cortarse y limpiarse para eliminar contaminantes. Y realiza un recubrimiento conductor (para SEM), se aplica una capa delgada de oro o carbono para evitar carga electrostática (27).

El microscopio electrónico de barrido (SEM, por *Scanning Electron Microscope*) es un instrumento de caracterización microestructural que emplea un haz de electrones de alta energía para examinar la superficie de una muestra (8). A

diferencia de la microscopía óptica, basada en la luz visible, el SEM permite alcanzar resoluciones nanométricas y grandes profundidades de campo, lo que facilita la obtención de imágenes detalladas y con apariencia tridimensional de estructuras superficiales. (11)

Características técnicas

- **Fuente de electrones:** Utiliza un cañón de electrones (de tungsteno, hexaboruro de lantano o emisión de campo) para generar un haz primario que es focalizado mediante lentes electromagnéticas (11).
- **Sistema de barrido:** El haz se desplaza de forma controlada sobre la superficie de la muestra, interactuando con ella y generando diversas señales (10).
- **Detección de señales:** Electrones secundarios (SE) para topografía, electrones retrodispersados (BSE) para contraste composicional, y rayos X para análisis elemental mediante espectroscopía de energía dispersiva (EDS) (10).
- **Preparación de muestras:** Generalmente requieren deshidratación, fijación y recubrimiento metálico (oro, carbono) para evitar efectos de carga electrostática, salvo en equipos de baja presión o ambiental (28).

Ventajas principales

- Resolución superior a la microscopía óptica, típicamente entre 1 y 20 nm.
- Profundidad de campo excepcional, ideal para superficies irregulares.
- Capacidad de realizar análisis elemental *in situ* con EDS.
- Amplio rango de aumentos, desde 10x hasta más de 500,000x (9).

Aplicaciones representativas

- **Ciencia de materiales:** Estudio de fracturas, microestructuras de aleaciones, cerámicas y composites.
- **Biología y medicina:** Análisis ultraestructural de células, tejidos, bacterias y partículas virales.
- **Geología:** Caracterización de minerales, texturas de rocas y microfósiles.
- **Industria electrónica:** Inspección de circuitos integrados y control de calidad de soldaduras.
- **Ciencias forenses y conservación:** Identificación de fibras, pigmentos y degradación de materiales.

3.4 FOTOGRAMA

Un fotograma (o análisis fotogramétrico) es una herramienta clave para determinar el tipo de falla de las estructuras en estudio ya que permite documentar, analizar y cuantificar visualmente los modos de fallo con alta precisión (27). El análisis fotogramétrico permite documentar visualmente la superficie, capturando imágenes de alta resolución de la zona fracturada y además también permite identificar patrones de grietas, zonas de delaminación o áreas con residuos de adhesivo (17).

Es la captura de una imagen estática obtenida mediante microscopía (generalmente electrónica de barrido, SEM) para analizar la superficie de fractura o la interfase entre materiales (17).

En estructuras de TriLor® (un polímero de alto rendimiento reforzado con fibra de vidrio multidireccional), este análisis es vital para entender por qué falló la unión entre el chasis de fibra y el material estético (acrílico) (20).

Al ser el TriLor® un material anisotrópico, lo que significa que sus propiedades varían según la dirección de sus fibras, con un fotograma en microscópico tras una fractura, lo que se buscó fue identificar dónde ocurrió la ruptura exactamente:

Si la falla es Adhesiva, ocurre cuando la fractura se localiza exactamente en la interfase entre el TriLor® y el material de recubrimiento. En el fotograma se verá la superficie del TriLor® "limpia", mostrando la trama de las fibras de vidrio sin restos de resina adherida. Esto indica una preparación deficiente de la superficie (falta de arenado, silanización incorrecta o fallo en el agente de unión) (20).

Si la falla es cohesiva la fractura ocurre dentro de uno de los materiales, no en la unión. El TriLor® se deslaminan o sus fibras se rompen(20), el composite se rompe, pero sigue pegado firmemente al TriLor®. En el fotograma se verá restos de material sobre toda la superficie. Esto significa que la unión fue más fuerte que el material mismo; sugiere que el diseño estructural o el espesor del material eran insuficientes para la carga masticatoria (20).

Si la falla es mixta presenta zonas de desprendimiento limpio (adhesivo) y zonas donde el material se desgarró (cohesivo). En el fotograma se observan áreas de fibras expuestas junto con "islas" de resina o composite pegadas. Esto significa que permite evaluar qué áreas de la prótesis están bajo mayor tensión mecánica(20).

Además, en cuanto a medición de parámetros críticos, un fotograma calcula la proporción de falla adhesiva vs. cohesiva e identifica el origen de la fractura (7).

Las ventajas de usar fotogrametría en TriLor® es que se preserva la muestra para análisis adicionales (microscopía, espectroscopía). También proporciona datos métricos (rugosidad post-fractura) (29).

Las recomendaciones para tener en cuenta es la importancia de una iluminación controlada, es decir, usar luz polarizada para resaltar texturas, además de tener marcadores de referencia que facilitan la medición de deformaciones y la

integración con SEM/EDS qué es combinar con microscopía electrónica para analizar composición química en zonas críticas (27,29).

En un estudio publicado por Haroyan y cols se evaluó la resistencia y el patrón de fractura (2023). Los materiales utilizados incluyeron estructuras de prótesis híbridas fabricadas de cobalto-cromo (Co-Cr) y de fibra de carbono (15). Las muestras de Co-Cr se mecanizaron a partir de discos de Co-Cr, mientras que las estructuras experimentales se fresaron a partir de discos de fibra de carbono al 100%. Además, se utilizó un cemento compatible (Carbobloc®) para las mesoestructuras de fibra de carbono.(17)

Se fabricaron un total de quince prótesis híbridas maxilares de arco completo soportadas por implantes, divididas en tres grupos:

1. **CC-A:** Estructuras de cobalto-cromo.
2. **CF-A:** Estructuras de fibra de carbono recubiertas con resina acrílica.
3. **CF-R:** Estructuras de fibra de carbono recubiertas con resina compuesta.

Cada grupo contuvo cinco muestras, y se realizaron pruebas de carga hasta la falla en cantilevers de 10 mm y en la región anterior. (17)

El patrón de fractura observado en los grupos de prótesis híbridas mostró que todas las muestras del grupo CC-A fallaron de manera cohesiva, con fracturas que generalmente comenzaban en la superficie oclusal (5).

En el grupo CF-A, el tipo de fallo predominante también fue cohesivo (17). Mientras que en el grupo CF-R, la mayoría de las fallas fueron adhesivas. Se registraron fallas mixtas en menor proporción en este último grupo.

Las mesoestructuras de fibra de carbono recubiertas con resina acrílica son recomendables para prótesis maxilares de arco completo con cantilevers cortos, ya que lograron valores de resistencia a la fractura (FR) comparables a las de Co-Cr. Las prótesis de fibra de carbono recubiertas con resina compuesta no son adecuadas, ya que no alcanzaron el mínimo aceptable de FR. (17).

Si se realiza una comparación el TriLor® podría posicionarse como un candidato para reemplazar dichas estructuras debido a sus propiedades, sin embargo, aún se requieren más investigaciones a fondo de dicho material.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar a nivel microscópico SEM cómo es el patrón de fractura de estructuras con voladizos cortos fabricadas con el polímero reforzado con fibra de vidrio TriLor® obtenidas de un estudio mecánico previo.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO.

1. Caracterizar microscópicamente los mecanismos de fractura en estructuras de TriLor®, diferenciando los modos de falla (Adhesivo, cohesivo o mixto) mediante el análisis fractográfico por SEM.
2. Correlacionar la localización de la falla con la geometría del diseño protésico, identificando las zonas críticas de concentración de tensiones en las estructuras con voladizos.

5. METODOLOGÍA

Ensayos mecánicos: Se sometieron las prótesis TriLor® a pruebas de carga para inducir fracturas (estudio realizado por Quintana y colaboradores (2024) (2)

Un Microscopio electrónico de barrido (MEB) funciona disparando un haz de electrones sobre la muestra y detectando las señales que se producen (electrones secundarios, retrodispersados, etc.) (30,31). Para que esto funcione correctamente, la muestra debe ser:

1. **Conductora eléctrica:** Para disipar la carga del haz de electrones. Si la muestra es aislante (como plástico, tejido biológico, cerámica), los electrones se acumulan en la superficie, creando un "charging effect" (efecto de carga) que distorsiona la imagen y crea artefactos brillantes (28).
2. **Termoestable:** El haz de electrones lleva mucha energía que puede dañar o quemar muestras sensibles (28,31).
3. **Con alta emisión de electrones secundarios:** Para generar una señal clara y con buen contraste (28).

El recubrimiento metálico soluciona los dos primeros problemas y mejora el tercero.

En el estudio, las muestras fueron recubiertas mediante la aplicación de una película de 10 nm de oro utilizando la máquina metalizadora Mini Sputter Coater SC7620 de la Universidad de Caldas ver figura 2. Este equipo cuenta con una cámara de vacío inicialmente llena de gas argón, en cuya base giratoria se colocan las muestras. La cámara se sella con una tapa que incorpora una lámina de oro puro conectada a un sistema de electrodos.

El proceso se inicia evacuando la cámara hasta alcanzar una presión de 3×10^{-2} mbar, momento en el que se aplica una diferencia de potencial que genera una corriente de 20 mA para iniciar la descarga. A continuación, se elimina el gas argón residual del interior.

El procedimiento de metalización tiene una duración aproximada de 8 minutos. Una vez finalizado, las muestras están listas para su observación mediante microscopía electrónica de barrido. Todo el proceso fue realizado por un técnico especializado de la Universidad de Caldas.



Ilustración 2 Fig 2. Mini Sputter Coater SC7620

5.1 DISEÑO DEL ESTUDIO

Se llevo a cabo un estudio experimental in vitro, que es un enfoque de investigación científica realizado en un ambiente controlado (24). Esto implica la manipulación de diferentes componentes dentro de un laboratorio.

5.2 POBLACIÓN OBJETIVO

Estructuras TriLor® sin revestimiento acrílico del estudio de Gustavo Quintana y colaboradores (6 estructuras).

Estructuras TriLor® revestidas con acrílico ya fracturadas en el estudio de Panesso y colaboradores (4 estructuras).

5.2.1 Criterios de selección

Barras y prótesis revestidas de TriLor® que ya presentan fractura.

5.2.1.1 Criterios de inclusión.

Fragmentos de TriLor® y voladizos fracturados o fueron parte del proyecto de investigación anterior de Gustavo Quintana y colaboradores (2), Panesso y colaboradores (6)

5.2.1.2 Criterios de exclusión.

Fragmentos de barras en TriLor® que tengan daños estructurales por motivos diferentes a las pruebas realizadas con anterioridad.

5.3 TAMAÑO DE MUESTRA Y DISEÑO DE MUESTREO

Estructuras de TriLor® revestidas con acrílico ya fracturadas sometidas a fuerza axial (4 Prótesis).

Estructuras de TriLor® sin revestimiento acrílico (6 estructuras).

5.3.1 Tamaño de muestra.

Se emplearon todos los fragmentos que surgieron como resultado de estudios anteriores. Se cuenta con 4 estructuras de TriLor®, revestidas con acrílico de termocurado, y 6 estructuras de TriLor® por lo cual las muestras son independientes, cada una será evaluada bajo un microscopio electrónico de barrido y se analizará la necesidad de realizar un metalizado en oro para su observación.

En total se evaluaron 10 estructuras de TriLor® (4 estructuras con revestimiento acrílico de Panneso y colaboradores) y (6 estructuras sin revestimiento acrílico de Gustavo Quintana y colaboradores).

5.4 DEFINICIÓN DE VARIABLES

5.4.1 Variables.

Tipo de Fractura.

- Adhesivo
- Cohesivo
- Mixta
- Fallo Completo

5.4.2 Cuadro operacional de las variables

Tabla 3. Tipo de variable, descripción y método de evaluación.

Variable	Descripción	Método de evaluación
Tipo de fractura	Clasificación del patrón de fractura (dúctil, frágil)	Análisis al microscopio electrónico
Estrés aplicado	Niveles de carga durante las pruebas (2)	Pruebas mecánicas previas a la evaluación. (Estudio ya realizado) (2)
Composición del material	Proporciones de polímero y fibra de vidrio	Microscopio Electrónico de Barrido (FEI – modelo QUANTA 250)

--	--	--

5.5 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Análisis microscópico: Las muestras fracturadas se analizaron bajo un Microscopio Electrónico de Barrido (FEI – modelo QUANTA 250) de la Universidad de Caldas, Manizales, para observar el patrón de fractura, en la prueba piloto se recubre una estructura revestida de acrílico con voladizo de 10 mm sobre las superficies fracturadas con una capa homogénea de oro de 10 nm de espesor. Este proceso, llevado a cabo en un metalizado al vacío (Mini Sputter Coater SC7620.) Identificar los puntos de inicio y propagación de la fractura, y evaluar la influencia de la longitud del voladizo en el comportamiento del material (17).

Mecanismo de fractura: Determinar el mecanismo de fractura predominante en las estructuras de TriLor® bajo carga, mediante análisis fractográfico, para establecer la relación entre la morfología de la falla y la resistencia mecánica del material (15).

Tabla 4. Modos de falla

ADHESIVO	COHESIVA	MIXTA	FALLO COMPLETO
Desprendimiento del material de recubrimiento (19)	Grietas dentro del espesor de la supraestructura,	Combinación de adhesivo y cohesivo (19,20)	Rotura total de la estructura. (20)

	con o sin astillamiento (20)		
--	---------------------------------	--	--

5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

No se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales, puesto que el alcance de la investigación es estrictamente cualitativo-descriptivo, fundamentado en la observación directa y el análisis visual de los patrones de fractura.

5.7 CONSIDERACIONES ÉTICAS

El riesgo que se tiene al manipular estas muestras es general laceraciones en el personal que lo manipula, debido a que la fibra de vidrio tiene la capacidad de cortar.

- Al ser un estudio IN VITRO, no involucramos sujetos humanos ni animales.
- Utilizar el EPP para el examen en el laboratorio, evitando posibles lesiones en el personal y contaminación en la muestra.
- Se siguieron los principios éticos del laboratorio de la Universidad de Caldas, Manizales
- Se realizó un protocolo de manipulación del TriLor®.
-

RESULTADOS

Para el análisis de imagen se optó por un microscopio electrónico de barrido (FEI, modelo Quanta 250) ubicado en la Universidad de Caldas, se utilizó energía de 15 Kv (15 mil electron voltios) y se utilizó el detector de electrones secundarios (SE) y en algunas imágenes se utilizó el detector de electrones retrodispersados (BSED). **Ver (Fig. 3)**

Para la prueba piloto se analizó una estructura protésica de TriLor®, la cual presentaba las fracturas del estudio anterior de Panesso y colaboradores (6), la estructura presentaba un voladizo de 10 mm. (Ver Fig 4)



Ilustración 3 Fig 4. Estructura TriLor®, Voladizo 10mm A con revestimiento acrílico de termocurado fracturada.

Se realizó un baño metalizado en oro como prueba piloto, para que se observe con mayor claridad el proceso.

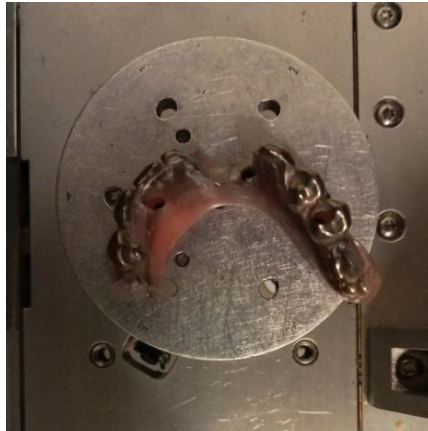
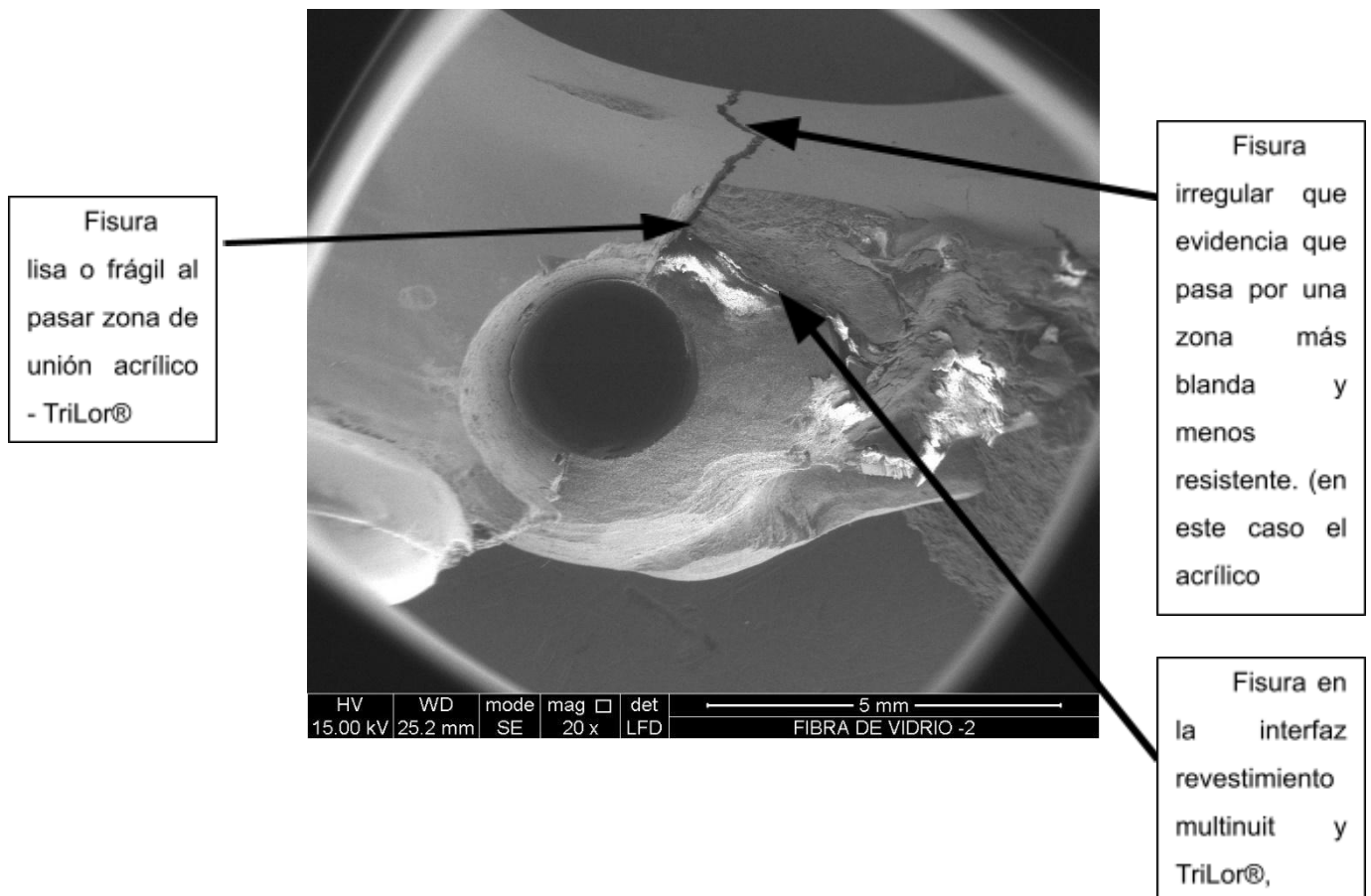


Ilustración 4. Estructura con baño metalizado en oro.

Los resultados de las imágenes bajo el microscopio de barrido se muestran tipo de fallo mixto, Se pueden apreciar las grietas de la resina acrílica del recubrimiento, además presentaron superficies irregulares tras el desprendimiento como se observa en las **(figuras 5, 6, 7, 8)** la estructura analizada corresponde a una estructura con voladizo de 10 mm



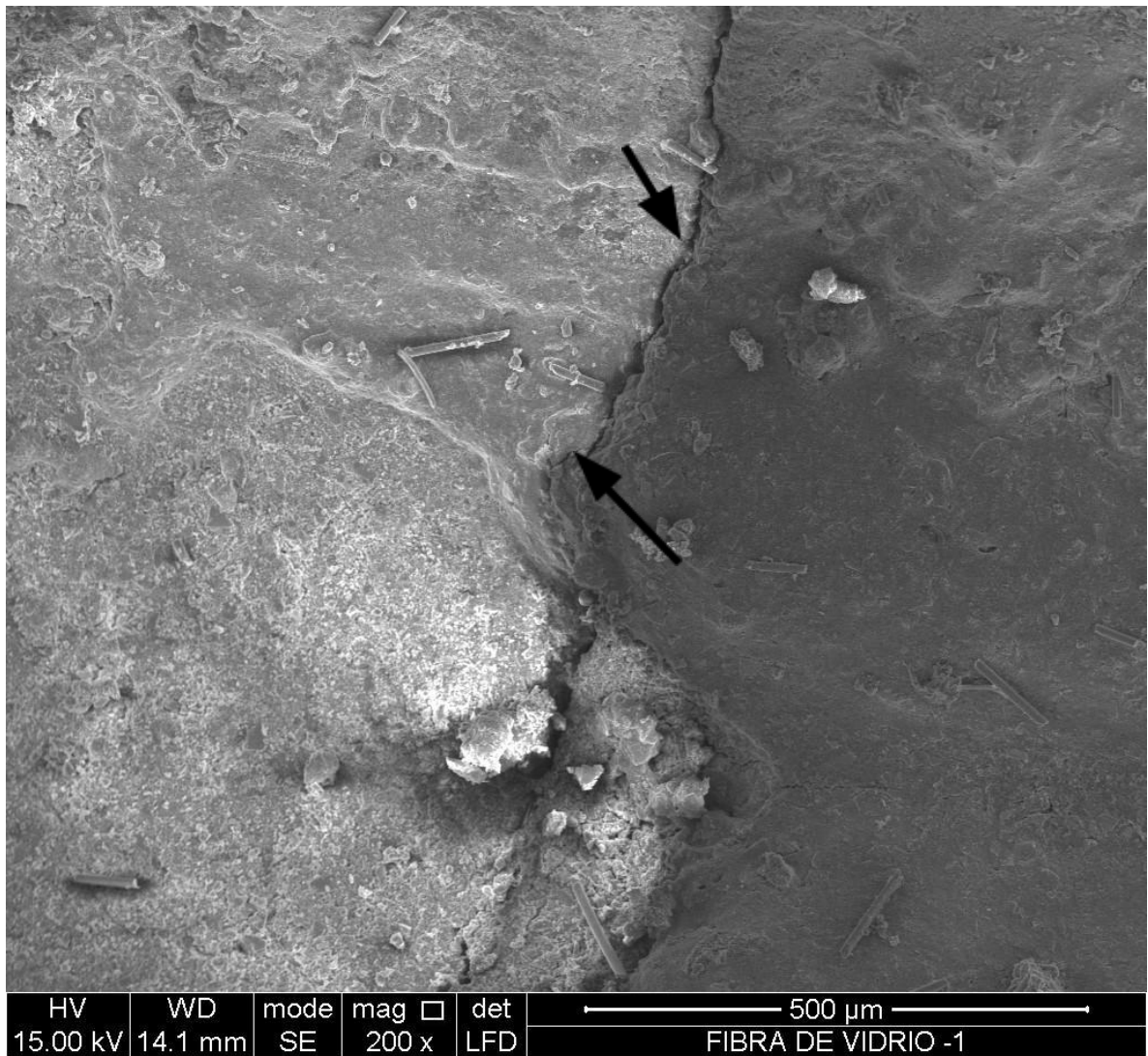


Ilustración 5. Figura 1. Fractura en zona de multiunit a 30 aumentos.

El Multi unit presenta una fisura interna que debilita la capacidad de soporte ante las fuerzas masticatorias.



Ilustración 6. camara interna del SEM.

La fibra de vidrio TriLor®, se observaba con muy buena claridad en el microscopio SEM sin la necesidad del baño metalizado en oro, se evaluaron las estructuras con voladizo de 7 mm y una estructura de 10 mm, por lo que no requiere el baño metalizado en oro realizado en la prueba piloto, debido a que las fibras de vidrio son cilindros delgados. Esta geometría permite que, en ciertos ángulos, los electrones encuentren un camino de escape más fácil hacia la base de carbono o plata donde están pegadas, especialmente si se trabaja a bajo voltaje (1 a 5 Kv). (11)



Ilustración 7. Voladizo de 7 mm A

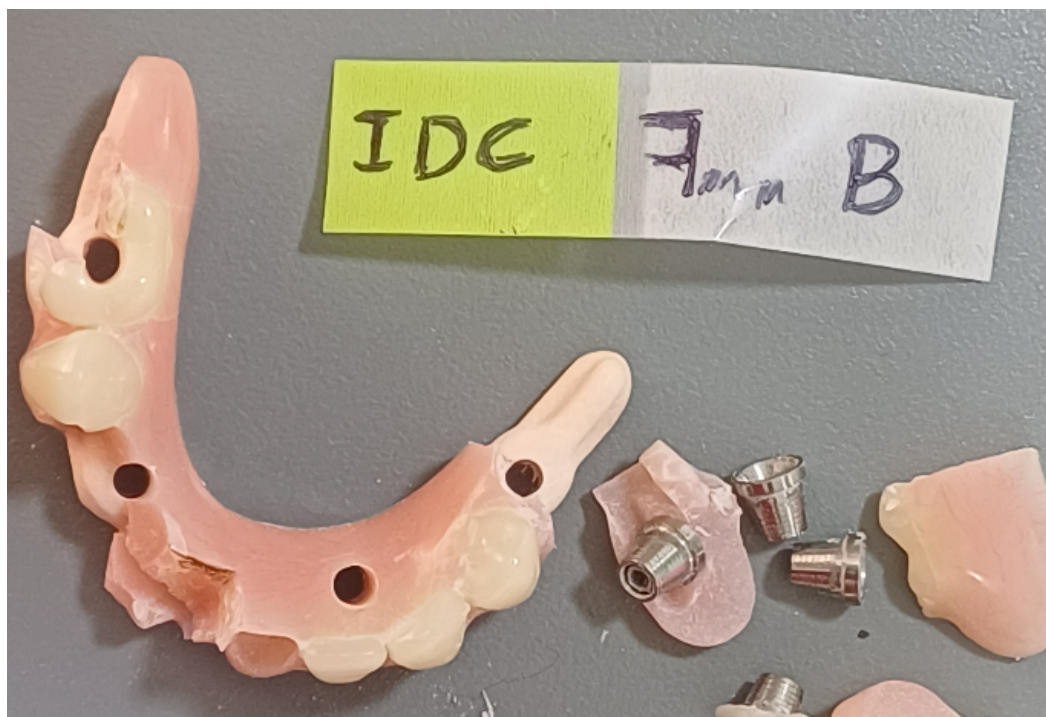


Ilustración 8. Voladizo de 7 mm B



Ilustración 9. Voladizo de 10 mm B

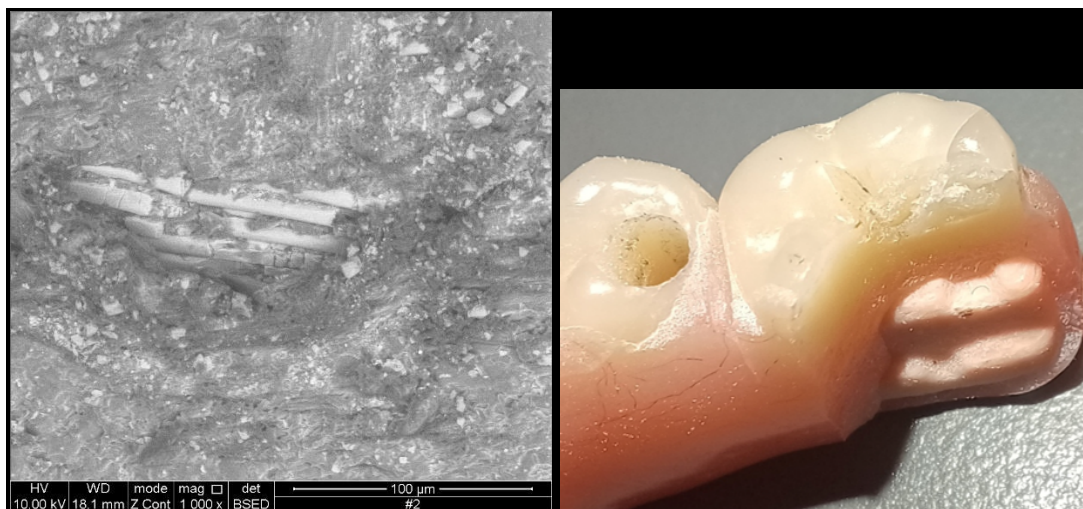


Ilustración 10. Voladizo de 7 mm A zona izquierda, Falla adhesiva entre TRILOR y Acrílico en zona de multiunit.

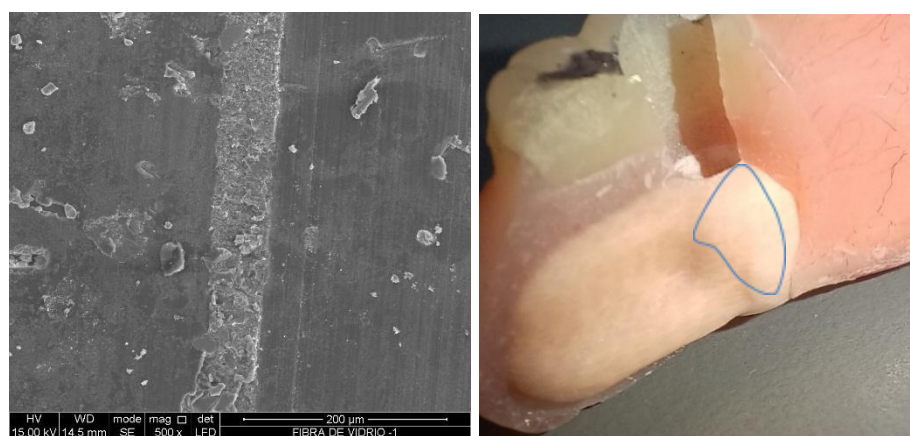


Ilustración 11 Voladizo de 7 mm B zona izquierda, sin fallos

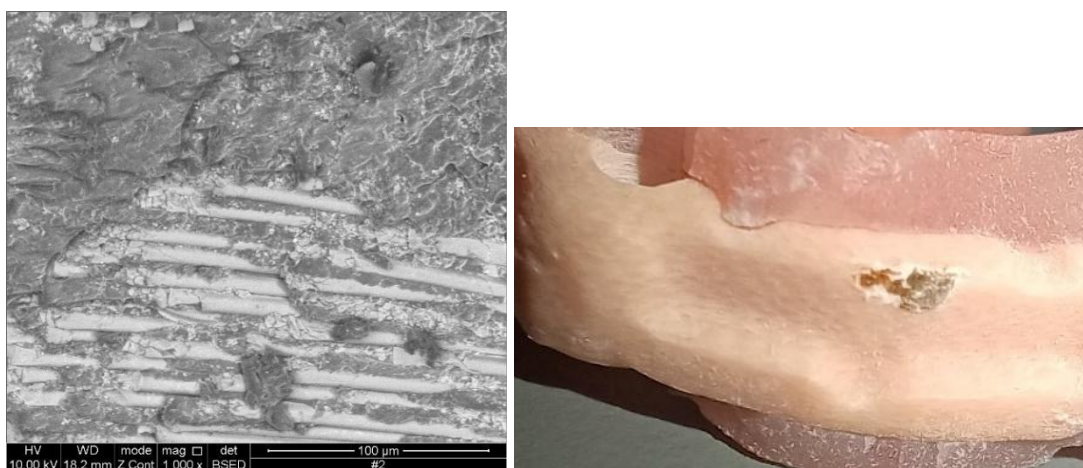


Ilustración 12. Estructura de 10 mm B, zona central. muestra una zona de desprendimiento de material TRI-LOR en el momento de la fractura.

En la imagen a la izquierda a 200 aumentos, deja en evidencia una falla cohesiva del TriLor® en el sistema de unión TriLor® y acrílico, al desprender parte de resina dejando expuestas las fibras subyacentes.

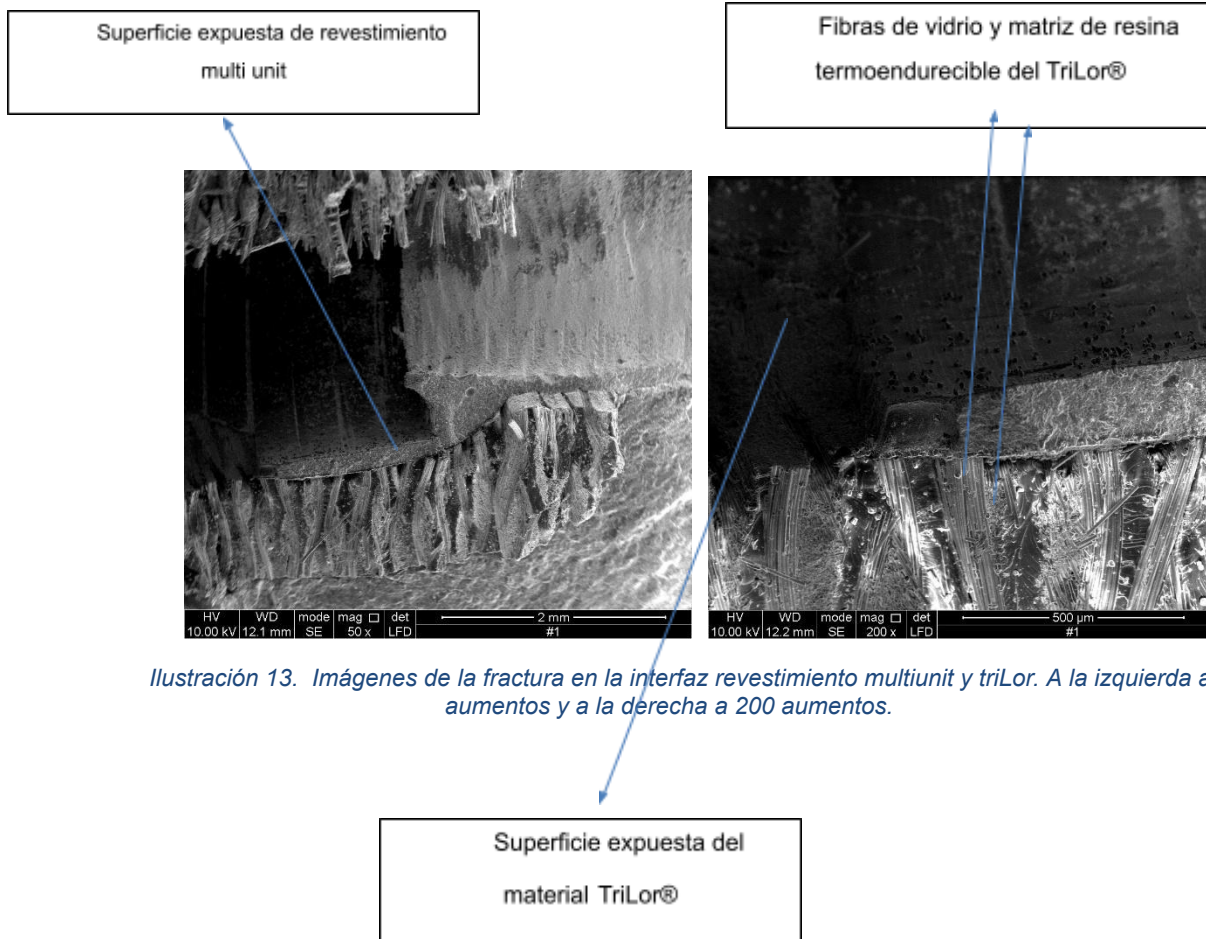


Ilustración 13. Imágenes de la fractura en la interfaz revestimiento multiunit y triLor. A la izquierda a 45 aumentos y a la derecha a 200 aumentos.

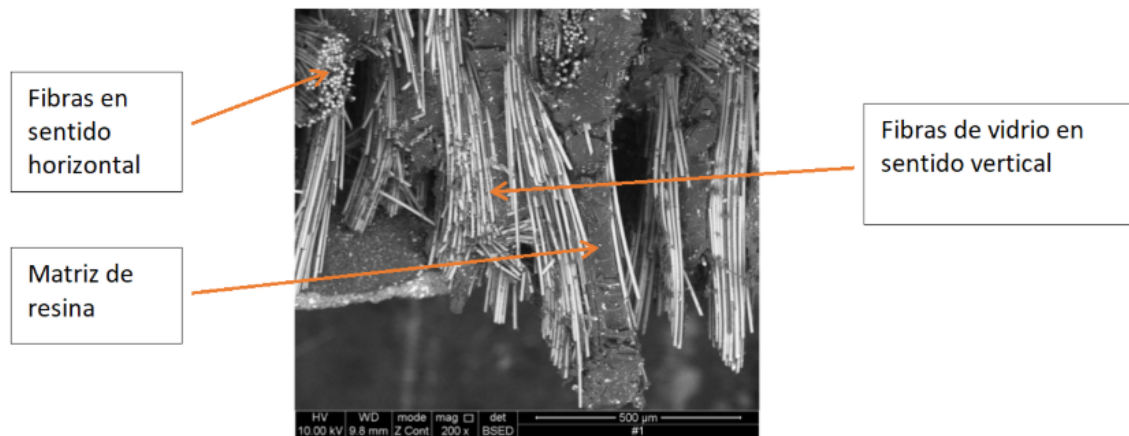


Ilustración 14. Material TriLor Fracturado a 200 aumentos.

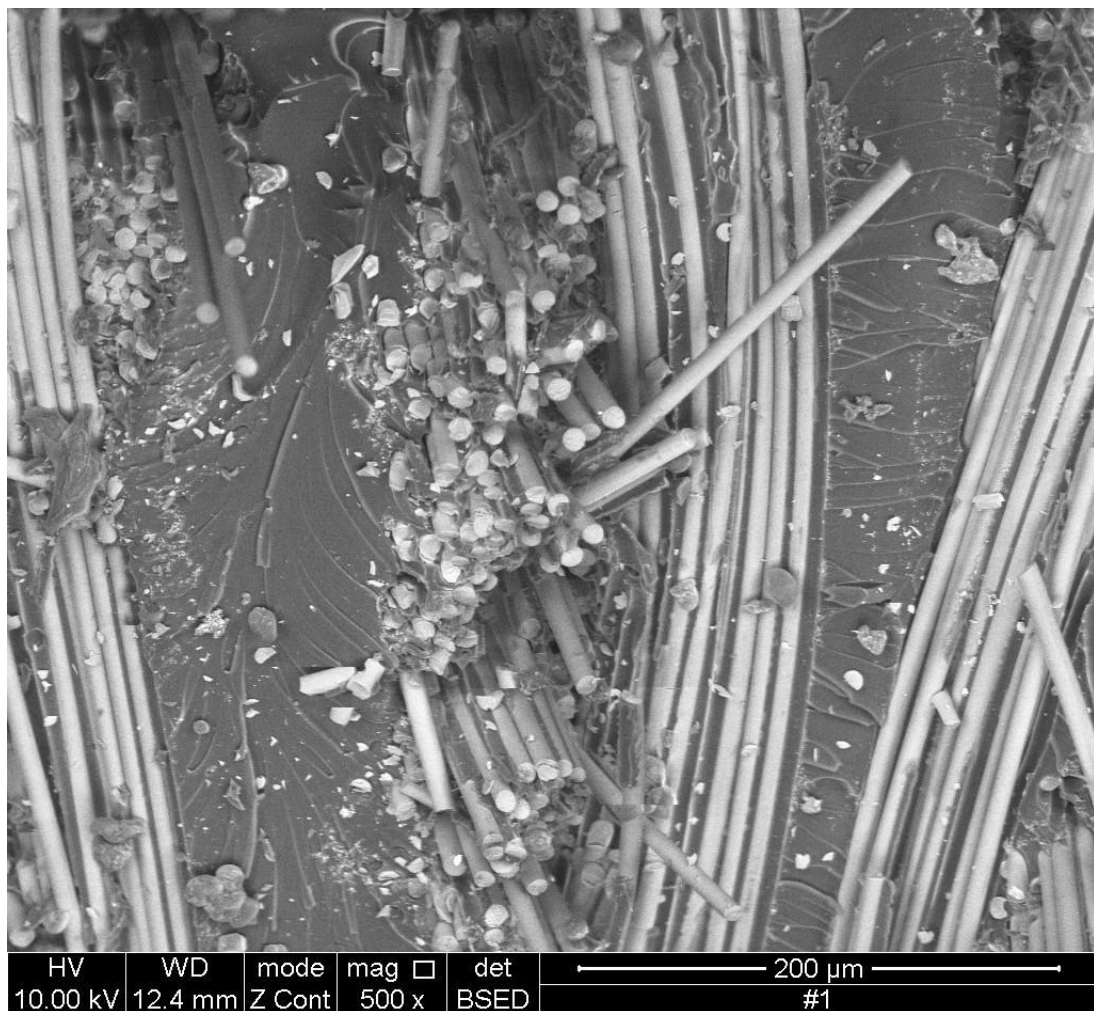


Ilustración 15. Falla adhesiva al interior del material compuesto TriLor® (entre fibras y resina) a 500 aumentos

Al analizar a 500 aumentos (figura 15) se aprecia con mayor detalle cómo se produjo la falla del material TriLor®. Las fibras en sentido vertical de esta imagen no han fracturado; en tanto que las fibras en sentido horizontal (hacia el observador) presentan rotura en diferentes longitudes. Este fenómeno permite inferir que algunas de las fibras expuestas a las mayores cargas aplicadas hasta la falla, no se encuentran lo suficientemente adheridas a la matriz, lo que genera que se desprendan de ésta. Lo ideal es que en su mayoría fallen de manera uniforme a nivel de la superficie de fractura. Esta forma de fractura entre las fibras de vidrio y la matriz de resina es también falla adhesiva al interior del material TriLor®. Los resultados muestran que los voladizos de 10 mm presentaron una fractura mixta y complicada, mientras que los voladizos de 7 mm no presentaron un fallo tan determinante como las de 10 mm, el voladizo de 7 mm B no presento fallos.

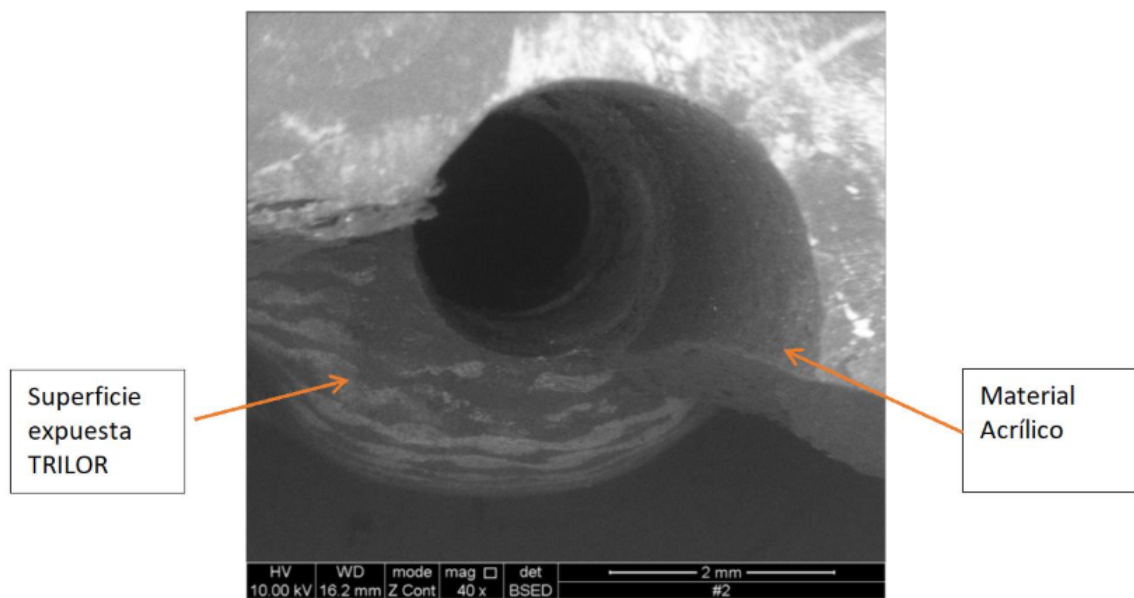


Ilustración 16. Zona Multiunit fracturada a 40 aumentos.

A pesar de que en su mayoría la falla entre acrílico y TriLor® es adhesiva, se presentan algunas pequeñas zonas donde se produjo falla cohesiva en el sistema

general por desprendimiento de material de resina del TriLor® dejando expuestas las fibras en su interior, como se evidencia en la figura 16.

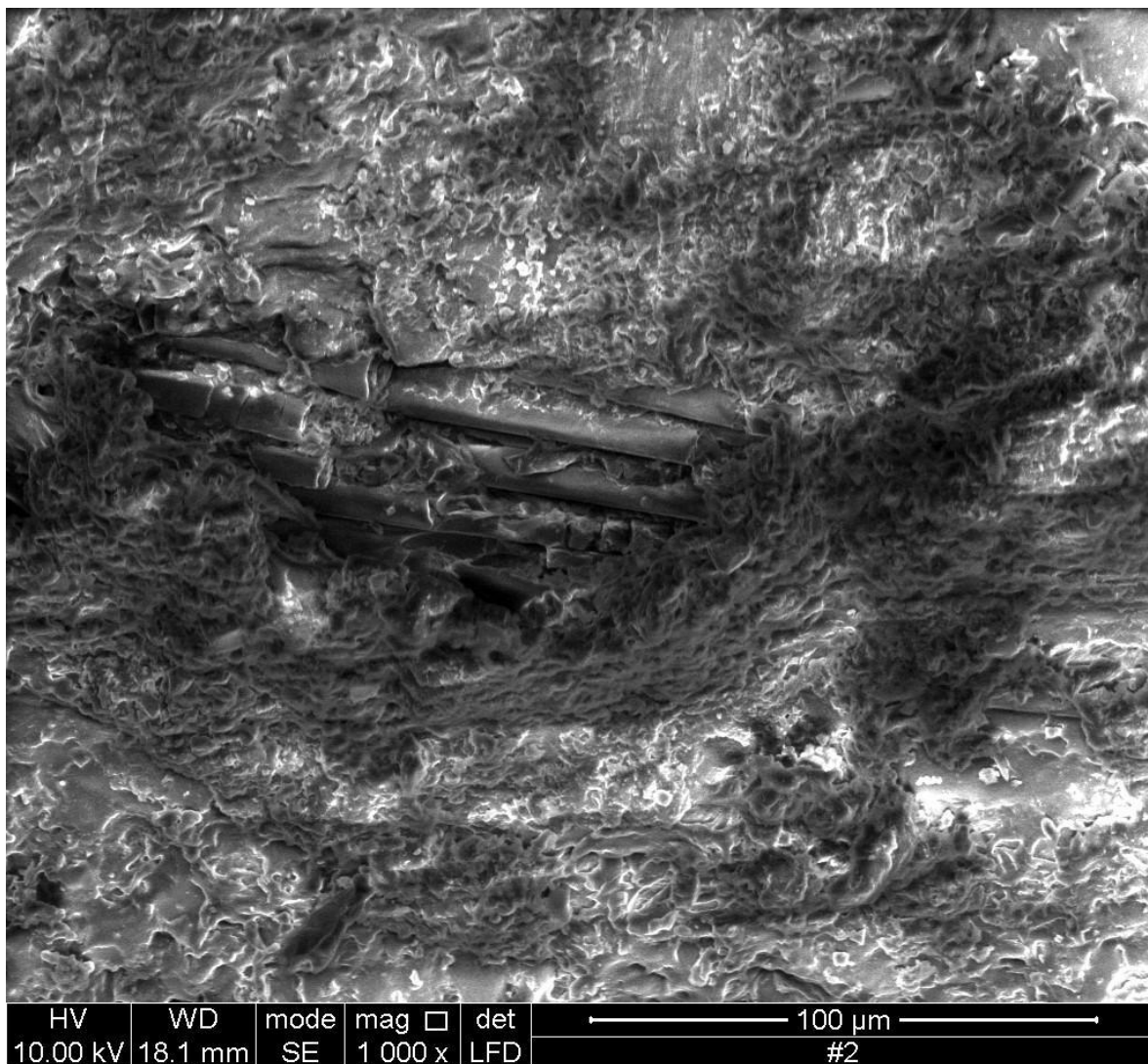


Ilustración 17. Superficie de falla cohesiva de TriLor® en la zona de fractura, debido a la pérdida de resina. 1000 aumentos.

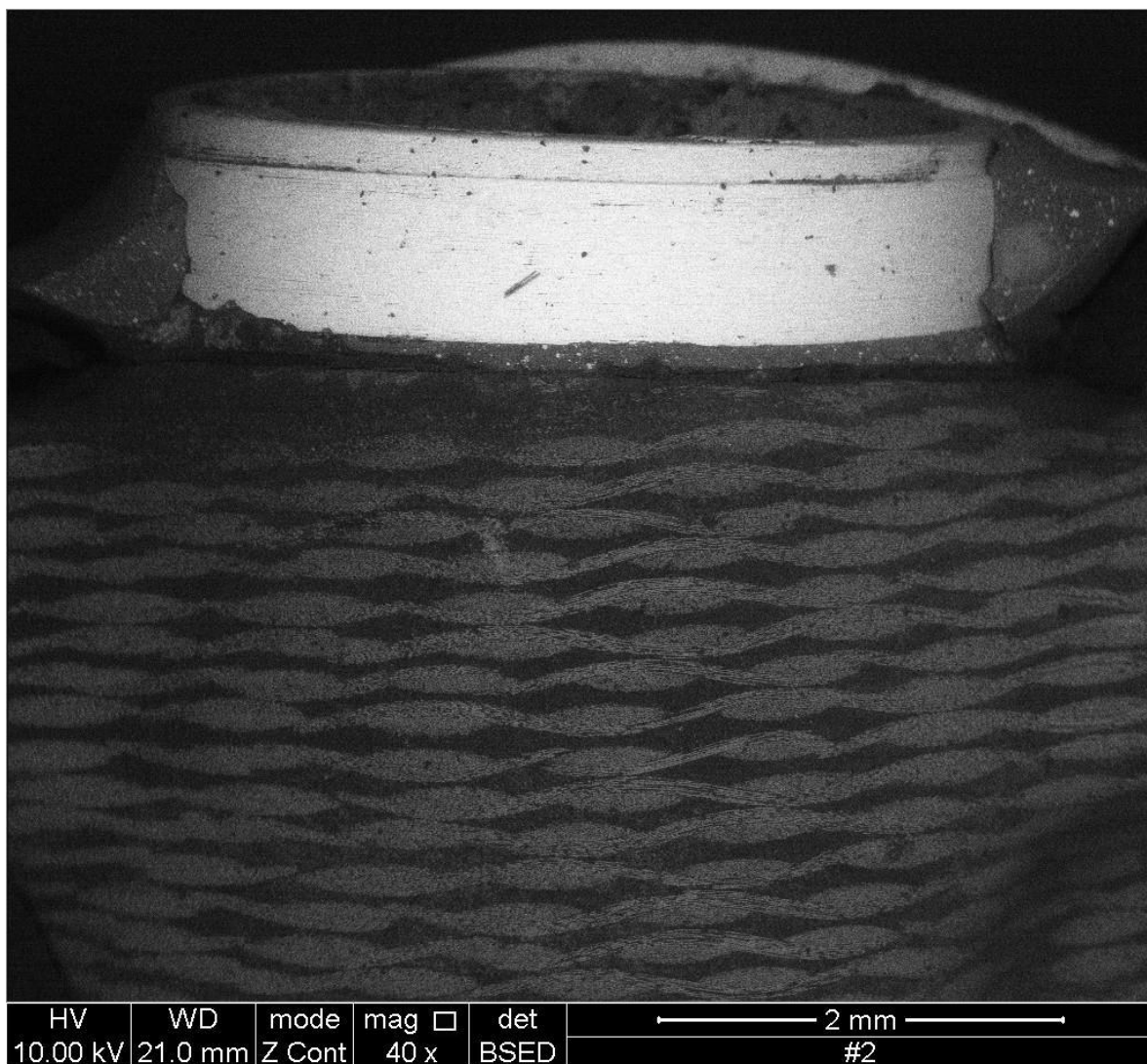
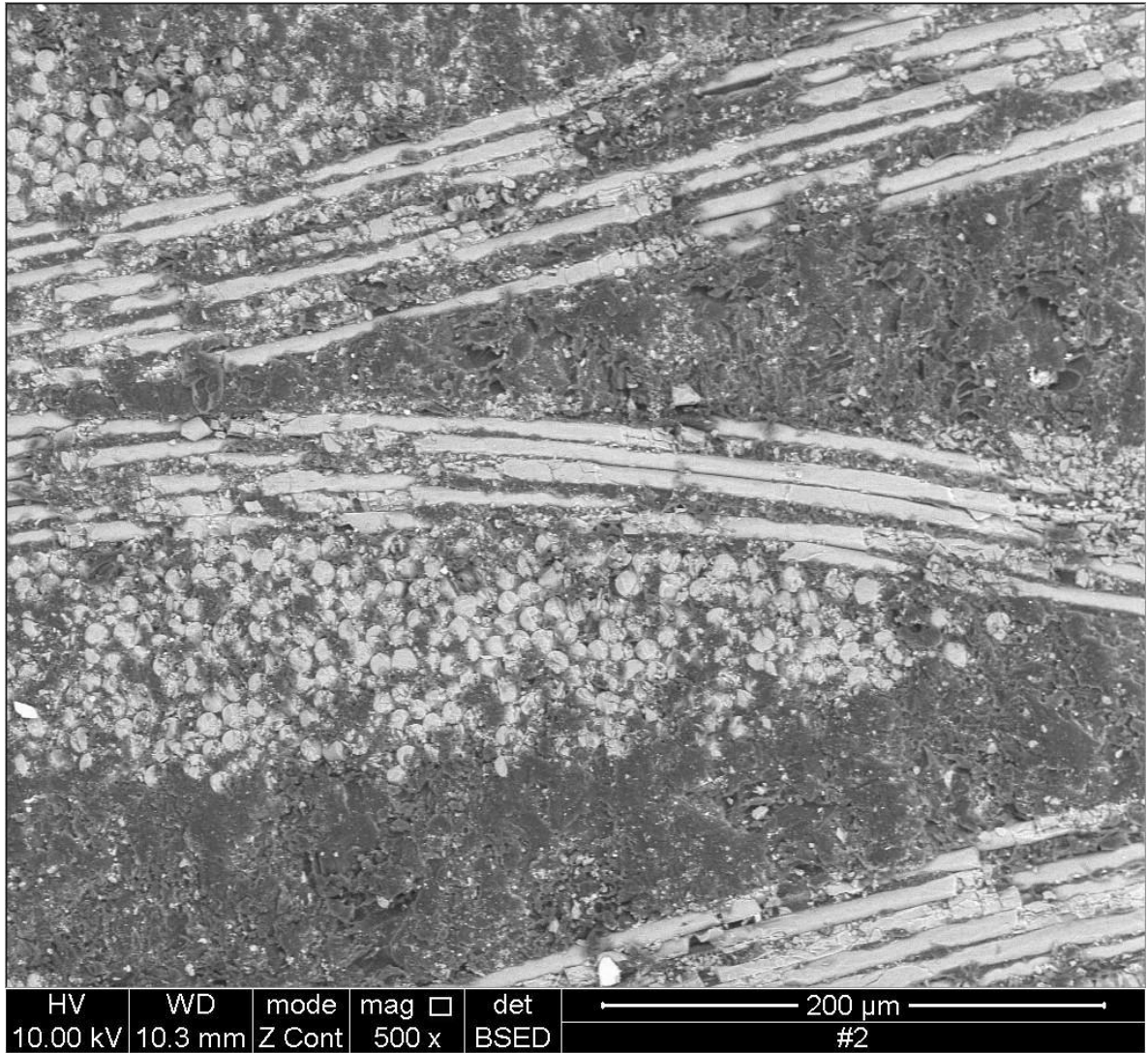
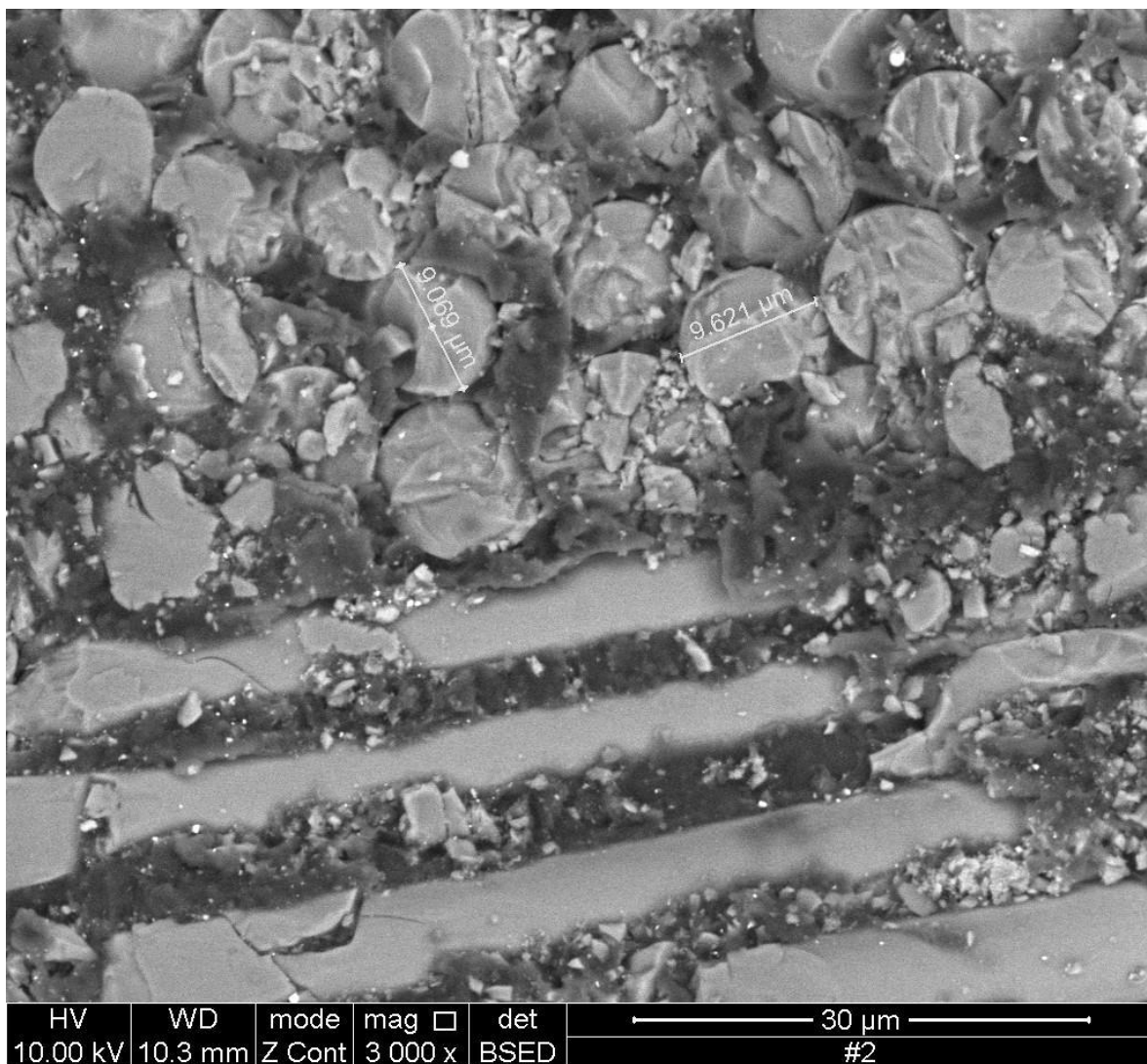


Ilustración 18. Superficie de TriLor® totalmente expuesta en la zona de fractura de multiunit a 40 aumentos.



A



B.

Ilustración 19. A y B, Superficie de fractura adhesiva del sistema TriLor® y acrílico. Es la superficie expuesta de TriLor®, A) Disposición de fibras a 500 aumentos. B) Fibras fracturadas en forma perpendicular a su longitud a 3000 aumentos.

En las imágenes de la figura 19, se analizan a 500 y 3000 aumentos las fibras de vidrio sobre la superficie expuesta del TriLor®. Esta falla adhesiva entre éste y el Acrílico

Evidencia claramente cómo las fibras de vidrio en sentido paralelo a la superficie no sufren rotura, mientras que aquellas fibras que vienen de frente desde el interior han fracturado a ras de la superficie de la matriz, sin sobresalir de

ésta. A las fibras se les ha medido su diámetro, que oscilan entre 9 y 10 micrómetros.

Tabla 5. Tipo de fallo voladizos 7 mm

Tipo de Fallo	Voladizo Izquierdo n (%)	Voladizo Derecho n (%)	Centro n (%)
No hubo fallo	0 (0%)	0 (0%)	1 (50%)
Fallo adhesivo	2 (100%)	2 (100%)	1 (50%)
Fallo cohesivo	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Fallo mixto	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	2 (100%)	2 (100%)	2 (100%)

Tabla 6. Tipo de fallo voladizos 10 mm

Tipo de Fallo	Voladizo Izquierdo n (%)	Voladizo Derecho n (%)	Centro n (%)
No hubo fallo	0 (0%)	1 (50%)	0 (0%)
Fallo adhesivo	2 (100%)	1 (50%)	1 (50%)
Fallo cohesivo	0 (0%)	0 (0%)	1 (50%)
Fallo mixto	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	2 (100%)	2 (100%)	2 (100%)

En estas imágenes se observan las estructuras sin revestimiento acrílico de Quintana y cols.



Ilustración 20. Falla cohesiva en el material.

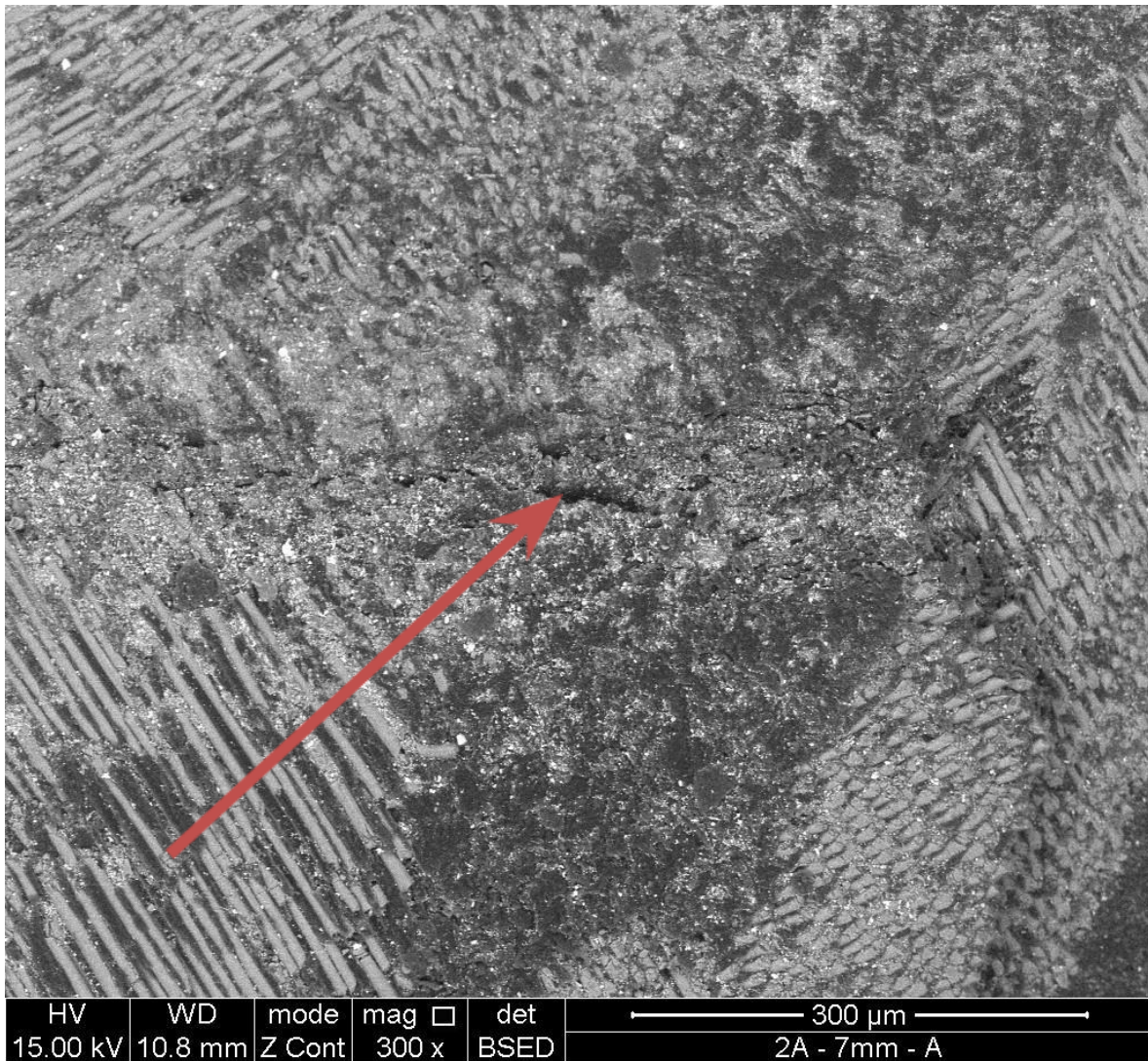


Ilustración 21. 2A 7mm Falla cohesiva

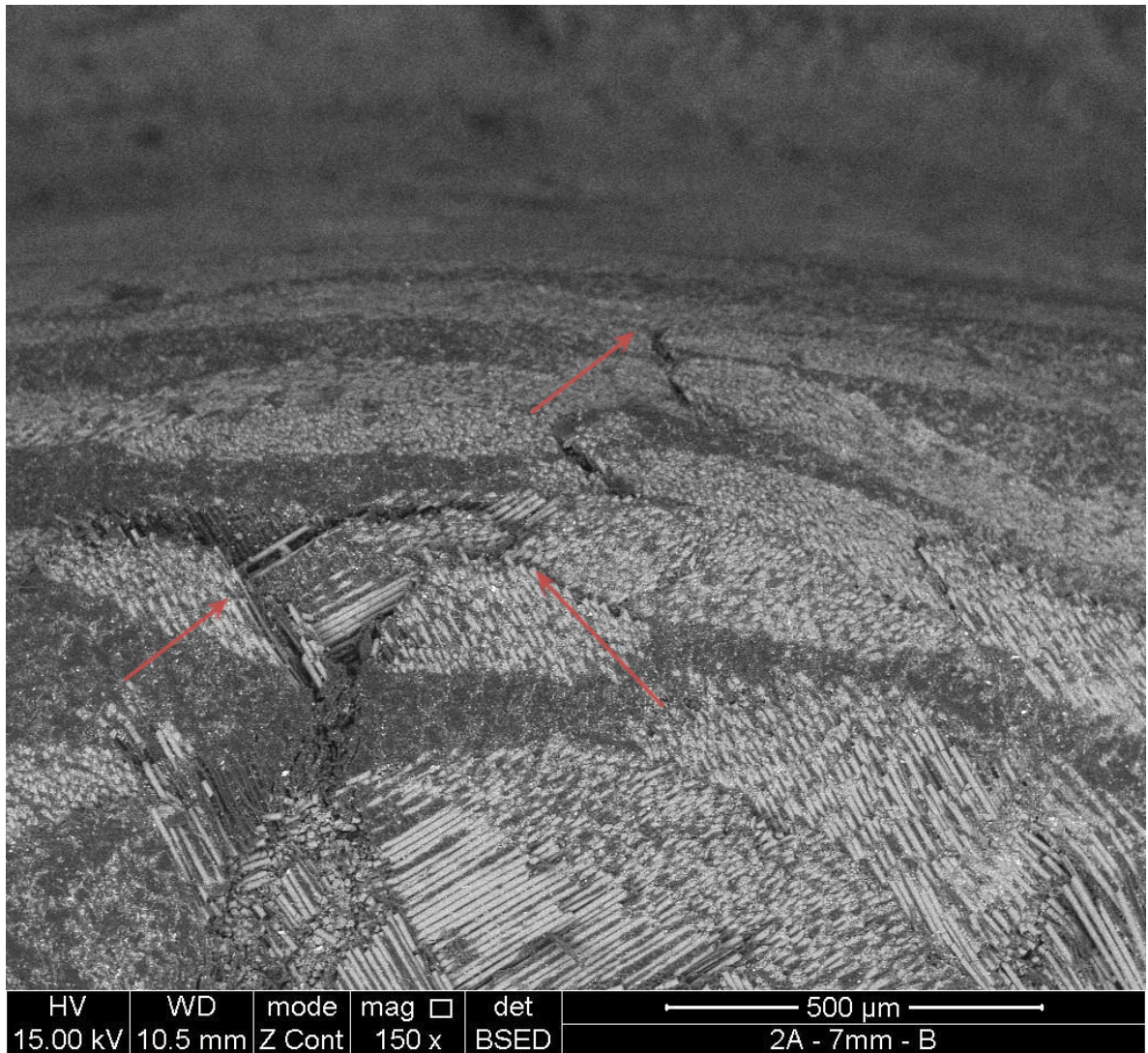


Ilustración 22. 2A 7mm Falla cohesiva, se observan grietas en la superficie.

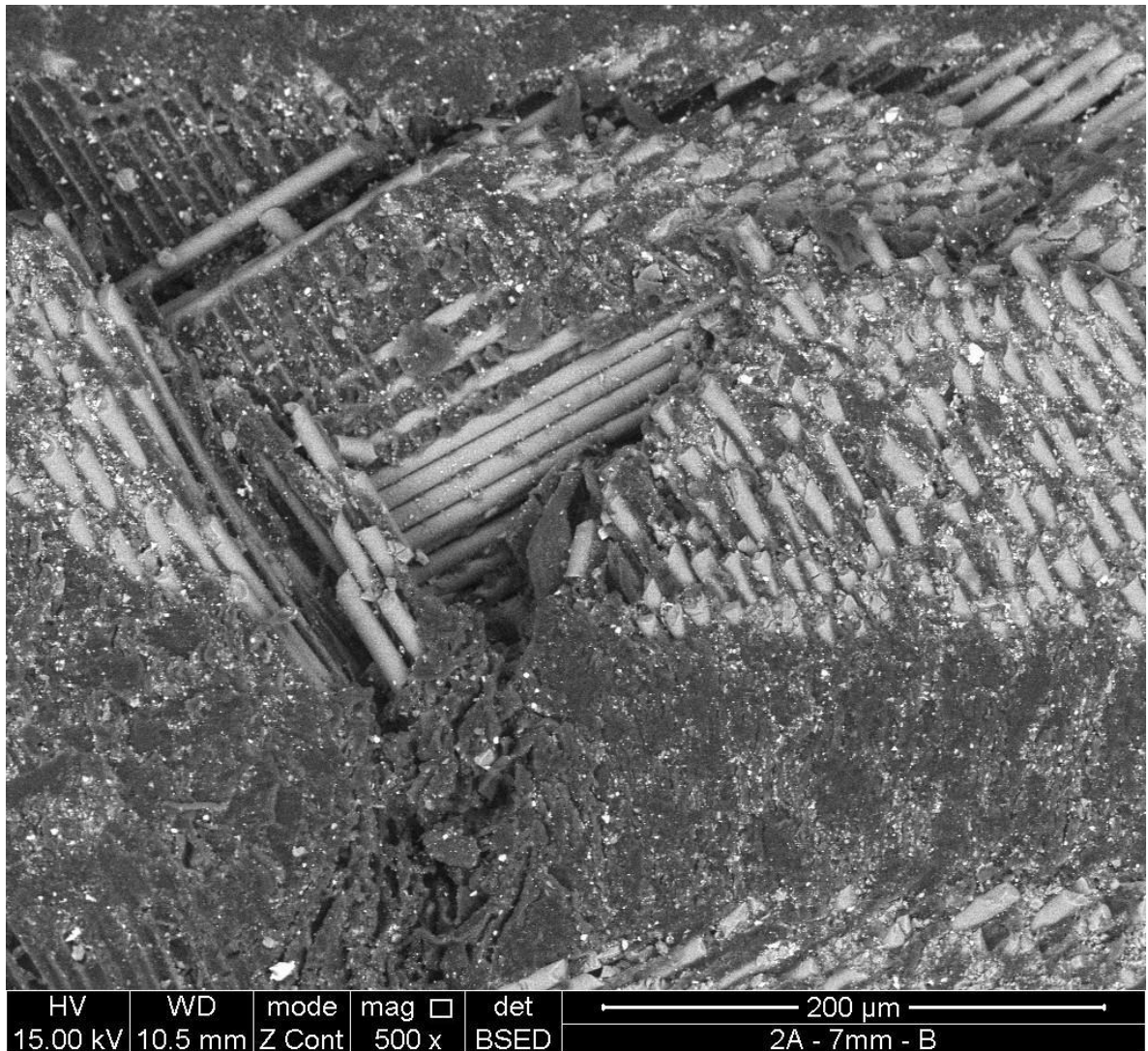


Ilustración 23. 2ª 7mm, Falla cohesivo, se observan fibras entrelazadas.

En general se observa una falta de uniformidad de la mezcla resina y fibras, dando lugar a marchas en la aplicación de esfuerzos.

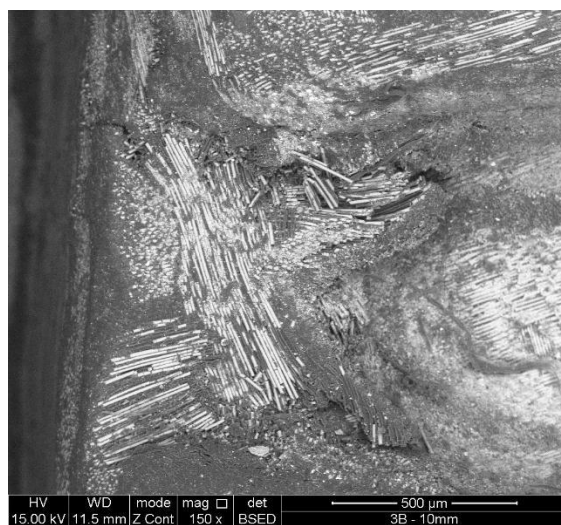


Ilustración 24. 3B 10 mm cohesiva

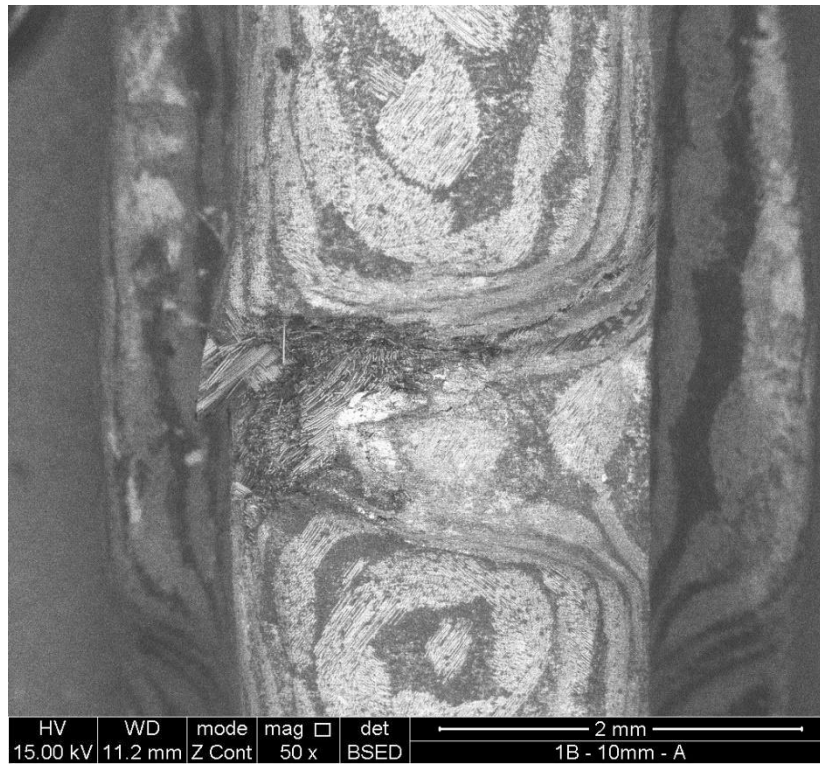


Ilustración 25. 1B 10 mm, cohesivo

Tipo de Fallo	Voladizo Izquierdo n (%)	Voladizo Derecho n (%)	Centro n (%)
No hubo fallo	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Fallo adhesivo	0 (0%)	0 (0%)	1(50%)
Fallo cohesivo	2 (100%)	2 (100%)	1(50%)
Fallo mixto	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Total	2 (100%)	2 (100%)	2 (100%)

6. DISCUSIÓN

El objetivo del presente estudio fue analizar la variación de los patrones de fractura en estructuras protésicas dentales fabricadas en Trilor®. Se evaluaron en total 10 estructuras de Trilor® (4 estructuras con revestimiento acrílico) y (6 estructuras sin revestimiento acrílico). En todas las muestras se realizaron pruebas en tres áreas: Lado derecho, izquierdo y centro, determinando que tipo de fallo se presentó (cohesivo, adhesivo o mixto). Se evidenció que los patrones de fractura no se distribuyen de manera homogénea, observándose una mayor frecuencia de fallos cohesivos tanto para los voladizos de 7mm y los de 10mm.

En cuanto a la naturaleza de las fallas, nuestros resultados mostraron una baja incidencia de fallo adhesivo puro en las estructuras de TriLor®. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Lahoud et al. (2025) (13) quien sugiere que los materiales compuestos con un módulo elástico cercano al de los tejidos dentales (18-20 GPa) tienden a generar menores concentraciones de tensión en las interfaces. Al comparar nuestro análisis microscópico con la literatura se observa que TriLor®, al igual que la fibra de carbono favorece una distribución de cargas que podría proteger la integridad de la unión cementada, lo cual explicaría la predominancia de fallas de tipo cohesivo o mixto observadas en nuestra muestra.

En un estudio de fractografía dental reciente, Cabrera et al. (2026) describieron el fallo adhesivo como fracturas interfaciales sin residuos de material adherido en la superficie, observables mediante SEM (28). En el estudio las prótesis de zirconio, este tipo de fallo se asoció frecuentemente con una ausencia de tags de resina adecuados o con una capa híbrida insuficientemente formada. Diferentes métodos de tratamiento de superficie parecen mejorar la superficie de unión de los polímeros de alto rendimiento como el PEEK/PEKK parece mejorar (25).

Los estudios, incluidos los de Lahoud et al. (2024) y Khosroabadi et al. (2016), son de naturaleza *in vitro*, lo que no puede replicar completamente el entorno oral complejo (humedad, cargas termocíclicas, flora microbiana) (13,25).

Es importante conocer que la integridad estructural a largo plazo de los materiales compuestos no está gobernada por un solo fenómeno, sino por la compleja y sinérgica interacción de múltiples factores de degradación (32) . La resistencia a cargas estáticas, la fluencia y la fatiga no actúan de forma aislada; por el contrario, su interacción acelera la degradación del material de una manera que no puede predecirse estudiando cada fenómeno por separado (33) . Comprender estas sinergias es fundamental para el diseño fiable de componentes en sectores como el aeroespacial, la energía, el transporte y las aplicaciones biomédicas. Pruebas de inmersión en saliva artificial han demostrado que el Trilor® mantiene su integridad morfológica y masa (con variaciones mínimas de -0.18 a 1.82 mg) incluso en entornos de acidez extrema (pH de 3 a 5.7), simulando condiciones de reflujo gastroesofágico (5).

En cuanto a la resistencia a cargas estáticas, la resistencia última a la tracción y compresión es la que define el límite teórico de carga que un material compuesto puede soportar en una sola aplica (33). Sin embargo, este valor, obtenido en condiciones controladas de laboratorio, rara vez representa el escenario operativo real (34)l. La microestructura del composite (naturaleza de la fibra y la matriz, orientación de las fibras, calidad de la interfaz y porosidad) (35) , determina este límite inicial. Cualquier daño posterior por otros mecanismos reducirá progresivamente esta resistencia inherente (32).

Bajo una carga sostenida (inferior a su límite elástico), los materiales compuestos, sometidos a temperaturas elevadas, experimentan una deformación lenta y progresiva en el tiempo conocida como fluencia. Este factor puede ser inducido en el momento del fresado o mecanizado del material para darle forma. (32).

La fluencia puede iniciar microfisuras en la matriz o en la interfaz fibra/matriz. Estas microfisuras actúan como concentradores de tensión, reduciendo

significativamente la resistencia a la fatiga del material al facilitar la iniciación y propagación de grietas bajo cargas cíclicas. Las microfisuras y deformaciones por fluencia también crean nuevos caminos para la penetración de agentes corrosivos (humedad, sales, productos químicos) hacia el interior del material, acelerando los procesos de degradación (36).

El revestimiento acrílico influye significativamente en las estructuras de TriLor®, afectando no solo la resistencia flexural (fuerza máxima soportada), sino también el tipo de falla y la distribución de tensiones en comparación con las estructuras que no lo tienen.

Basado en los estudios comparativos, estas son las principales influencias:

1. Cambio en el Patrón y Tipo de Falla

La diferencia más notable identificada mediante microscopía SEM es la naturaleza de la fractura:

- **Estructuras con revestimiento:** Predomina la falla cohesiva. Esto indica que la fractura ocurre dentro de la propia matriz del material o en la unión de sus componentes internos antes que en la interfase externa (37,38).
- **Estructuras sin revestimiento:** Presentan mayoritariamente falla mixta (adhesiva y cohesiva). La ausencia del acrílico provoca una degradación compleja tanto de la interfase como de la matriz del tecnopolímero, evidenciando que el acrílico ayuda a que la carga se distribuya de forma más uniforme antes de que el material colapse (39).

2. Influencia en la Resistencia Flexural (N y MPa)

Al comparar los valores de fuerza máxima necesarios para causar la fractura completa de la barra (Falla 4):

- **Sin revestimiento:** Para estructuras de 7 mm, la fuerza máxima promedio fue de 1200.8 N (2).

- **Con revestimiento:** Para las mismas estructuras de 7 mm, se registraron valores de 1552 N y 1201 N para alcanzar la fractura de la barra. Esto sugiere que el revestimiento acrílico puede proporcionar una capa de protección adicional o absorber parte de la energía inicial (38), aunque las fallas superficiales (dientes y acrílico) ocurren a cargas menores (6).

3. Distribución de Tensiones y Comportamiento Mecánico

- **Modo de propagación:** El revestimiento altera el modo en que se propaga la fractura. En estructuras de 7 mm con acrílico, se observó principalmente astillamiento del revestimiento o fractura dental, protegiendo la integridad de la barra. En cambio, en voladizos de 10 mm, el revestimiento no fue suficiente para evitar la fractura completa de la barra bajo cargas elevadas (40).
- **Debilidades introducidas:** A pesar de su beneficio en la distribución de carga, el revestimiento introduce vulnerabilidades. Las discrepancias en los coeficientes de expansión térmica (41) entre el TriLor® y la resina acrílica pueden generar microgrietas y fallas de cohesión interna durante el uso. Además, la falta de una unión química efectiva hace que, al fallar el sistema, las fibras de vidrio queden "limpias", sin restos de acrílico adherido.

El revestimiento acrílico actúa como un modificador de tensiones que favorece fallas adhesivas internas en lugar de degradaciones mixtas complejas, aunque introduce desafíos adicionales de adhesión e interfase que deben ser gestionados clínicamente.

Entre los efectos que se pueden presentar en las fibras y la interfaz, la humedad y los productos químicos pueden disolver el tamaño protector de las fibras y degradar la matriz, lo que lleva a la pérdida de adhesión en la interfaz. Esto compromete la capacidad de transferir carga de la matriz a las fibras, reduciendo drásticamente la resistencia, rigidez y resistencia a la fatiga del compuesto (26).

Por lo anteriormente descrito, la integridad de un material compuesto en servicio es el resultado de un frágil equilibrio. La resistencia a cargas estáticas define el umbral inicial, pero son los mecanismos de degradación sinérgica los que dictan la vida útil real.

Se sugieren mejoras al material como su interacción entre resina y fibra, ya que el tipo de falla más común observado el material TriLor® era falla adhesiva. Una falla entre las dos interfases (estructura y acrílico) existe la posibilidad que, al mejorar esta falla, su resistencia aumente significativamente, además las fibras de la estructura quedaban expuestas sin presentar fractura posiblemente debido a su falta de unión entre resina y fibras. (42)

7. CONCLUSIONES

Las estructuras de TriLor® con revestimiento presentaron una marcada predominancia de falla adhesiva. En el grupo de 7 mm, se identificaron 5 fallas adhesivas y una sin fallo. Por su parte, el grupo de 10 mm registró 5 fallas adhesivas y 1 cohesiva. No se observaron fallas de tipo mixto en ninguna de las muestras, evidenciando un comportamiento estructural uniforme ante la carga.

Las estructuras sin revestimiento acrílico exhibieron en su mayoría una combinación de fallas cohesivas. A diferencia de los grupos con revestimiento, estas muestras presentaron una degradación compleja de la interfase y de la matriz del tecnopolímero, evidenciando que la ausencia del componente acrílico altera la distribución de tensiones y el modo de propagación de la fractura en el material.

Como conclusiones del presente estudio, las estructuras Trilor si presentan variación dependiendo de su voladizo, se debe destacar la falla cohesiva de las estructuras en voladizos de diferentes longitudes (10 mm y 7 mm).

Se observó que la zona central mostró una mayor resistencia en comparación con los voladizos en los lados derecho e izquierdo.

Al analizar la relación entre la longitud del voladizo y la resistencia flexural de las estructuras, se concluye que aquellas con un voladizo de 7 mm presentan una mayor resistencia, según los resultados de las pruebas, además el sitio donde ocurre la fractura se observa en la parte intrínseca, no se limita a la parte superficial, sino que se origina y propaga a través del núcleo reforzado de la estructura.

8. RECOMENDACIONES

Generar macroretención modificando el diseño de la estructura y además utilizar agentes de unión como la silanización de la estructura y un medio adhesivo.

Priorizar voladizos de 7 mm o menos en las estructuras.

Se requieren más ensayos a futuro para determinar la efectividad del TriLor®, se recomienda, evaluar en pacientes la supervivencia oral de este material.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. TRILOR ® manual La solución para una odontología sin metal.
2. Adolfo Pérez Quintana G, Hernán Meneses Silva E, Judith Herrera Lara G, Ordoñez Molina A, Humberto Martínez Cajas C. Resistencia flexural de una estructura de prótesis híbrida fabricada con polímero reforzado con fibra de vidrio Trilor®.
3. Bechir F, Bataga SM, Tohati A, Ungureanu E, Cotrut CM, Bechir ES, et al. Evaluation of the behavior of two cad/cam fiber-reinforced composite dental materials by immersion tests. *Materials*. 2021 Dec 1;14(23). doi:10.3390/ma14237185
4. Alnafaiy SM, Labban N, Albaijan R, AlKahtani RN, Al-Aali KA, Abozaed HW, et al. Evaluation of Shear Bond Strength and Failure Modes of Lithium Disilicate Ceramic Veneering Material to Different High-Performance Polymers. *Polymers (Basel)*. 2025 Mar 1;17(5). doi:10.3390/polym17050554
5. Bechir F, Bataga SM, Tohati A, Ungureanu E, Cotrut CM, Bechir ES, et al. Evaluation of the behavior of two cad/cam fiber-reinforced composite dental materials by immersion tests. *Materials*. 2021 Dec 1;14(23). doi:10.3390/ma14237185
6. Panesso JD, Satizabal P, López FS. Propiedades mecánicas de una prótesis híbrida fabricada con polímero reforzado con fibra de vidrio Trilor®. 2024.
7. Haroyan-Darbinyan E, Romeo-Rubio M, Río-Highsmith J Del, Lynch CD, Castillo-Oyagüe R. Fracture resistance of cantilevered full-arch implant-supported hybrid prostheses with carbon fiber frameworks after thermal cycling. *J Dent*. 2022 Jan 1;116. doi:10.1016/j.jdent.2021.103902 PubMed PMID: 34822914.
8. Alghazzawi TF, Janowski GM, Ning H, Eberhardt AW. Qualitative SEM analysis of fracture surfaces for dental ceramics and polymers broken by flexural strength testing and crown compression. *Journal of Prosthodontics*. 2023 Jun 1;32(5):100–10. doi:10.1111/jopr.13659 PubMed PMID: 36739572.

9. Elvyra Rangel Padilla E, Alejandro Ramírez Peña H, Ramón Martínez-Menchaca H, Rivera Silva G, Valencia Hitte R, Lozano Longoria M, et al. Evaluación bajo microscopio electrónico de barrido de sellantes de fosas y fisuras hidrófobos e hidrófilos, bajo diferentes condiciones de humedad: Un estudio in vitro Artículo Original. Vol. 8. 2018.
10. Bravo Eslava LM, Gallardo Gutiérrez CA. Comparison of the porosity characteristics of Portland cement, mineral trioxide aggregate and Biodentine by scanning electron microscopy. *Revista Científica Odontológica*. 2021 Mar 11;9(1). doi:10.21142/2523-2754-0901-2021-043
11. López Espinoza JA. Análisis de eficacia de la remoción de barrillo dentinario utilizando métodos de activación: irrigación ultrasónica pasiva (PUI) y Eddy con distintos quelantes mediante una evaluación en microscopio electrónico de barrido. *OdontoInvestigación*. 2022 Apr 4;8(1). doi:10.18272/oi.v8i1.2589
12. Vahnström M, Johansson PH, Svanborg P, Stenport VF. Comparison of porcelain veneer fracture in implant-supported fixed full-arch prostheses with a framework of either titanium, cobalt–chromium, or zirconia: An in vitro study. *Clin Exp Dent Res*. 2022 Apr 1;8(2):544–51. doi:10.1002/cre2.558 PubMed PMID: 35313086.
13. Lahoud L, Boulos P, Kahale D, Gheno E, Benedicenti S, Calasans-Maia ônica D, et al. Fracture load comparison of a new Fiber-Reinforced Composite and Zirconia in All-on-Four Prosthesis: An In Vitro Study. *International Journal of Prosthodontics*. 2024 Mar;1–21. doi:10.11607/ijp.8816 PubMed PMID: 38477846.
14. Almutairi R, Alnahedh H, Maawadh A, Elhejazi A. Effects of different air particle abrasion protocols on the biaxial flexural strength and fractography of high/ultra-translucent zirconia. *Materials*. 2022 Jan 1;15(1). doi:10.3390/ma15010244
15. De Odontología F, Darbinyan EH, Castillo De Oyagüe R, Rubio MR. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID ANÁLISIS IN VITRO DE LA FIBRA DE CARBONO COMO MESOESTRUCTURA DE PRÓTESIS HÍBRIDAS IMPLANTOSOPORTADAS IN VITRO ANALYSIS OF IMPLANT-SUPPORTED HYBRID PROSTHESES WITH FIBER CARBON FRAMEWORKS MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA POR. 2021.

16. Berglundh T, Persson L, Rn Klinge B. A systematic review of the incidence of biological and technical complications in implant dentistry reported in prospective longitudinal studies of at least 5 years. *J Clin Periodontol*. 2002;29:197–212.
17. Haroyan-Darbinyan E, Romeo-Rubio M, Río-Highsmith J Del, Lynch CD, Castillo-Oyagüe R. 'Thermo-mechanical behavior of alternative material combinations for full-arch implant-supported hybrid prostheses with short cantilevers.' *J Dent*. 2023 May 1;132. doi:10.1016/j.jdent.2023.104470 PubMed PMID: 36842624.
18. Yilmaz B, Batak B, Seghi RR. Failure analysis of high performance polymers and new generation cubic zirconia used for implant-supported fixed, cantilevered prostheses. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2019 Dec 1;21(6):1132–9. doi:10.1111/cid.12844 PubMed PMID: 31642185.
19. López RB, López JO. DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA E INGENIERÍA DE MATERIALES ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UNIONES ADHESIVAS DE ACERO RECUBIERTO. 2016.
20. Darbinyan EH, Castillo De Oyagüe R, Rubio MR. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID ANÁLISIS IN VITRO DE LA FIBRA DE CARBONO COMO MESOESTRUCTURA DE PRÓTESIS HÍBRIDAS IMPLANTOSOPORTADAS IN VITRO ANALYSIS OF IMPLANT-SUPPORTED HYBRID PROSTHESES WITH FIBER CARBON FRAMEWORKS MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA POR. 2021.
21. Farawati F Al, Nakaparksin P. What is the Optimal Material for Implant Prosthesis? *Dental Clinics of North America*. W.B. Saunders; 2019. p. 515–30. doi:10.1016/j.cden.2019.02.002 PubMed PMID: 31097142.
22. Haroyan-Darbinyan E, Romeo-Rubio M, Río-Highsmith J Del, Lynch CD, Castillo-Oyagüe R. Fracture resistance of cantilevered full-arch implant-supported hybrid prostheses with carbon fiber frameworks after thermal cycling. *J Dent*. 2022 Jan 1;116. doi:10.1016/j.jdent.2021.103902 PubMed PMID: 34822914.

23. Della Bona Paula Benetti Márcia Borba Dileta Cecchetti in Biomaterials Á, Professor of Prosthodontics S, Della Bona Á, Bona DA. Restorative Dentistry Flexural and diametral tensile strength of composite resins Restorative Dentistry.
24. Faggion CM. Guidelines for reporting pre-clinical in vitro studies on dental materials. Journal of Evidence-Based Dental Practice. 2012;12(4):182–9. doi:10.1016/j.jebdp.2012.10.001 PubMed PMID: 23177493.
25. Khosroabadi M, Khosroabadi E. Effect of surface treatments on the bond strength between high-performance polymers (PEEK/PEKK) and acrylic resin materials: A systematic review and meta-analysis. International Journal of Adhesion and Adhesives. Elsevier Ltd; 2026. doi:10.1016/j.ijadhadh.2025.104206
26. Molitor P, Young T. Adhesives bonding of a titanium alloy to a glass fibre reinforced composite material. International Journal of Adhesion & Adhesives. 2002.
27. Zhang YL, Zhang Y, Ru C, Chen BK, Sun Y. A load-lock-compatible nanomanipulation system for scanning electron microscope. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2013;18(1):230–7. doi:10.1109/TMECH.2011.2166162
28. Yolanda Cabrera Ruiz V, Rodrigo Guerrero Nilve W, Jeaneth Aguilar Córdova M, Aracely Cedeño Zambrano D, del Carmen Armas Vega A. 82 ESTÉTICA Y OPERATORIA DENTAL Estudio con Microscopio Electrónico de Barrido Study through the scanning electron microscope. Revista "ODONTOLOGÍA. 2016.
29. EM_Sample_Preparation_Brochure_Workflows_Material_Sciences_EN.
30. Ureta N, Silva C. Comparison of film thiCkness of two adhesive systems observed in sCanning eleCtron miCrosCope [Internet]. Available from: <http://www.rodyb.com/nivelacion-no-quirurgica/>
31. Lindau B, Dietz W, Lundgren T, Storhaug K, Rgen JÈ, Nore G. Discrimination of morphological ®ndings in dentine from osteogenesis imperfecta patients using combinations of polarized light microscopy, microradiograhpy and scanning electron microscopy. International Journal of Paediatric Dentistry. 1999.
32. Hassan MK. Characterization of Face Sheet/Core Debonding Strength in Sandwiched Medium Density Fiberboard. Materials Sciences and Applications. 2017;08(09):673–84. doi:10.4236/msa.2017.89048

33. Gil L, Staia MH. Influence of HVOF parameters on the corrosion resistance of NiWCrBSi coatings. *Thin Solid Films*. 2002.
34. Cherkassky A, Bumagin E. A Combined Discrete Event—Agent Based Approach to Modeling Tensile Strength of One-Dimensional Fibrous Materials. *Face Validation and Effect of the Basic Model Parameters. Journal of Textile Science and Technology*. 2015;01(02):45–64. doi:10.4236/jtst.2015.12006
35. Talreja R. Assessment of the fundamentals of failure theories for composite materials. *Composites Science and Technology*. Elsevier Ltd; 2014. p. 190–201. doi:10.1016/j.compscitech.2014.10.014
36. Merola C, Cheng HW, Schwenzfeier K, Kristiansen K, Chen YJ, Dobbs HA, et al. In situ nano- to microscopic imaging and growth mechanism of electrochemical dissolution (e.g., corrosion) of a confined metal surface. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2017 Sep 5;114(36):9541–6. doi:10.1073/pnas.1708205114 PubMed PMID: 28827338.
37. Xin G, Yang R, Xu P. Influence of silica particle size on the corrosion behavior of electroplated silica-ni hybrid layer. *ACS Omega*. 2020 Jul 7;5(26):15983–91. doi:10.1021/acsomega.0c01248

ANEXOS



Ilustración 26 Fig 2. Mini Sputter Coater SC7620

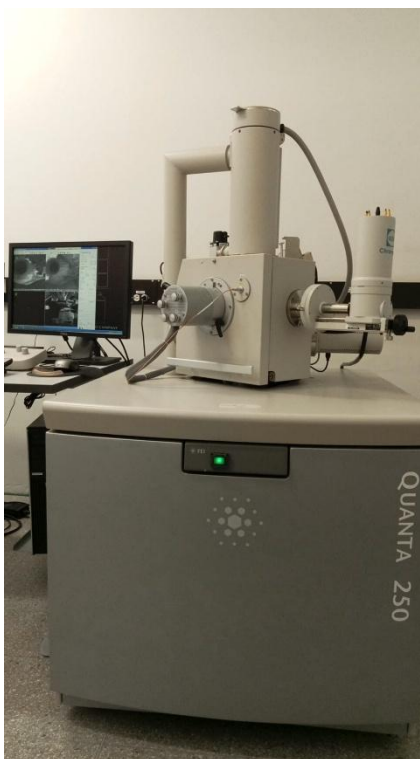


Ilustración 27 Fig 3. Microscopio electrónico de barrido (FEI, modelo Quanta 250), Universidad de Caldas