



FACULTAD DE MEDICINA Y ODONTOLOGÍA

TRABALLO DE FIN DE GRAO

Impacto de la posición de impresión en la precisión de férulas quirúrgicas utilizadas en procedimientos odontológicos guiados: análisis comparativo y recomendaciones clínicas.

Impacto da posición de impresión na precisión das férulas quirúrxicas utilizadas en procedementos dentais guiados: análise comparativa e recomendacións clínicas.

Impact of impression position on the precision of surgical splints used in guided dental procedures: comparative analysis and clinical recommendations.

Autor/a/es/as: Pedro Salgado Freire

Titor/a: Manuel Ruiz Piñón

2º Titor/a: Luisa María Seoane Camino

Departamento: Patología y terapéutica dental

XUÑO 2025

Agradecimientos:

Quisiera comenzar estos agradecimientos expresando mi más profunda gratitud a mis padres y familia. Gracias por vuestro apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado y por darme la oportunidad de estudiar lo que realmente me apasiona. Sin vosotros, nada de esto habría sido posible. Nunca me ha faltado de nada, y eso es un privilegio que he tenido siempre. Gracias, papá, además, por tu consejo durante la elaboración de este trabajo.

También quiero agradecer de corazón a mi abuelo, que desde pequeño me ha transmitido valores fundamentales que me acompañan en cada etapa: el trabajo duro, la perseverancia, la competencia, la lucha constante, el saber liderar... Gracias a ti descubrí y pude practicar durante todos estos años la vela, un deporte que me ha dado tanto y que sigue siendo una parte esencial de mi vida.

A mis amigos, tanto de Vigo como de Santiago, gracias por estar siempre ahí. Y a los que estáis en cada momento importante: Pablo, Lara, Ana, Icíá, Carla, Gema... Gracias por vuestro cariño, apoyo y risas. En especial, a Pablo, gracias por estar a mi lado desde que tenemos tres años y por seguir siendo igual de buenos amigos que entonces. A Lara, por estar conmigo desde el primer día, hace ya cinco años. Y a Ana, mi alma gemela, a quien este año he podido descubrir aún más y con quien he compartido momentos que nunca olvidaré.

También agradecer a los laboratorios y profesionales que han colaborado en la realización de este trabajo: Luis de Innovadental, Eliseo Vidal, Hernán... gracias por aportar vuestro granito de arena y disposición. Sin vuestra colaboración, este trabajo no habría sido posible.

Quiero dar también las gracias a todos los profesores que habéis formado parte de este camino. Es un honor que algunos de vosotros tengáis tanta dedicación y paciencia para formarnos, empleando cada minuto de vuestro tiempo. Además, es un orgullo poder compartir especialidad con bastantes de vosotros. Son el Dr. Manuel Ruiz (tutor de este trabajo, además de ser una persona que desde el minuto uno que lo conocí supe que comparte muchos de mis valores y con quien conecté especialmente), el Dr. Pablo Castelo (por su profesionalidad, amor por la odontología, dedicación, y porque, aunque sea durillo en prácticas, salimos así gracias a ello), la Dra. Sandra García (por su paz y amor a la hora de transmitir conocimientos), la Dra. Mareque (por ser mi tutora de prácticas durante todo el cuarto curso), el Dr. Ramón Miguens (por ser un gran profesional y acompañarme en este último año), el Dr. Benito Rilo y Dra. Laura Lago (dos profesores que siempre muestran buena cara y mucha paz para transmitir), el Dr. Gonzalo López Castro (una de las personas con menos tiempo disponible en su agenda y que más se involucra a la hora de ayudar a los alumnos, tanto curricularmente como de manera extracurricular), el Dr. David Fernández Millán (aunque solo viniese una vez cada 15 días, por los conocimientos, el buen rollo que transmite y la sonrisa que se nos pone cada vez que viene a prácticas), y el Dr. Bernardo Porto (que aunque no forme parte de la USC, como vicepresidente de AEOS estoy encantado por su disposición, ayuda y nunca tener un no como respuesta). Espero no olvidarme de ninguno, y solo os puedo decir: muchas gracias por acompañarme en este camino.

Resumen

Introducción:

En la odontología actual, las férulas quirúrgicas impresas en 3D son herramientas clave en la planificación y ejecución de procedimientos odontológicos guiados, tales como implantes y endodoncia guiada. Aumentan la precisión dimensional y la seguridad del procedimiento para garantizar un correcto ajuste y una mejor funcionalidad clínica.

Gracias a la tecnología 3D, es posible fabricar férulas personalizadas en las que se insertan diferentes accesorios como puede ser el casquillo en endodoncia guiada, y la cual se adapta con gran exactitud a la anatomía del paciente, minimizando errores humanos y mejorando los resultados clínicos. Además, la utilización de estas férulas reduce el tiempo operatorio y disminuye el riesgo de complicaciones, contribuyendo a un tratamiento más predecible y sencillo tanto a nivel profesional como del paciente.

Objetivos:

El objetivo del estudio es evaluar el impacto de la angulación de impresión sobre la precisión dimensional de las férulas quirúrgicas, analizando parámetros como dureza, fuerza de inserción del casquillo y dimensiones en diferentes puntos de la férula.

Material y métodos:

Se utilizó una muestra de 15 férulas agrupadas en cinco modelos diferentes de impresoras 3D de resina, divididas a su vez en tres grupos según angulaciones de impresión: 0°, 45° y 90°. Se aplicó un protocolo para controlar variables externas (homogeneización de resina, temperatura, altura de capa, post-curado y lavado) asegurando que la angulación fuera la única variable independiente. Las mediciones se realizaron con durómetro para la dureza, un dinamómetro para la fuerza de inserción y un micrómetro para las diferentes dimensiones. También se compararon medidas físicas con las del modelo digital STL mediante software especializado.

Conclusiones:

Considerando las limitaciones del estudio, se concluye que la dureza de las férulas impresas es mayor y más consistente a 45°, cumpliendo con la dureza mínima recomendada. Las mediciones dimensionales muestran que la angulación de 45° presenta menor error y mayor estabilidad en comparación con 0° y 90°, siendo esta última la que mayor discrepancia y fuerza de encaje del casquillo genera, lo que puede dificultar la manipulación. Además, la longitud entre casquillo y férula se ajusta mejor al modelo digital con la impresión a 45°. Por tanto, la angulación de 45° representa un equilibrio óptimo entre dureza, precisión y fuerza de encaje, recomendándose para la fabricación de férulas guiadas. Estos resultados coinciden con estudios previos que destacan la superioridad de ángulos intermedios en la impresión 3D dental.

Palabras clave: Férula, Endodoncia guiada, Angulación, Precisión, Impresión 3d, Ángulo de impresión.

Resumo

Introdución:

Na odontoloxía actual, as férulas cirúrxicas impresas en 3D son ferramentas clave na planificación e execución de procedementos odontolóxicos guiados, tales como implantes e endodoncia guiada. Aumentan a precisión dimensional e a seguridade do procedemento para garantir un correcto axuste e unha mellor funcionalidade clínica.

Grazas á tecnoloxía 3D, é posible fabricar férulas personalizadas nas que se inseren diferentes accesorios como pode ser o casquillo en endodoncia guiada, e a cal se adapta con gran exactitude á anatomía do paciente, minimizando erros humanos e mellorando os resultados clínicos. Ademais, a utilización destas férulas reduce o tempo operatorio e diminúe o risco de complicacións, contribuíndo a un tratamento máis predicible e sinxelo tanto a nivel profesional como do paciente.

Obxectivos:

O obxectivo do estudo é avaliar o impacto da angulación de impresión sobre a precisión dimensional das férulas cirúrxicas, analizando parámetros como dureza, forza de inserción do casquillo e dimensións en diferentes puntos da férula.

Material e métodos:

Utilizouse unha mostra de 15 férulas agrupadas en cinco modelos diferentes de impresoras 3D de resina, divididas á súa vez en tres grupos segundo angulaciones de impresión: 0°, 45° e 90°. Aplicouse un protocolo para controlar variables externas (homoxeneización de resina, temperatura, altura de capa, post-curado e lavado) asegurando que a angulación fose a única variable independente. As medicións realizáronse con durómetro para a dureza, un dinamómetro para a forza de inserción e un micrómetro para as diferentes dimensións. Tamén se compararon medidas físicas coas do modelo dixital STL mediante software especializado.

Conclusións:

Considerando as limitacións do estudo, conclúese que a dureza das férulas impresas é maior e máis consistente a 45°, cumprindo coa dureza mínima recomendada. As medicións dimensionales mostran que a angulación de 45° presenta menor erro e maior estabilidade en comparación con 0° e 90°, sendo esta última a que maior discrepancia e forza de encaixe xera, o que pode dificultar a manipulación. Ademais, a lonxitude entre casquillo e férula axústase mellor ao modelo dixital coa impresión a 45°. Por tanto, a angulación de 45° representa un equilibrio óptimo entre dureza, precisión e forza de encaixe, recomendándose para a fabricación de férulas guiadas. Estes resultados coinciden con estudos previos que destacan a superioridade de ángulos intermedios na impresión 3D dental.

Palabras clave: Férula, Endodoncia Guiada, Angulación, Precisión, Impresión 3d, Ángulo de impresión.

Abstract

Introduction:

In modern dentistry, 3D printed surgical guides are key tools in the planning and execution of guided dental procedures, such as implants and guided endodontics. They increase the dimensional accuracy and safety of the procedure to ensure a correct fit and improved clinical functionality.

Thanks to 3D technology, it is possible to manufacture customized splints in which different accessories are inserted, such as the sleeve in guided endodontics, and which adapt with great accuracy to the patient's anatomy, minimizing human error and improving clinical results. Furthermore, the use of these splints reduces the operative time and reduces the risk of complications, contributing to a more predictable and simple treatment for both the professional and the patient.

Objectives:

The aim of the study is to evaluate the impact of impression angulation on the dimensional accuracy of surgical splints, analyzing parameters such as hardness, sleeve insertion force and dimensions at different points of the splint.

Materials and Methods:

A sample of 15 splints grouped into five different models of resin 3D printers was used, further divided into three groups according to printing angulations: 0°, 45° and 90°. A protocol was applied to control external variables (resin homogenization, temperature, layer height, post-curing and rinsing) ensuring that angulation was the only independent variable. Measurements were made with a hardness tester for hardness, a dynamometer for insertion force and a micrometer for the different dimensions. Physical measurements were also compared with those of the digital STL model using specialized software.

Conclusions:

Considering the limitations of the study, it is concluded that the hardness of the printed splints is greater and more consistent at 45°, complying with the minimum recommended hardness. The dimensional measurements show that the 45° angulation presents less error and greater stability compared to 0° and 90°, the latter being the one that generates the greatest discrepancy and fitting force, which can make manipulation difficult. In addition, the length between sleeve and splint is better matched to the digital model with the 45° impression. Therefore, the 45° angulation represents an optimal balance between hardness, accuracy and socket force, and is recommended for the fabrication of guided splints. These results are consistent with previous studies highlighting the superiority of intermediate angles in dental 3D printing.

Keywords: Splints, Guided endodontics, Angulation, Precision, 3d printers, Printing angle.

ÍNDICE

1	Introducción	9
1.1	Materiales requeridos	10
1.2	Técnica del procedimiento	11
1.3	Factores condicionantes de la impresión	12
1.3.1	Parámetros dependientes del hardware de impresión 3D	12
1.3.2	Parámetros específicos de la resina.....	14
1.3.3	Factores externos que afectan la precisión	14
1.4	Objetivos	15
1.4.1	Objetivo Principal.....	15
1.4.2	Objetivos Específicos	15
2	Material y métodos	16
2.1	Justificación del estudio	16
2.2	Diseño del estudio	16
2.3	Descripción de la muestra	16
2.4	Equipos y materiales empleados	17
2.5	Variables del estudio.....	17
2.6	Procedimiento experimental.....	17
2.7	Evaluación de precisión dimensional.....	19
2.7.1	Medición de fuerza	20
2.7.2	Medición de dureza	20
2.7.3	Medición dimensional del casquillo.....	20
2.8	Análisis estadístico.....	21
3	Resultados	21
3.1	Dureza	22
3.1.1	Resultados individuales por férula.....	22
3.1.2	Resultados conjuntos de las cinco férulas	24
3.2	Diámetro del casquillo (micrómetro).....	25
3.2.1	Resultados individuales por férula.....	25
3.2.2	Resultados conjuntos de las cinco férulas	29
3.2.3	Resultados comparativos de las cinco férulas con el STL	30
3.3	Dinamómetro	33
3.3.1	Resultados individuales por férula.....	33
3.3.2	Resultados conjuntos de las cinco férulas	35
3.4	Longitud del tubo de inserción del casquillo	36
3.4.1	Resultados individuales por férula.....	36
3.4.2	Resultados conjuntos de las cinco férulas	39
3.4.3	Resultados comparativos de las cinco férulas con el STL	40
4	Discusión	41
5	Conclusiones.....	46

6	Referencias bibliográficas.....	47
7	Anexos	50
7.1	Anexo 1. Procedimiento y parámetros de impresora y resina utilizados	50
7.1.1	Características para la férula 1.....	50
	.....	50
7.1.2	Características para la férula 2.....	51
	.....	51
7.1.3	Características para la férula 3.....	52
	.....	52
7.1.4	Características para la férula 4.....	53
	.....	53
7.1.5	Características para la férula 5.....	54
	.....	54
7.2	Anexo 2: Mediciones de las férulas.	55
7.2.1	Férula 1	55
7.2.2	Férula 2	56
	.....	56
7.2.3	Férula 3	57
7.2.4	Férula 4	58
7.2.5	Férula 5	59

1 Introducción

En la odontología moderna, las férulas dentales utilizadas en procedimientos guiados desempeñan un papel esencial, al proporcionar mayor precisión, seguridad y eficacia en tratamientos como gingivectomías, cirugías apicales, colocación de implantes y endodoncias. En el presente trabajo se abordará específicamente el uso de férulas en la endodoncia guiada, destacando sus ventajas, entre las que se incluyen la reducción del riesgo de perforaciones, la minimización de iatrogenias, la preservación del tejido sano, la disminución del desgaste dentario innecesario, así como la optimización del tiempo de tratamiento y la reducción del estrés operatorio.

En el contexto de la endodoncia guiada, su aplicación se centra en casos de calcificación del canal radicular, también conocida como metamorfosis cálcica. Esta condición se caracteriza por la deposición de tejido duro dentro del espacio de la cámara pulpar, lo que provoca su obliteración. Dicho fenómeno ocurre con mayor frecuencia en dientes anteriores y suele ser consecuencia de diferentes factores, como traumatismos. La obliteración del canal radicular dificulta significativamente la realización de un tratamiento endodóntico cuando este es requerido (1).

La calcificación del canal radicular que va progresivamente avanzando desde la porción coronal hacia apical, pudiendo calcificar el conducto parcial o totalmente, se considera un signo de vitalidad pulpar, a menos que exista evidencia clínica o radiográfica que indique necrosis pulpar. En este sentido, la Asociación Americana de Endodoncia (AAE) recomienda evitar cualquier tipo de intervención en dientes traumatizados, salvo en aquellos casos en los que haya signos claros de necrosis pulpar (2).

Con base en esta dificultad, la AAE, en conjunto con la Asociación Americana de Radiología Oral y Maxilofacial, recomendó en 2015 la utilización de la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) para la localización tridimensional exacta del canal radicular, dada la complejidad inherente a estos casos (1).

Para la planificación de un tratamiento de endodoncia guiada, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Diagnóstico radiológico 2D (rx periapical).
2. Diagnóstico radiológico 3D (CBCT – Cone Beam Computed Tomography -) que nos aportará los archivos DICOM.
3. Escaneado intraoral y generación de archivos STL.
4. Planificación digital mediante software especializado de implantología guiada que permite fusionar los archivos DICOM y STL.
5. Fabricación de la férula y selección de fresas y casquillos adecuados.

El uso de férulas en endodoncia guiada representa un avance significativo en la práctica clínica, permitiendo una mayor precisión en la localización de los conductos radiculares obliterados y facilitando el tratamiento en casos complejos. Su implementación, junto con el apoyo de herramientas digitales avanzadas, mejora la predictibilidad de los procedimientos y contribuye a una mejor conservación de la estructura dentaria.

Para la ejecución de un procedimiento de endodoncia guiada, es fundamental seguir una serie de pasos que garanticen la precisión y efectividad del tratamiento. A continuación, se detallan los materiales necesarios y la técnica a emplear:

1.1 Materiales requeridos

1. **Diagnóstico radiológico:** Se requiere una radiografía periapical de diagnóstico rutinaria para evaluar la morfología radicular, el nivel hasta dónde llega la calcificación en el conducto o la presencia de lesiones apicales, ya que, sin alteraciones de color o ausencia de lesión apical, la calcificación de un diente es un hallazgo casual y no es necesario realizar ningún tratamiento (3).
2. **CBCT:** Se recomienda un CBCT con un tamaño de vóxel pequeño, un campo de visión (FOV) reducido y con un sistema de reducción de artefactos, con el fin de localizar con exactitud tridimensional la posición del conducto radicular obliterado (3).
3. **Escáner intraoral o impresión analógica:** El escaneo digital puede llevarse a cabo directamente sobre la boca del paciente o bien a partir de modelos obtenidos mediante impresiones analógicas. Su realización es necesaria debido a la presencia de artefactos en el CBCT, los cuales dificultan la elaboración precisa de una férula. Por esta razón, se recurre al escáner intraoral, ya que este no presenta dichos artefactos (4).
4. **Fusión de archivos DICOM y STL:** La combinación de estos archivos permite obtener un registro preciso del paciente, lo que facilita la planificación y elaboración de la férula mediante un software especializado, como BlueSkyPlan o ImplantStation (4).
5. **Fresas:** Existen fresas de diversas longitudes y diámetros. La fresa óptima es aquella que encaja en el casquillo con la menor holgura posible y cuya longitud sea superior a la distancia desde el borde incisal hasta el punto de obliteración, permitiendo así la permeabilización del conducto. Generalmente, se emplean fresas de más de 25 mm de longitud para superar tanto el casquillo como la zona obliterada, con un diámetro máximo de 0,85 mm, ya que diámetros menores presentan un mayor riesgo de fractura (5).
6. **Casquillo:** Se recomienda el uso de casquillos de acero con una longitud de 10 mm, a pesar de que en un principio se habían empezado a utilizar casquillos con una longitud de 6 mm se demostró que cuanto más longitud tuviese este más preciso sería el tratamiento ya que la angulación a más mm varía menos grados; un diámetro externo de 4-4,5 mm y un diámetro interno entre 0,6 y 0,88 mm (de acuerdo con el diámetro de la fresa utilizada), ya que más de este grosor eliminan mucha dentina y en casos de incisivos inferiores y laterales superiores, se dice que deben tener al menos 1 mm de dentina remanente para mantener su integridad (5).
7. **Férula:** La férula debe cumplir con ciertos criterios para optimizar su precisión. Se recomienda que esté fabricada en resina transparente para permitir la visualización de un correcto ajuste de esta con los dientes, una visión continua del procedimiento. Asimismo, debe abarcar al menos tres o cuatro dientes para proporcionar estabilidad y contar con una ventana en la cara palatina que facilite la irrigación de la zona tratada (6).

1.2 Técnica del procedimiento

1. **Estudio radiológico inicial:** Se integran los archivos CBCT y STL para la planificación del tratamiento y la impresión de la férula (7).
2. **Comprobación preoperatoria:** Se verifica en el CBCT que la fresa, al introducirse en línea recta, superará la zona obliterada y permitirá la permeabilización del conducto. En ocasiones, el acceso debe realizarse desde puntos alternativos, como la cara incisal o vestibular, en lugar de las aperturas convencionales por palatino o lingual (7).
3. **No anestesiarse:** Estos dientes no tienen tejido pulpar, por lo que no es necesario anestesiarse; además, así en caso de una desviación no deseada durante el procedimiento y al acercarnos a ligamento periodontal, el paciente nos advertirá que le duele.
4. **Ameloplastia:** Se posiciona la férula en su lugar y, mediante un portaminas, se marca a través del casquillo el punto de acceso. Posteriormente, se elimina el esmalte en dicha zona con una fresa de diamante. Es común que esta zona coincida con los cíngulos, cuya alta dureza podría desviar la fresa durante el procedimiento en caso de no realizarla (5).
5. **Fresado progresivo:** Se determina la longitud de fresado y se procede de manera gradual con bajas revoluciones, irrigando continuamente con agua desde la ventana palatina. En ocasiones se puede hacer un CBCT intraoperatorio cuando dudamos que pueda existir una desviación en el plano vestibulo-palatino, ya que en la radiografía 2D solo podemos apreciar el plano mesio-distal (5).
6. **Instrumentación endodóntica:** Una vez alcanzada la permeabilidad, se introduce una lima de cateterización hasta la longitud de trabajo (LT). A partir de este punto, se continúa el procedimiento siguiendo los protocolos convencionales de tratamiento endodóntico (6).

Este protocolo garantiza la máxima precisión en la localización del conducto radicular obliterado y facilita la ejecución del tratamiento en casos de alta complejidad, asegurando la conservación de la estructura dentaria y minimizando los riesgos asociados al procedimiento.



Ilustración 1: Rx inicial del conducto calcificado.



Ilustración 2: CBCT inicial con el conducto calcificado.

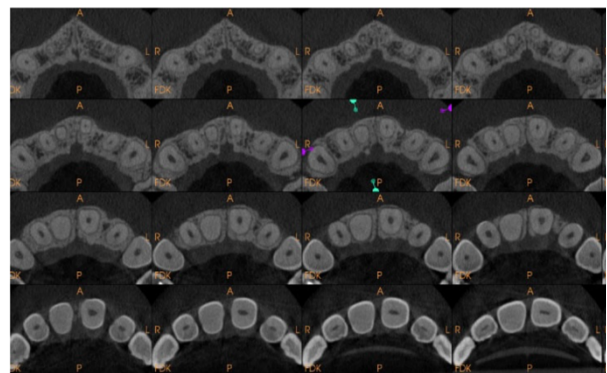


Ilustración 3: Cortes axiales del CBCT.

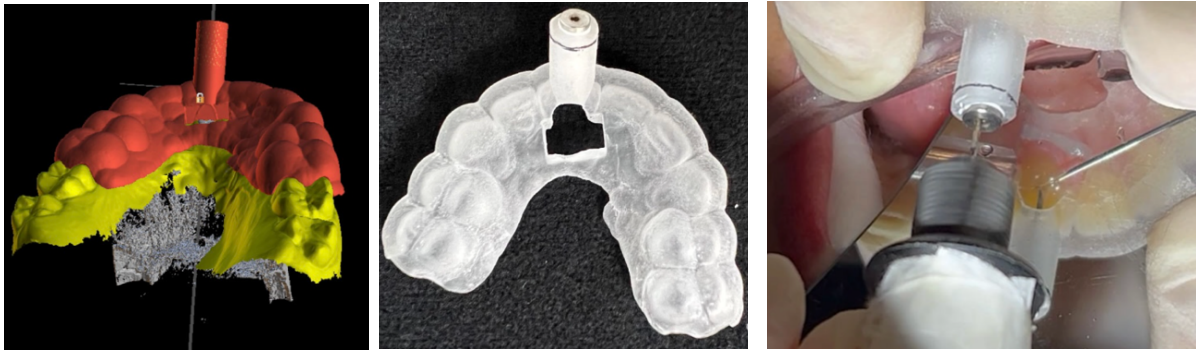


Ilustración 4: Fusión DICOM + STL. Ilustración 5: Férula impresa en resina. Ilustración 6: Procedimiento intraoperatorio.

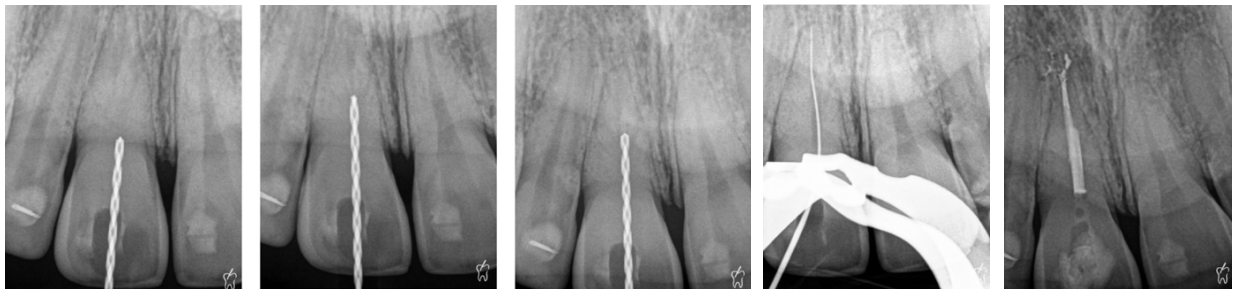


Ilustración 7: Secuencia radiográfica del fresado, sondaje y obturación final.

1.3 Factores condicionantes de la impresión

Existen diferentes factores que influyen a la hora de obtener una mayor o menor precisión a la hora de la impresión de estas férulas. Tenemos una serie de factores que dependen del propio hardware de la impresora y otros que dependen de la resina con la que imprimamos. A continuación, se exponen algunos de estos factores:

1.3.1 Parámetros dependientes del hardware de impresión 3D

Existen 3 tipos de impresoras, según la tecnología que utilizan para la obtención de modelos 3D. Las más utilizadas en impresión 3D son la FDM (Fused Deposition Modeling), basada en la extrusión de filamento termoplástico capa a capa; la SLS (Selective Laser Sintering), que utiliza un láser para sinterizar polvo polimérico o metálico; y la SLA/DLP/LCD, tecnologías basadas en resinas fotosensibles que se solidifican mediante una fuente de luz. Estas últimas, conocidas comúnmente como impresoras de resina, son las más extendidas en odontología debido a su elevada precisión, detalle superficial y versatilidad de materiales. Dentro de las impresoras de resina, diferenciamos tres tecnologías principales: SLA (Stereolithography), que utiliza un láser puntual para curar selectivamente la resina; DLP (Digital Light Processing), que proyecta una imagen completa de cada capa mediante un proyector digital; y LCD (Liquid Crystal Display), que emplea una pantalla LCD con retroiluminación LED para curar toda la capa de manera simultánea (8, 9).

Actualmente, en odontología, especialmente en la impresión de férulas, guías quirúrgicas y modelos de trabajo, la tecnología DLP se considera la más eficiente y utilizada, ya que combina alta velocidad de impresión, precisión constante en toda la superficie de construcción y compatibilidad con resinas certificadas para uso clínico, posicionándose como la opción preferente frente a SLA y LCD (10, 11, 12).

La resolución XY, también conocida como tamaño del píxel, afecta directamente a la calidad del detalle horizontal de las piezas impresas. Valores entre 35 y 50 micras (μm) son recomendables para garantizar alta precisión en restauraciones dentales, modelos anatómicos y guías quirúrgicas, pero hoy en día se aceptan valores hasta 100 μm ya que disminuyen muy poco los detalles milimétricos para tener en cuenta y aumenta la eficacia y eficiencia de los trabajos en cuanto a consumo y rentabilidad de tiempo y economía (12).

La altura de capa o “*layer height*”, desempeña un papel fundamental en la calidad superficial y la precisión dimensional en el eje vertical de las impresiones 3D. Diversos estudios han señalado que una altura de capa de 50 μm proporciona resultados óptimos, con desviaciones absolutas mínimas que oscilan entre 0,02 y 0,03 mm. Si bien es posible aumentar la altura de capa hasta 100 μm con el fin de reducir el tiempo de impresión, se ha demostrado que esto incrementa significativamente los errores dimensionales, registrándose desviaciones absolutas en el rango de 0,05 a 0,06 mm (13).

La velocidad de impresión debe adecuarse con la precisión deseada. En aplicaciones dentales, velocidades moderadas entre 20-50-80 mm/h son ideales dependiendo de la impresora empleada. Sin embargo, la velocidad de impresión siempre debe estar relacionada con el modelo y la generación de la impresora que se utilice, debido a que las impresoras más modernas alcanzan velocidades mucho mayores, llegando hoy en día hasta los 80-100 mm/h. No obstante, no se puede esperar que una impresora antigua o de menor gama alcance las velocidades de las últimas generaciones, porque podríamos disminuir significativamente la calidad de los detalles impresos. Con la evolución constante de las impresoras y las tecnologías empleadas, estas son cada vez más rápidas y eficientes, mejorando tanto la productividad como la calidad (medidas estándar recomendadas por el fabricante) (14).

El tiempo de exposición se refiere al período en que la resina queda expuesta a la fuente de luz UV para solidificarse. Este parámetro depende de la resina empleada y la tecnología de impresión; normalmente se sitúa entre 2,000-8,000 segundos para impresoras MSLA (LCD) y entre 1,000-5,000 segundos para impresoras SLA/DLP (medidas estándar recomendadas por el fabricante) (14).

La potencia y uniformidad de la fuente de luz UV determinan la homogeneidad en el curado de la resina, siendo preferibles las fuentes LED de alta potencia con distribución uniforme en caso de utilizar una plataforma de rotación con luz UV. La estación de curado de fotos en presencia de gas nitrógeno ha demostrado ser más eficaz y útil para la adopción de férulas con uso humano (15).

Por lo que, a modo de conclusión entre los parámetros y cuidados mencionados anteriormente y más factores que se citan más adelante en el proceso experimental son fundamentales para mantener la estabilidad y precisión clínica requerida.

1.3.2 Parámetros específicos de la resina

Las resinas utilizadas en impresión 3D dental deben seleccionarse según su biocompatibilidad (clase I o IIa según ISO 10993), su aplicación clínica específica y sus propiedades mecánicas. Las resinas biocompatibles son imprescindibles para dispositivos como férulas, guías quirúrgicas y restauraciones provisionales, ya que presentan baja contracción durante la polimerización, lo que garantiza un ajuste preciso (16).

En términos de dureza y flexibilidad, para guías quirúrgicas y modelos dentales se recomiendan resinas con dureza Shore D ≥ 80 , mientras que en férulas o protectores bucales se busca un equilibrio entre rigidez y flexibilidad para evitar fracturas por estrés funcional. Además, parámetros como el alargamiento a la rotura (4-7%), la resistencia a la flexión (superior a 50 MPa), la fuerza de tracción y la viscosidad condicionan la funcionalidad del material (13).

El curado final debe realizarse con luz UV de 385–405 nm, una longitud de onda específica compatible con la resina mediante cámaras específicas, asegurando así una polimerización completa y estabilidad dimensional (17).

1.3.3 Factores externos que afectan la precisión

La precisión de las piezas impresas en 3D también puede verse influida por factores ambientales como la temperatura y humedad del entorno de trabajo, siendo lo ideal mantener condiciones constantes entre 20-25°C y entre un 30-50% de humedad (26). La nivelación adecuada de la plataforma de impresión es crítica para evitar errores de adhesión y pérdida de precisión. Por último, la calidad del archivo STL original es determinante, ya que un diseño incorrecto puede comprometer directamente el resultado final obtenido.

En definitiva, para obtener resultados de máxima precisión en odontología digital es fundamental controlar todos estos parámetros técnicos y ambientales, seleccionando equipos con resoluciones inferiores a 50 μm en XY, alturas de capa idealmente de 50 μm pudiendo llegar hasta las 100 μm , pero siempre teniendo en cuenta la precisión que necesite el profesional, ya que con el aumento de la altura de capa reduciremos la precisión.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Principal

Evaluar la influencia que ejerce la angulación de impresión en 3 posiciones diferentes (0° , 45° y 90°) sobre la precisión dimensional de férulas para endodoncia guiada fabricadas mediante impresión 3D.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la variación de dureza de las férulas impresas en función de la angulación de impresión y su posible impacto en la estabilidad y ajuste del casquillo.
2. Evaluar las diferencias dimensionales en el diámetro externo del casquillo a dos alturas y longitud del tubo de inserción del casquillo entre las tres posiciones de impresión (0° , 45° y 90°) y posteriormente su correspondencia con las medidas digitales del modelo STL original, evaluando las posibles discrepancias.
3. Determinar la fuerza requerida para la inserción del casquillo en las propias férulas impresas a diferentes angulaciones, identificando la angulación que genera mayor facilidad de encaje sin comprometer la precisión.
4. Identificar la angulación óptima que proporcione un balance favorable entre dureza, precisión dimensional y fuerza de inserción para establecer un protocolo de impresión estandarizado.

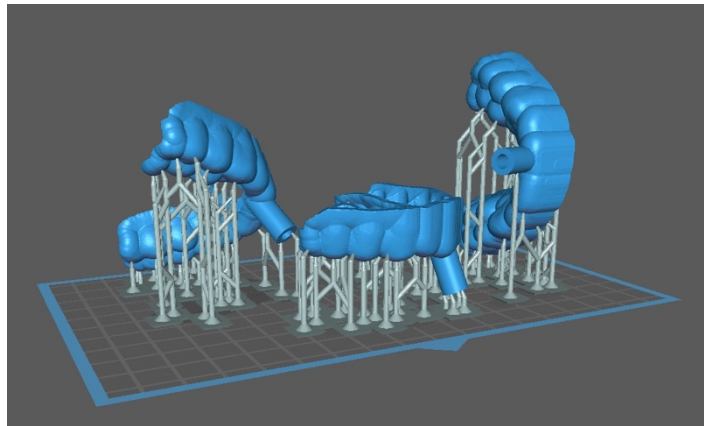


Ilustración 8: Férulas en el software anguladas a 0° , 45° y 90°

2 Material y métodos

2.1 Justificación del estudio

El presente estudio surge como respuesta a una problemática observada frecuentemente en el ámbito clínico odontológico relacionada con las férulas de endodoncia guiada impresas en 3D. En ocasiones usando la misma impresora, tinta y resto de parámetros durante la impresión de las férulas se producen clínicamente variaciones en la resistencia de inserción del casquillo, es decir, en ocasiones dicho casquillo tiene cierta holgura y otras veces sucede lo contrario y es necesario hacer una gran presión para poder introducir el casquillo en el lecho de la férula.

Ante esta situación, se formuló la hipótesis inicial basada en observaciones clínicas y prácticas protésicas: los laboratorios protésicos, en busca de maximizar la producción y reducir costos de impresión (tanto en consumo de resina como en aprovechamiento del espacio de impresión), tienden a imprimir las férulas principalmente en posición vertical (90°) o en posiciones anguladas intermedias (como 45°). Esta elección, aunque podría parecer económicamente favorable, podría estar afectando directamente la precisión dimensional en el lecho donde se inserta el casquillo y, por tanto, la eficacia clínica de las férulas.

Por lo tanto, el objetivo principal del estudio fue determinar experimentalmente cómo influye la angulación de impresión en la precisión dimensional de las férulas impresas en 3D. A partir de estos resultados, se pretende aportar una recomendación sólida que permita a los laboratorios protésicos informarse sobre la angulación de impresión más precisa desde un punto de vista dimensional y clínico, priorizando así la calidad del tratamiento sobre factores meramente económicos.

2.2 Diseño del estudio

Se llevó a cabo un estudio experimental con la finalidad de evaluar detalladamente la influencia que ejerce la angulación durante el proceso de impresión 3D sobre la precisión dimensional de férulas dentales utilizadas habitualmente en procedimientos odontológicos guiados. Se planteó un diseño comparativo utilizando tres posiciones específicas y claramente diferenciadas: 0°, 45° y 90°, usando el mismo casquillo de acero inoxidable en todos los casos, para valorar el ajuste y fuerza necesaria en su inserción en cada férula.

2.3 Descripción de la muestra

Se elaboraron un total de 15 muestras de férulas dentales, divididas en tres grupos según la angulación mencionada anteriormente. En todos los casos, se tuvo especial cuidado en colocar los soportes externos únicamente en las áreas que no afectaran las caras oclusales internas dentales, así como tampoco las dimensiones y direcciones del casquillo guía, con el propósito de evitar interferencias que pudieran afectar la validez de los resultados obtenidos de la medición.

2.4 Equipos y materiales empleados

Las impresiones se realizaron con 5 impresoras diferentes:

- Photon M3 Max (Anycubic Technology Co., Shenzhen, China)
- D4K Pro (EnvisionTEC GmbH, Gladbeck, Alemania)
- Versus 4K (Microlay, Valladolid, España)
- Dental NBEE 2 (Uniz Technology LLC, San Diego, CA, EE. UU.)

El software empleado para la preparación digital implicó procesos específicos en cada máquina, incluyendo el zocalado y posicionamiento de los modelos en la plataforma de impresión de acuerdo con los requerimientos particulares de cada impresora. Se emplearon varios tipos de resinas:

- ABS Standard LCD Resin (Anycubic Technology Co., Shenzhen, China)
- E1-E Model Light (EnvisionTEC GmbH, Gladbeck, Alemania)
- KeyGuide (Keystone Industries, Gibbstown, NJ, EE. UU.)
- KeyPrint KeyModel Ultra (Keystone Industries, Gibbstown, NJ, EE. UU.)

2.5 Variables del estudio

1. Variables independientes: Angulación de impresión (0°, 45°, 90°).
2. Variables dependientes: Precisión dimensional, fuerza requerida para inserción del casquillo, dureza de la resina impresa, diámetro externo y longitud del tubo de inserción del casquillo.
3. Variables controladas: Temperatura de impresión constante (entre 27 y 30°C), altura de capa uniforme de 50-100 micras, tiempos estandarizados de curado y lavado, además de un protocolo riguroso de preparación de la resina mediante agitación previa.

2.6 Procedimiento experimental

En el presente estudio, la impresión de las férulas se llevó a cabo bajo condiciones controladas, manteniendo constantes los parámetros de impresión a lo largo de todas las pruebas. Se estandarizó de manera meticulosa el proceso completo de pre-impresión, impresión y post-impresión, con el objetivo de minimizar al máximo las posibles fuentes de error y variabilidad. La única variable experimental correspondió a los diferentes modelos de impresoras utilizadas, abarcando desde equipos básicos hasta dispositivos profesionales, en consonancia con la heterogeneidad de impresoras y resinas empleadas en los distintos laboratorios. Para mayor precisión y transparencia, en los anexos se describen detalladamente las marcas y modelos de impresoras, los parámetros específicos de impresión, así como las características de las resinas utilizadas y el protocolo seguido en cada fase del procedimiento.

Las férulas fueron impresas manteniendo una estandarización de parámetros técnicos, con la única excepción de la variable estudiada (la angulación). Previo a cada impresión, la resina fue homogeneizada cuidadosamente mediante agitación manual con una espátula específica. La impresión se realizó a temperatura controlada (25-27°C), con una resolución de capa establecida entre 50-100 micras.

El proceso post-impresión se llevó a cabo para todas las muestras, pero cada laboratorio tiene sus protocolos de curado y lavado aplicando:

1. Retirada de la estructura de soportes, ya que para la utilización de estas férulas y el encaje en la boca del paciente necesitamos retirar los pies de apoyo bien con una espátula, disco de diamante o cualquier objeto punzante en la impresión que hemos empleado para que la férula por gravedad y apoyos se haya podido elaborar en la impresora (15).
2. Lavado de la muestra, en la que el objetivo principal es eliminar los residuos de resina no polimerizada que permanecen en la superficie. Este paso resulta fundamental no solo para preservar las propiedades mecánicas y dimensionales del modelo, sino también para mejorar su biocompatibilidad, al reducir la presencia de monómeros residuales que podrían aumentar la citotoxicidad. Aunque muchos fabricantes no divulgan la composición exacta de las soluciones de limpieza por razones de confidencialidad, actualmente existe un consenso en el sector sobre el uso generalizado de alcohol isopropílico al 99,9 % como agente limpiador estándar (15).

El control del tiempo de exposición durante el lavado es igualmente crítico. Si el lavado es insuficiente (inferior a 2–3 minutos), pueden quedar residuos que comprometan tanto la exactitud como la seguridad biológica del dispositivo. En cambio, una exposición excesiva podría afectar negativamente a la integridad mecánica del material impreso y aumentar su citotoxicidad. Además, se ha observado que los sistemas de limpieza por ultrasonidos ofrecen mejores resultados en términos de eliminación de residuos y mantenimiento de las propiedades del modelo, en comparación con sistemas rotatorios convencionales (15).

3. Curado del modelo, que tiene como finalidad completar la polimerización de los monómeros presentes en la resina impresa, favoreciendo la formación de redes poliméricas estables y mejorando el grado de reticulación del material. Esto se debe a que, durante la impresión, no siempre se alcanza una conversión total de monómeros. Para ello, las condiciones del proceso deben regularse cuidadosamente en cuanto a temperatura, duración y sistema empleado (15).

Existen dos sistemas de post-curado comúnmente utilizados: por un lado, las estaciones UV equipadas con plataformas giratorias que exponen homogéneamente el modelo a una fuente de luz ultravioleta; por otro, las cámaras de polimerización que funcionan mediante la proyección de aproximadamente 1000 fotos en un entorno con gas nitrógeno. En ambos casos, el tiempo de exposición resulta determinante: se recomienda una duración de 4 a 5 minutos para las estaciones UV convencionales, y entre 2 y 3 minutos en el caso de cámaras de fotos controlados en presencia de gas, ya que una exposición insuficiente podría dejar la resina con una textura blanda y deformable, mientras que un exceso de curado puede comprometer su estabilidad dimensional y aumentar su fragilidad. Asimismo, un post-curado óptimo contribuye a reducir el efecto de anisotropía observado en diversas investigaciones (15).

Respecto a la temperatura, se considera que un valor cercano a los 66 °C resulta ideal para garantizar la estabilidad estructural del modelo. Temperaturas significativamente superiores pueden disminuir la viscosidad de la resina curada y deteriorar su integridad (15).

4. Pulido de la superficie.

2.7 Evaluación de precisión dimensional

La precisión dimensional se evaluó mediante tres procedimientos:

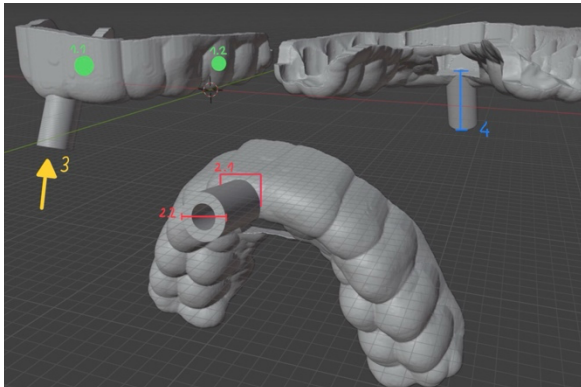


Ilustración 9: Diferentes puntos tomados para medición.



Ilustración 10: Aparatos de medida utilizados, de izqda. a dcha.: Dinamómetro, Micrómetro, Durómetro y Pie de rey.

En esta imagen podemos observar las mediciones que se han realizado. La medición de la dureza representado con el numero 1.1 y 1.2 con el durómetro shore A; la medición de los diámetros con el micrómetro representados con el 2.1 y 2.2; la medición de la fuerza ejercida por el casquillo con el dinamómetro representada con el número 3 y por último la medición con el micrómetro de la longitud del tubo de inserción del casquillo representada con el número 4.

Además, estas medidas, también se han corroborado, medido y comparado a través de la medición de la malla en el software de Meshmixer y Meshlab.

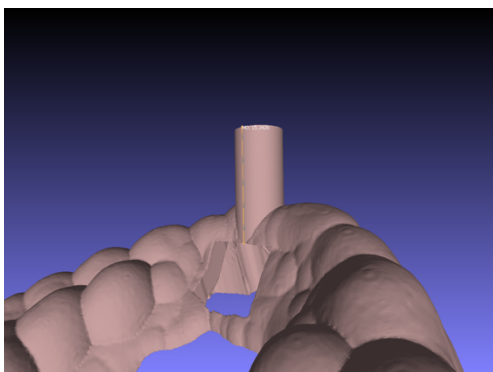


Ilustración 11: Longitud casquillo-férula

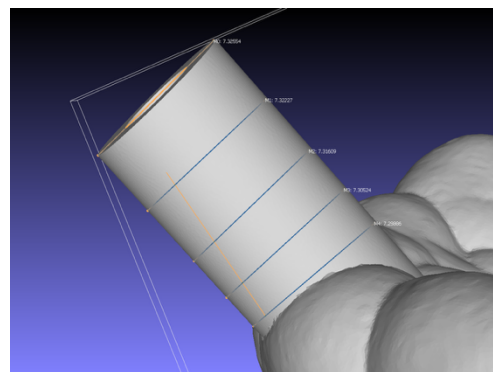


Ilustración 12: Diámetro del casquillo

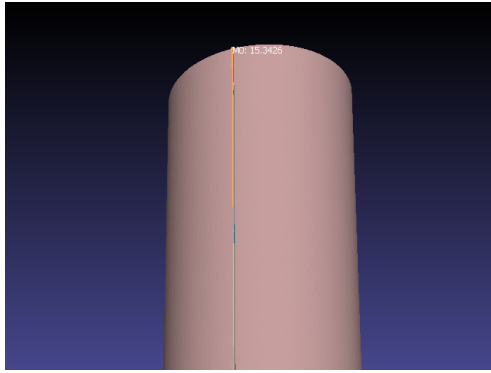


Ilustración 13: Medición longitud casquillo-férula

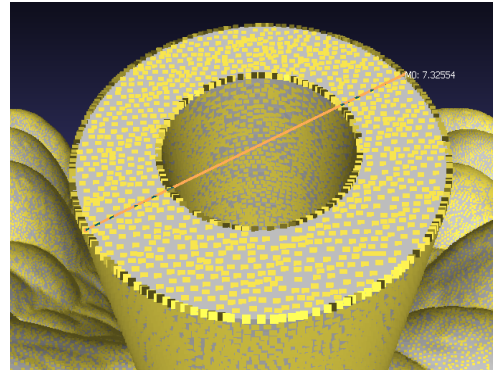


Ilustración 14: Medición diámetro casquillo

2.7.1 Medición de fuerza

Todas las férulas fueron posicionadas mediante un adaptador impreso en 3D para asegurar la entrada del casquillo totalmente perpendicular y así poder medir la fuerza con la que entra dicho elemento.

La fuerza necesaria para insertar el casquillo fue medida con un dinamómetro push-pull digital de alta precisión, con capacidad máxima de 5 newtons.

2.7.2 Medición de dureza

Otro parámetro muy importante es la dureza de la resina utilizada, ya que cuanto más blanda, más se puede dilatar para la entrada de dicho casquillo y menos fuerza ejercerá este, pudiendo producirse alguna holgura, sobre todo tras inserciones repetidas.

La dureza de la resina fue determinada utilizando un durómetro digital Shore A, específico para evaluar la dureza de gomas y plásticos, con una escala de 0-100 según la rigidez del material.

2.7.3 Medición dimensional del casquillo

Se realizaron diferentes mediciones externas del diámetro y longitud del tubo de inserción del casquillo. En cuanto a estas medidas, fueron realizadas en diferentes puntos y alturas, para determinar la posible diferencia de estas medidas en diferentes puntos de la guía del casquillo, y como explicamos posteriormente, se medirán 30 veces en cada uno de estos puntos.

La medición de estos milímetros se ha realizado con un micrómetro digital de precisión hasta 0,001 mm.

Las dimensiones obtenidas fueron comparadas directamente con las medidas del archivo STL original, para saber la discrepancia que existe entre la medición de estos parámetros en el propio software y en las férulas impresas físicamente.

2.8 Análisis estadístico

La estadística inferencial empleada en estudios científicos se fundamenta en gran medida en el Teorema del Límite Central y la Ley de los Grandes Números. Según estos principios estadísticos, cuando se generan múltiples muestras aleatorias de una misma población y se obtienen sus medias, estas medias tienden a distribuirse normalmente siempre que el número de muestras sea suficientemente grande. Generalmente, se acepta que, a partir de 30 mediciones por cada condición o punto experimental, la distribución resultante se aproxima significativamente a una distribución normal (gaussiana), lo que permite la aplicación válida y fiable de técnicas estadísticas inferenciales (18).

En el contexto de la impresión dental 3D en odontología, la precisión y la repetibilidad de las mediciones son fundamentales para garantizar la calidad de los modelos impresos y su aplicabilidad clínica. Por esta razón, y con base en el artículo revisado, se realizarán al menos 30 repeticiones por cada medición experimental para obtener valores medios representativos, reducir el impacto de posibles errores aleatorios y valores atípicos, y asegurar la robustez y confiabilidad estadística de los resultados finales obtenidos.

3 Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada variable a evaluar: dureza (representada por el número 1.1 y 1.2), diámetro del casquillo representada a nivel oclusal por el 2.2 y a nivel de la base de la férula representada con el 2.1, medido con el micrómetro, fuerza de inserción con la que se introduce el casquillo medida con el dinamómetro y longitud del tubo de inserción del casquillo medida también con el micrómetro por palatino, en relación con la angulación de cada férula (0°, 45° y 90°).

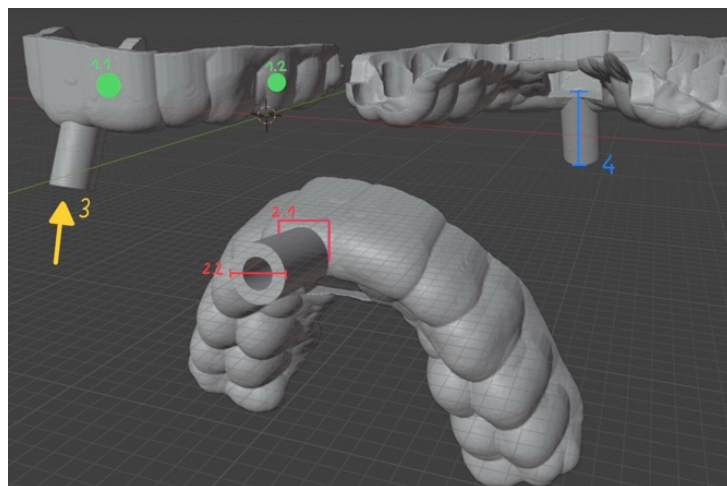


Ilustración 15: Medidas tomadas para la elaboración de los resultados.

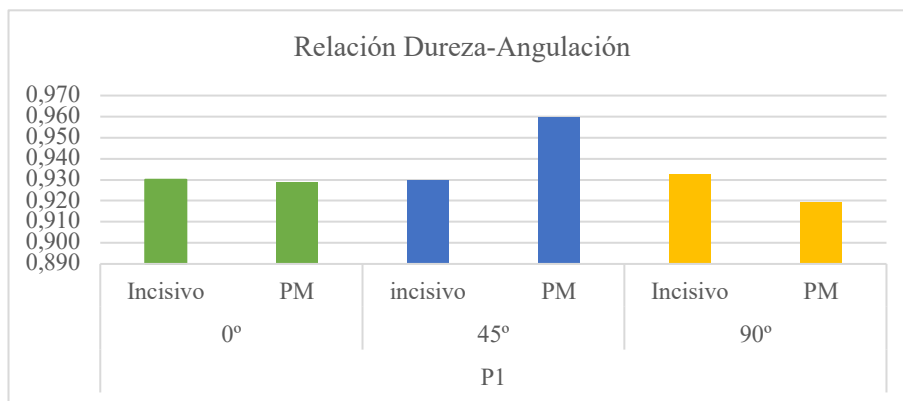
3.1 Dureza

3.1.1 Resultados individuales por férula

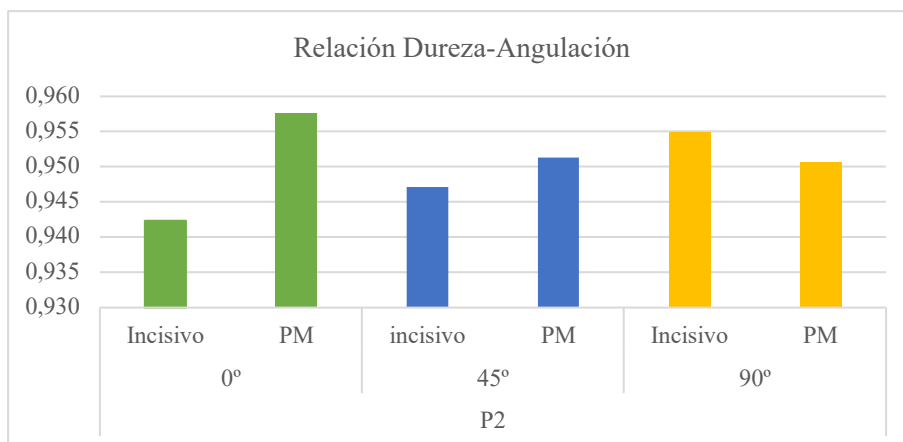
En la parte inferior se agrupan las cinco gráficas correspondientes a los valores medios de dureza medidos con el durómetro Shore A para cada férula en dos puntos anatómicos (incisivo 11 y premolar 15) y en las tres angulaciones de impresión (0° , 45° y 90°).

Aunque estas gráficas permiten observar pequeñas variaciones entre zonas anatómicas y ángulos de impresión, todos los valores se encuentran dentro de un rango estrecho y consistente, cumpliendo con creces la dureza mínima recomendada para férulas y aparatología impresa en odontología, que debe ser superior a 80D.

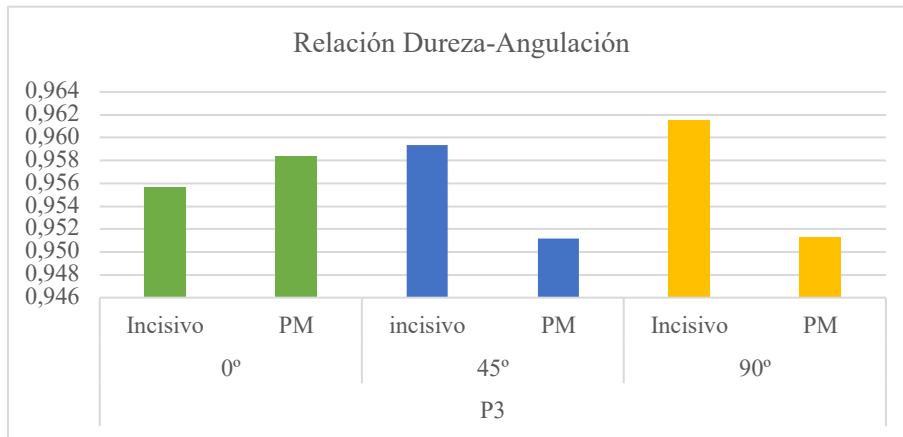
Por tanto, si bien se aprecian oscilaciones en los valores tomados entre la dureza mínima y máxima de cada férula —siendo el valor más bajo de 0,919HA y el más alto de 0,969HA—, todas las piezas evaluadas presentan una dureza adecuada y clínicamente válida para su uso intraoral.



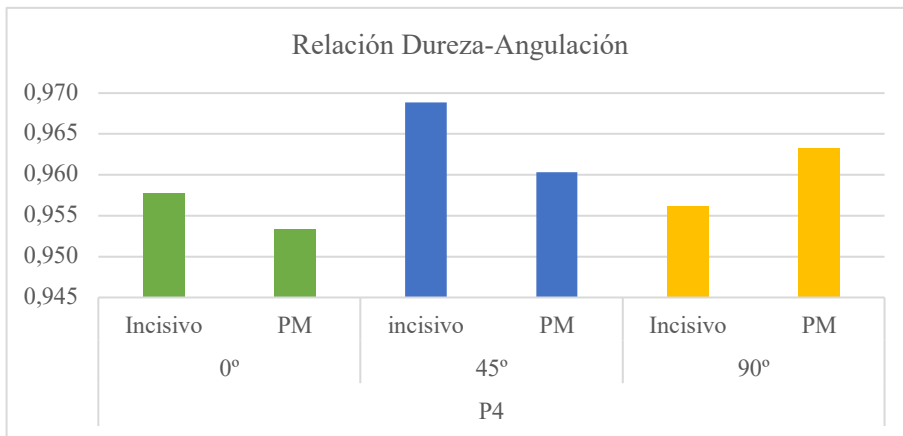
Gráfica 1: Comparación para la férula 1 de la dureza en dos puntos y la angulación.



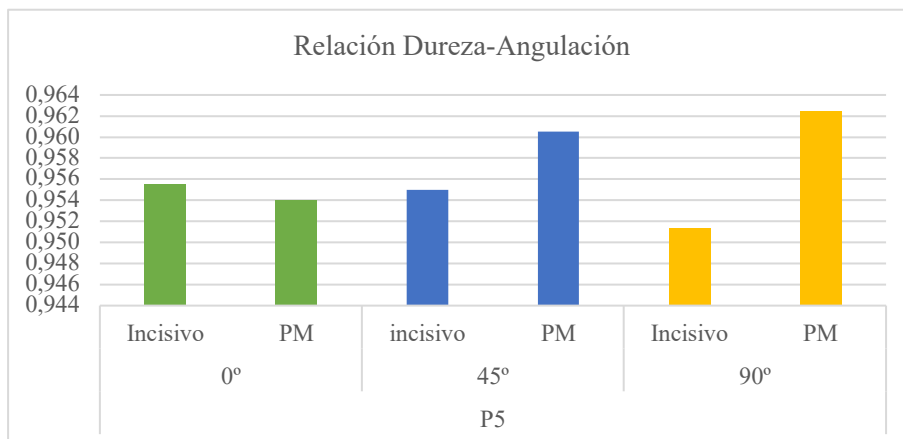
Gráfica 2: Comparación para la férula 2 de la dureza en dos puntos y la angulación.



Gráfica 3: Comparación para la férula 3 de la dureza en dos puntos y la angulación.



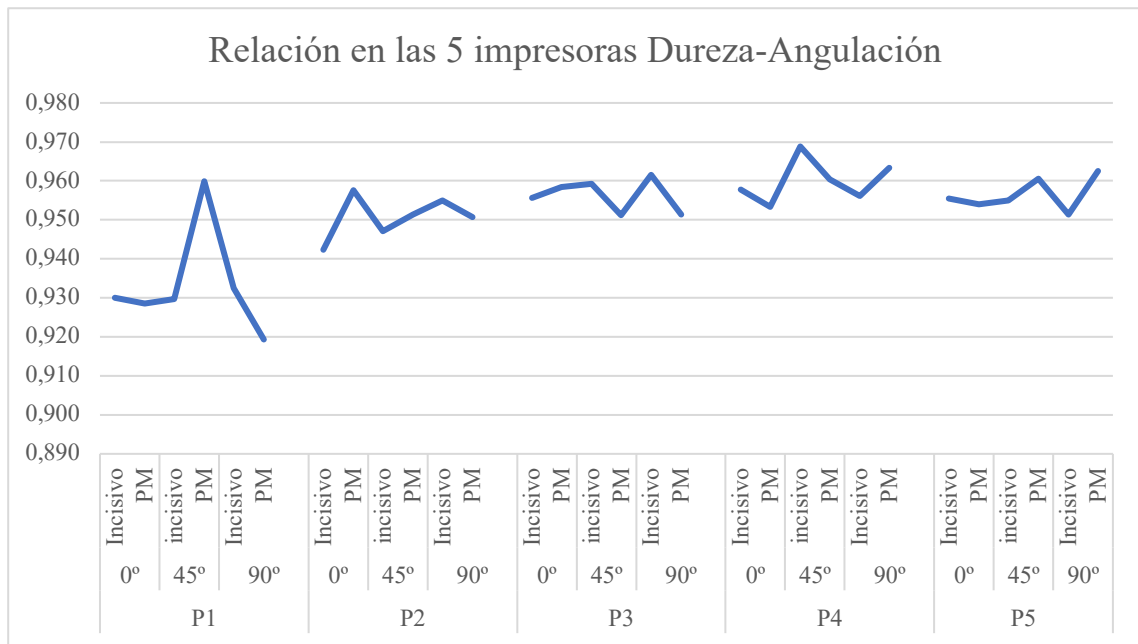
Gráfica 4: Comparación para la férula 4 de la dureza en dos puntos y la angulación.



Gráfica 5: Comparación para la férula 5 de la dureza en dos puntos y la angulación.

3.1.2 Resultados conjuntos de las cinco férulas

En la gráfica 6, tenemos mostrada la comparativa entre las cinco impresoras (P1–P5), se presentan los valores igual que en las anteriores gráficas, pero en esta observándolos en conjunto. La impresora P1 muestra los valores más bajos del conjunto, con medias de 0,930HA y 0,929HA a 0°, 0,930HA y 0,960HA a 45°, y 0,933HA y 0,919HA a 90° en incisivo y premolar respectivamente. En P2, se observa una progresión de valores más altos: 0,942HA y 0,958HA a 0°, 0,947HA y 0,951HA a 45°, y 0,955HA y 0,951HA a 90°. La impresora P3 mantiene una tendencia ascendente en los valores del incisivo (0,956HA a 0°, 0,959HA a 45°, 0,962HA a 90°), mientras que el premolar conserva una media estable de 0,951HA en los tres ángulos. En P4 se evidencian las mayores medias para la angulación de 45°, con 0,969HA en el incisivo y 0,960HA en el premolar, y valores también elevados a 90° (0,956HA y 0,963HA). Por último, P5 presenta medias similares entre incisivo y premolar en todas las angulaciones, con registros entre 0,951HA y 0,963HA. La gráfica permite visualizar las variaciones de dureza entre impresoras, piezas anatómicas y angulaciones, sin entrar en valoraciones adicionales.

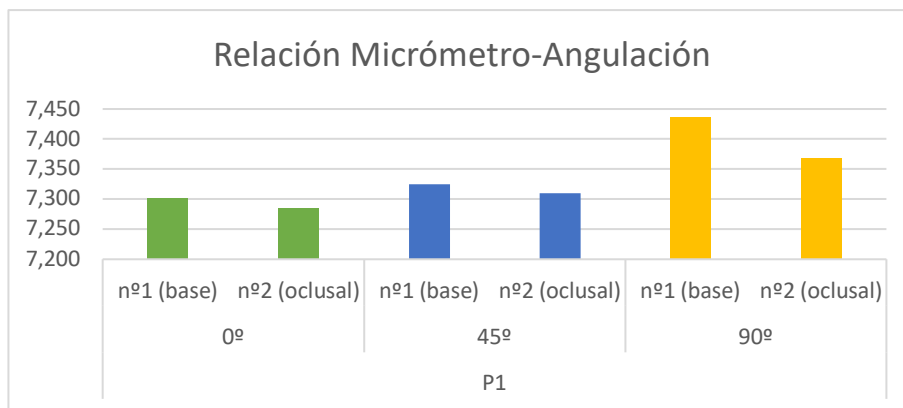


Gráfica 6: Comparación para las 5 férulas en conjunto de la dureza en dos puntos con respecto a la angulación.

3.2 Diámetro del casquillo (micrómetro).

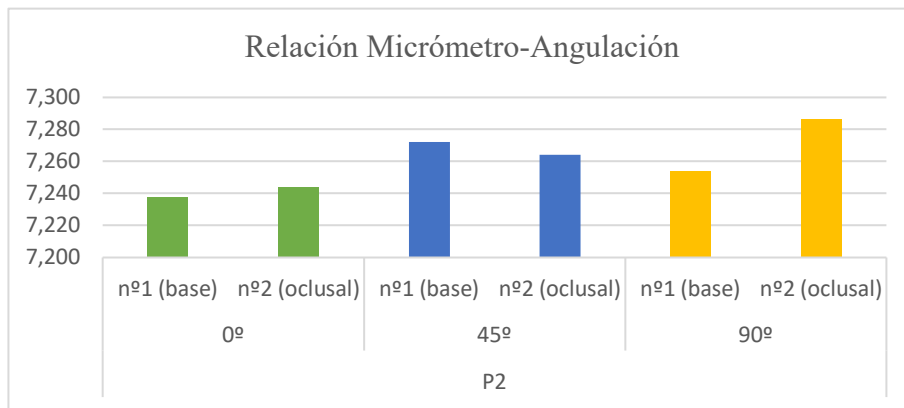
3.2.1 Resultados individuales por férula

En la gráfica 7, se observan los resultados obtenidos para la férula 1, donde se analizaron los valores medios de las mediciones realizadas en dos alturas: una correspondiente a la base pegada a la férula (nº1) y otra en el extremo opuesto del casquillo a nivel oclusal (nº2), a nivel de la entrada del casquillo en oclusal. A 0°, las medias fueron prácticamente similares entre ambas zonas, con valores de 7,301 mm en la base y 7,285 mm en el borde del casquillo. En la angulación de 45°, se observó un aumento en ambas medidas, con un valor medio de 7,325 mm en la zona próxima a la férula y de 7,310 mm en el casquillo. Por último, a 90°, se registraron las medias más elevadas del conjunto, con 7,436 mm en la base de la férula y 7,368 mm en el extremo del casquillo. En esta última angulación y en ambas alturas, se observó además que el casquillo presenta una mayor anchura en sentido lateral que en sentido anteroposterior.



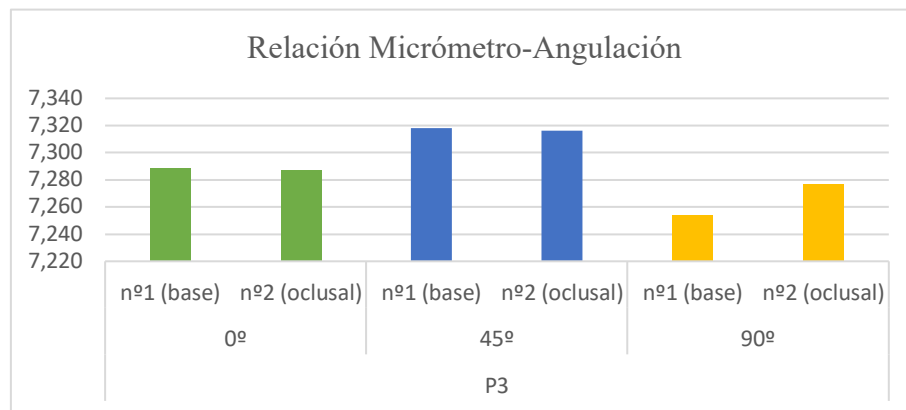
Gráfica 7: Comparación para la férula 1 del diámetro a dos alturas según la angulación.

En la gráfica 8, se observan los resultados obtenidos para la férula 2, donde se analizaron los valores medios de las mediciones realizadas en dos alturas: una correspondiente a la base pegada a la férula (nº1) y otra en el extremo opuesto del casquillo (nº2), a nivel de la entrada del casquillo en oclusal. A 0°, las medias fueron de 7,238 mm en la base y 7,244 mm en el casquillo. En la angulación de 45°, se observaron valores medios de 7,272 mm en la zona junto a la férula y de 7,264 mm en el casquillo y, en esta misma angulación, se observó que el casquillo es más ancho en sentido lateral que en sentido anteroposterior. Finalmente, a 90°, se registraron valores de 7,254 mm en la base y 7,287 mm en el casquillo, siendo este último señalado (solo en la altura del casquillo) más ancho en sentido anteroposterior que lateral.



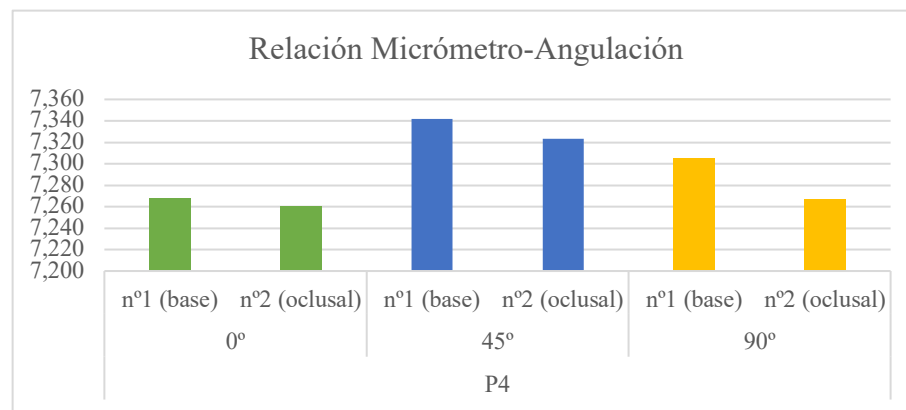
Gráfica 8: Comparación para la férula 2 del diámetro a dos alturas seegún la angulación.

En la gráfica 9, se observan los resultados obtenidos para la férula 3, donde se analizaron los valores medios de las mediciones realizadas en dos alturas: una correspondiente a la base pegada a la férula (n°1) y otra en el extremo opuesto del casquillo (n°2), a nivel de la entrada del casquillo en oclusal. A 0°, las medias fueron de 7,288 mm en la zona próxima a la férula y de 7,287 mm en el casquillo. En la angulación de 45°, se registraron los valores medios más elevados de esta férula, con 7,318 mm en la base y 7,316 mm en el casquillo, En esta última (solamente en la altura de la entrada del casquillo en oclusal), se observó que el casquillo es más ancho en sentido anteroposterior que lateral. Finalmente, a 90°, los valores descendieron a 7,254 mm en la zona de la férula y 7,277 mm en el casquillo.



Gráfica 9: Comparación para la férula 3 del diámetro a dos alturas según la angulación.

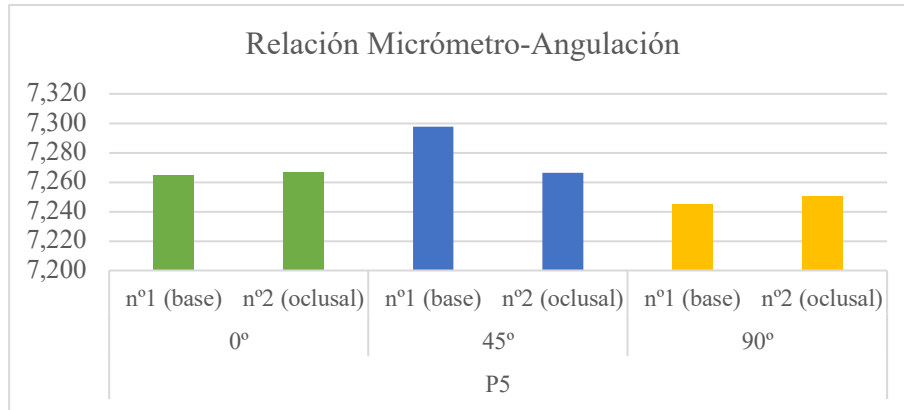
En la gráfica 10, se observan los resultados obtenidos para la férula 4, donde se analizaron los valores medios de las mediciones realizadas en dos alturas: una correspondiente a la base pegada a la férula (nº1) y otra en el extremo opuesto del casquillo (nº2), a nivel de la entrada del casquillo en oclusal. A 0°, las medias fueron de 7,268 mm en la base y 7,260 mm en el casquillo. En esta angulación, a ambas alturas se observó que el casquillo es más ancho en sentido lateral que en sentido anteroposterior. A 45°, se registraron los valores medios más elevados de esta férula, con 7,342 mm en la zona próxima a la férula y 7,323 mm en el casquillo. Finalmente, a 90°, las medias fueron de 7,305 mm en la base de la férula y de 7,266 mm en el casquillo, indicando nuevamente que el casquillo es más ancho en sentido lateral que anteroposterior a la altura de la férula.



Gráfica 10: Comparación para la férula 4 del diámetro a dos alturas según la angulación.

En la gráfica 11, se observan los resultados obtenidos para la férula 5, donde se analizaron los valores medios de las mediciones realizadas en dos alturas: una correspondiente a la base pegada a la férula (nº1) y otra en el extremo opuesto del casquillo (nº2). A 0°, las medias fueron de 7,265 mm en la base de la férula y de 7,267 mm en el casquillo. A 45°, los valores aumentaron a 7,298 mm en la base y 7,266 mm en el casquillo. En esta angulación se observó que en ambas alturas varían las medidas, ya que, a la altura de la férula, el casquillo es más ancho en sentido lateral que en sentido anteroposterior y a la altura de la entrada del casquillo en oclusal presenta una ligera diferencia entre diagonales que podemos observar en la imagen adjuntada en la parte inferior.

Finalmente, a 90°, se registraron medias de 7,245 mm en la base y de 7,250 mm en el casquillo. Pero en esta angulación se observaron diferentes discrepancias de medidas en los diferentes sentidos, ya que en las medidas a la altura de la base de la férula podemos observar que el casquillo es más ancho en sentido anteroposterior que en sentido lateral y aparte de esto tienen una discrepancia en las diagonales que podemos observar en la imagen adjuntada en la parte inferior (imagen 15). Por otro lado, en las medidas a la altura oclusal, tuvimos también dos discrepancias al contrario que en la otra altura, más ancho en sentido lateral que en sentido anteroposterior y en las diagonales (imagen 16), la anchura corresponde inversamente a la otra altura mencionada anteriormente.



Gráfica 11: Comparación para la férula 5 del diámetro a dos alturas según la angulación.

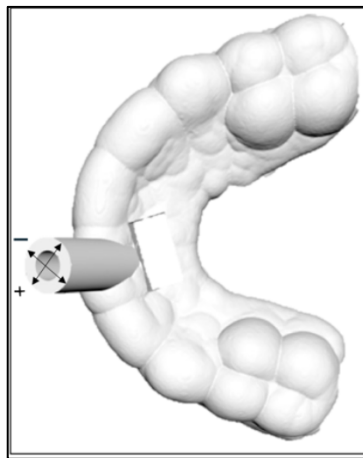


Ilustración 15: Anchura de las diagonales para la altura del casquillo

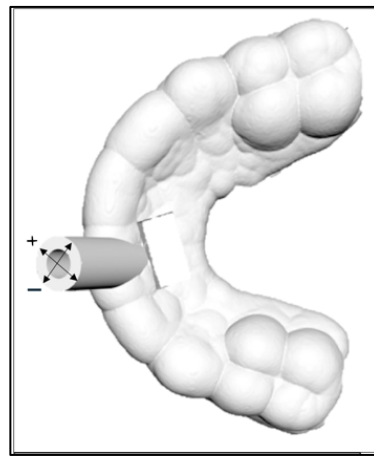
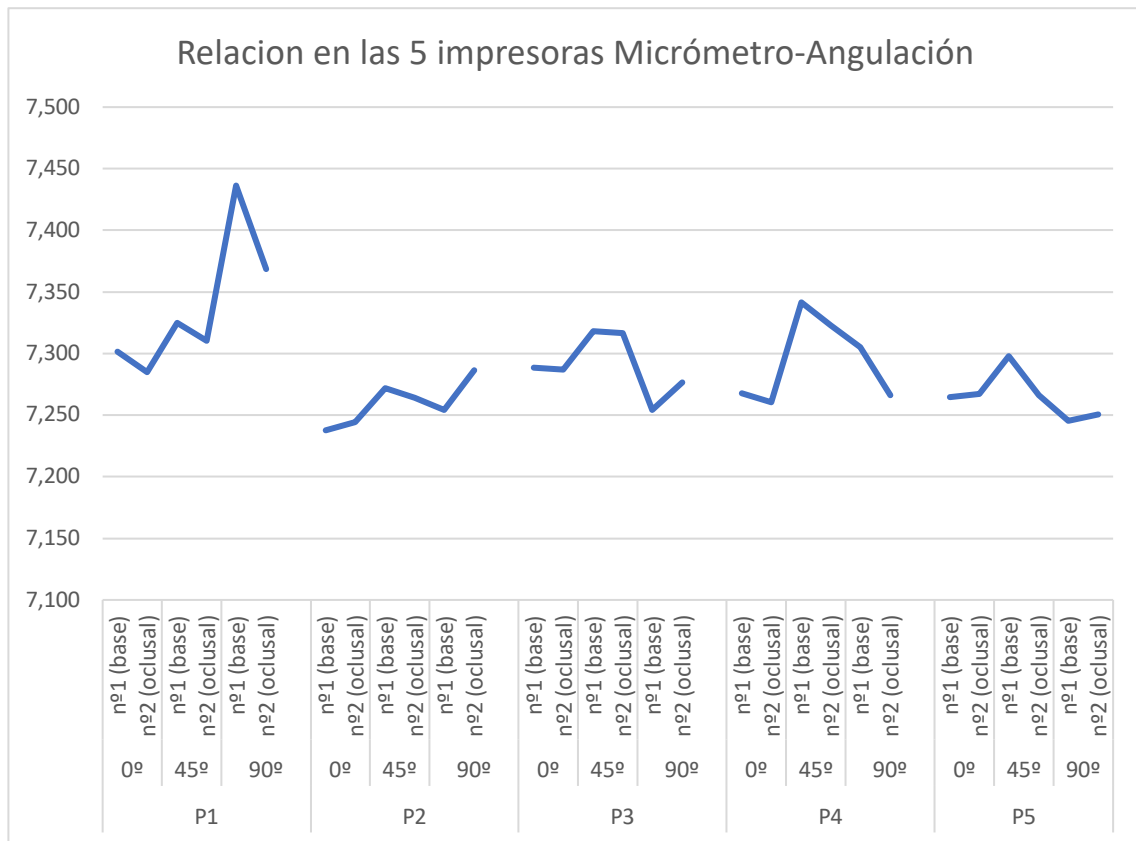


Ilustración 16: Anchura de las diagonales para la altura de la férula.

3.2.2 Resultados conjuntos de las cinco férulas

En la gráfica 12, se ilustran los valores medios de las mediciones realizadas con micrómetro para las cinco férulas (1 a 5), habiéndolas medido en 2 posiciones: n°1 en la base pegada a la férula y n°2 en el extremo del casquillo. La impresora P1 presentó los valores más elevados del conjunto, alcanzando 7,436 mm en la base y 7,368 mm en el casquillo a 90°, mientras que a 0° sus valores fueron de 7,301 mm y 7,285 mm respectivamente. La impresora P2 mostró valores más bajos y estables, con medias entre 7,238 mm y 7,287 mm en todas las posiciones. La impresora P3 mantuvo una distribución estable con una ligera disminución a 90°, donde se obtuvieron 7,254 mm en la base y 7,277 mm en el casquillo. En el caso de P4, se registraron los segundos valores más altos a 45°, con 7,342 mm en la férula y 7,323 mm en el casquillo. Por último, la impresora P5 mostró valores medios más contenidos, especialmente a 90°, donde se obtuvieron 7,245 mm en la base y 7,250 mm en el casquillo.



Gráfica 12: Comparación para las 5 férulas en conjunto del diámetro en dos puntos con respecto a la angulación

3.2.3 Resultados comparativos de las cinco férulas con el STL

En estas dos gráficas relacionadas (gráfica 13 y 14), vemos los resultados haciendo dos comparaciones diferentes. Para ello, lo que hemos realizado ha sido una medición de la malla en el software, hemos sacado el promedio del diámetro del casquillo en las dos alturas y lo hemos agrupado por angulaciones, para tener una medida estándar y poder así compararlo.

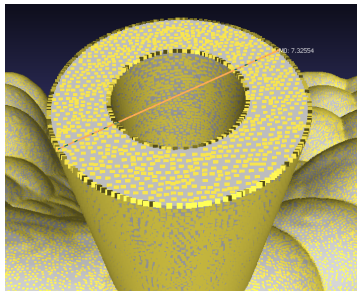
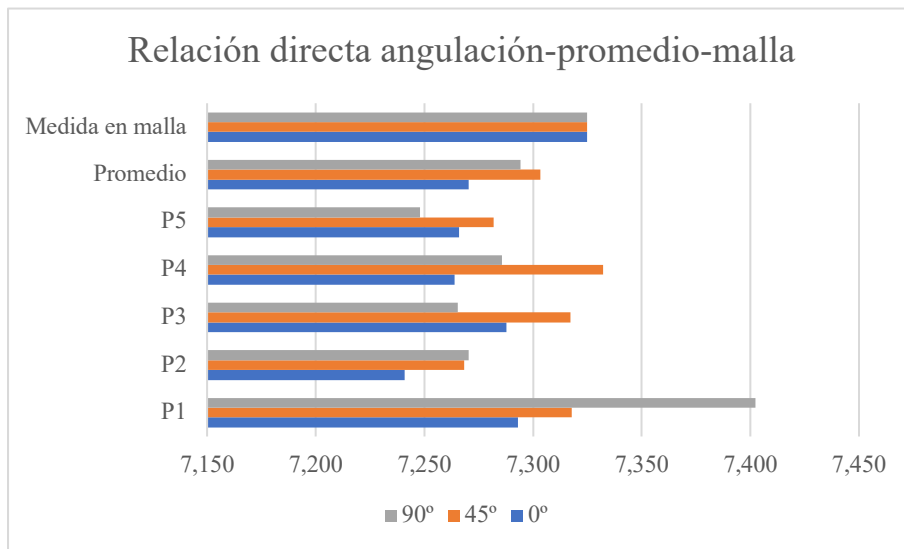


Ilustración 17: Medida de la malla en el software.

°	P1	P2	P3	P4	P5	Media	Malla
0°	7,293	7,241	7,288	7,264	7,266	7,270	7,325
45°	7,318	7,268	7,317	7,332	7,282	7,303	7,325
90°	7,402	7,271	7,266	7,286	7,248	7,295	7,325

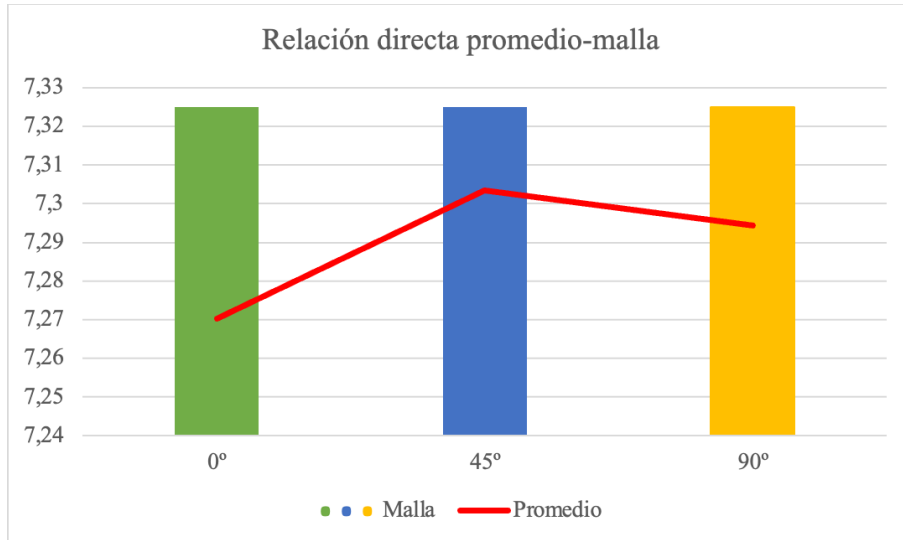
Ilustración 18: Tabla de datos para el promedio por angulación comparándolo con la medida de la malla.

En la gráfica inferior (gráfica 13) se presentan las mediciones de la malla en el software, los promedios correspondientes a las angulaciones de 0°, 45° y 90°, así como las medidas individuales de cada férula para cada angulación. Los resultados muestran que el promedio del diámetro medido a 0° es de 7,270 mm; a 45°, el promedio es de 7,303 mm; y a 90°, el promedio alcanza 7,295 mm. Por otra parte, la medida obtenida directamente de la malla digital es de 7,325 mm, como se observa en la imagen inferior.



Gráfica 13: Comparación del promedio de cada férula, el promedio conjunto y medida de la malla.

Realizamos una comparación de la medida de la malla directamente con el promedio en las diferentes angulaciones, viendo cual de estas es la que más se aproxima a la medida real del STL (gráfica 14).



Gráfica 14: Comparación de los promedios en cada angulación con la medida de la malla.

Por último, en la gráfica 15 se observa la comparación del promedio del diámetro del casquillo medido en la malla a la altura de ajuste oclusal del casquillo (una de las posiciones más relevantes de fijación, comparada anteriormente), el promedio de la malla medido a cinco alturas diferentes del casquillo (ilustración 19) y el promedio de medidas obtenidas mediante micrómetro en las férulas impresas. Esto permite comparar valores directamente expresados en milímetros para determinar qué angulación se aproxima más y presenta menos discrepancias entre los datos obtenidos.

En las ilustraciones inferiores se muestran, en primer lugar (ilustración 20), la tabla con las medidas en el software a partir de la malla a diferentes alturas, donde se aprecian las medidas desde la altura más superior en M0 (entrada del casquillo) hasta M4 (pegada a la férula), con valores en orden de: 7,325 mm; 7,322 mm; 7,316 mm; 7,305 mm y 7,298 mm y el promedio de estas.

En la siguiente ilustración (ilustración 21) se presentan los valores promedio de tres métodos, donde:

- La primera columna contiene las medias obtenidas con el micrómetro en la férula impresa, con valores de 7,270 mm a 0°, 7,303 mm a 45° y 7,294 mm a 90°.
- La segunda columna muestra la media obtenida entre los valores del software (M0-M4), con un valor de 7,313 mm.
- La última columna indica la media de la malla a nivel oclusal, punto crucial para el ajuste del casquillo, con un valor de 7,325 mm.

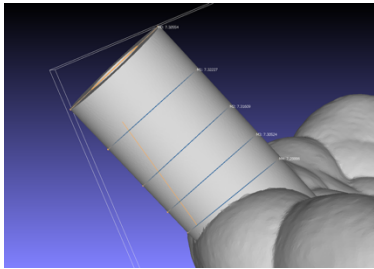


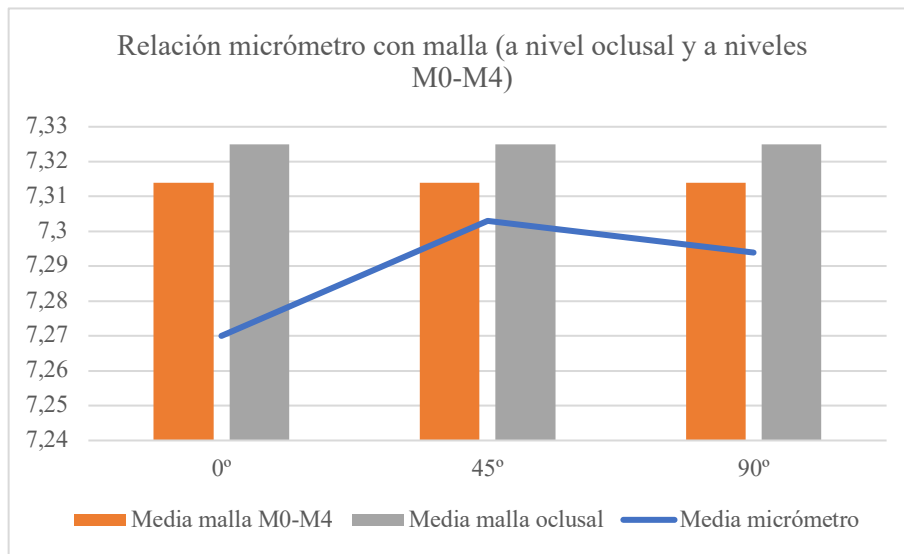
Ilustración 19: Medidas en el software, de arriba a abajo M0 a M4.

Medidas	nº	Media malla M0-M4
M0	7,3255	7,31364
M1	7,3227	
M2	7,3160	
M3	7,3052	
M4	7,2988	

Ilustración 20: Medidas en el software M0-M4 con su promedio.

º	Media micrómetro	Media malla M0-M4	Media malla oclusal
0º	7,270	7,314	7,325
45º	7,303		
90º	7,294		

Ilustración 21: Medidas del promedio obtenidas con el micrómetro, promedio de M0-M4 y promedio a la altura de M0.

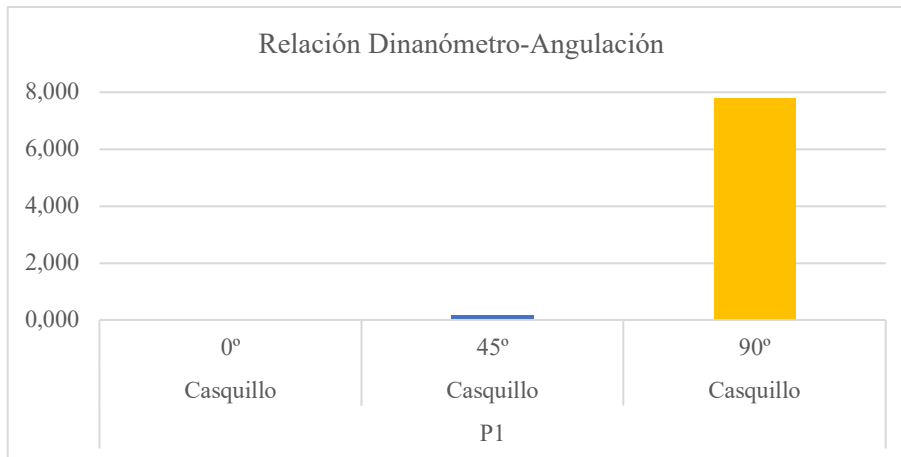


Gráfica 15: Relación directa entre micrómetro / malla M0-M4 y malla a la altura oclusal.

3.3 Dinamómetro

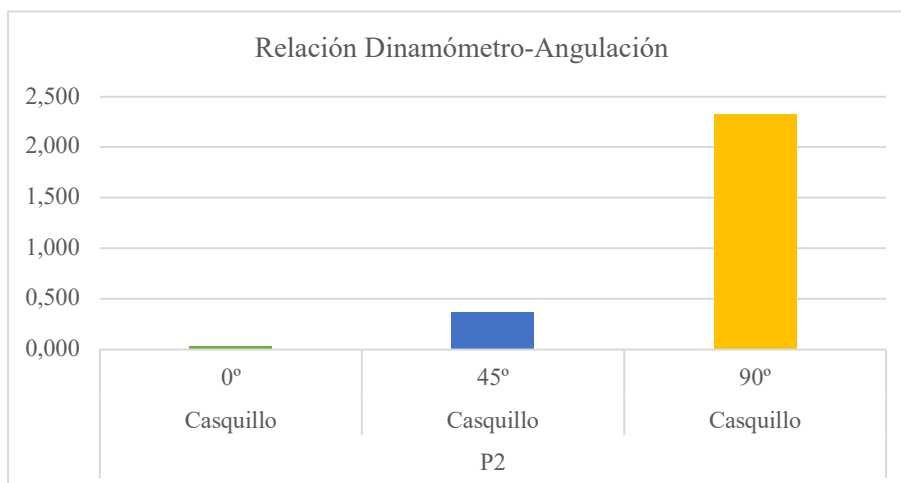
3.3.1 Resultados individuales por férula

En la gráfica 16 se presentan los valores registrados con el dinamómetro para la férula 1. A 0° , se observó un valor constante en todas las mediciones, con una media de 0,025 N. Para la angulación de 45° , los valores se incrementaron notablemente, alcanzando una media de 0,147 N. Por último, a 90° , el casquillo no pudo ser introducido, y se estima que, de haberlo hecho, habría sido necesaria la presión máxima registrable por el dinamómetro (8,000 N).



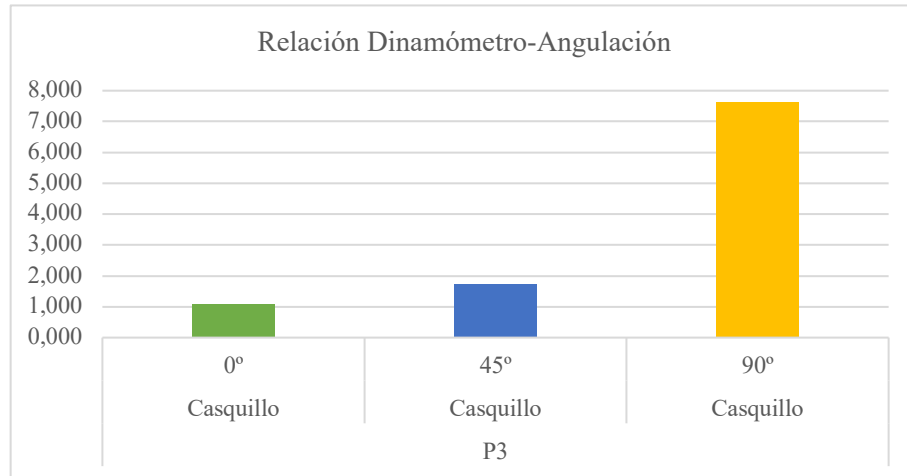
Gráfica 16: Comparación para la férula 1 del dinamómetro y la angulación.

En la gráfica 17 se presentan los valores medios registrados con dinamómetro para la férula 2. A 0° , la fuerza media fue de 0,034 N, con una dispersión mínima entre mediciones, comprendidas entre 0,010 N y 0,065 N. En la angulación de 45° , se observó un incremento notable, alcanzando una media de 0,373 N, con valores individuales que oscilaron entre 0,109 N y 0,743 N. Por último, a 90° , la fuerza media registrada fue de 2,332 N, siendo esta la más elevada de las tres angulaciones, con una amplia variabilidad entre 1,436 N y 3,845 N.



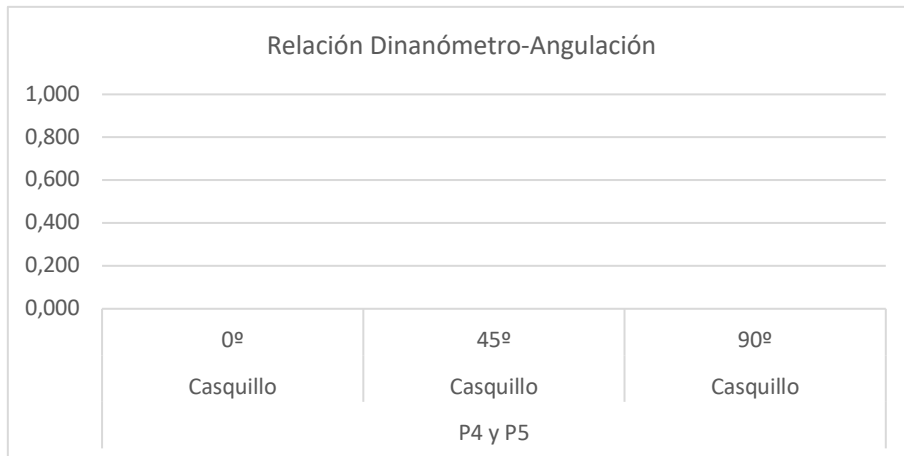
Gráfica 17: Comparación para la férula 2 del dinamómetro y la angulación.

En la gráfica 18 se representan los resultados obtenidos para la férula 3. A 0°, la media fue de 1,088 N, con valores comprendidos entre 0,751 N y 1,683 N. A 45°, se registró un incremento en la fuerza de inserción, alcanzando una media de 1,714 N, con valores individuales que oscilaron entre 0,597 N y 3,082 N. Finalmente, en la angulación de 90°, la media ascendió notablemente hasta 7,617 N, destacando como la más elevada entre todas las angulaciones, con mediciones comprendidas entre 5,420 N y 9,757 N.



Gráfica 18: Comparación para la férula 3 del dinamómetro y la angulación.

En la gráfica 19, se representan los resultados obtenidos para la férula 4 y 5. En todas las posiciones angulares (0°, 45° y 90°), se registró que el casquillo entra y sale totalmente sin ejercer presión ninguna, resultando en valores medios de 0,000 N.



Gráfica 19: Comparación para la férula 4 y 5 del dinamómetro y la angulación.

3.3.2 Resultados conjuntos de las cinco férulas

En la gráfica 20, podemos observar los valores promedio de fuerza necesarios para insertar el casquillo en las férulas obtenidas con las cinco impresoras (P1 a P5). En las 3 primeras férulas, se muestra una progresión marcada de aumento conforme a la angulación: P1 (0°- 0,025N; 45°- 0,147N; 90°- 7,800N), P2 (0,034N - 0,373N – 2,332N) y P3 (1,088N – 1,714N – 7,617N).

En cambio, para las férulas P4 y P5 se han registrado valores nulos (0,000N) en todas las posiciones, lo que indica que el casquillo entra y sale sin ejercer presión ninguna.

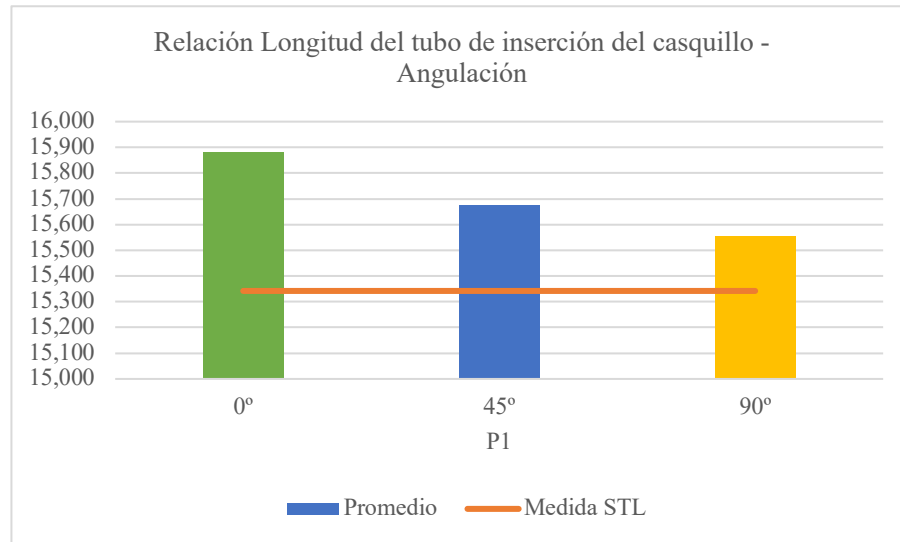


Gráfica 20: Comparación para las 5 férulas en conjunto del dinamómetro con respecto a la angulación.

3.4 Longitud del tubo de inserción del casquillo

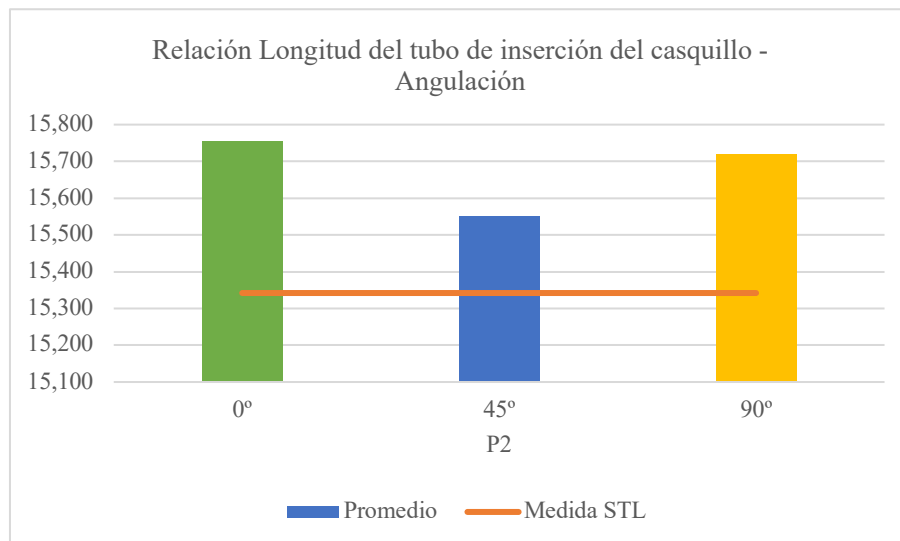
3.4.1 Resultados individuales por férula

En la gráfica 21, se representan los valores medidos para la férula 1. A 0°, la longitud registrada fue de 15,880 mm. A 45°, se registró una media de 15,675 mm, y a 90°, la longitud media fue de 15,555 mm.



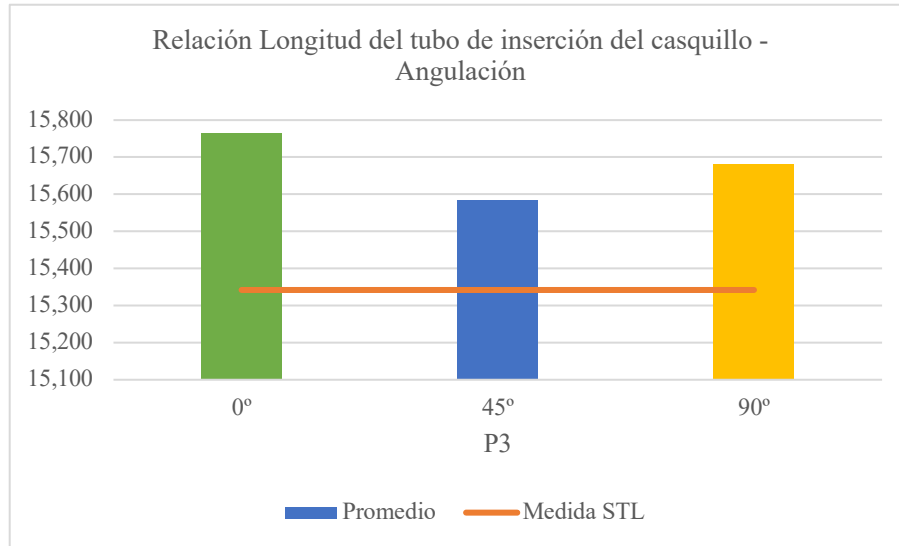
Gráfica 21: Comparación para la férula 1 de la longitud del tubo de inserción del casquillo y la angulación.

En la gráfica 22, se representan los valores medidos para la férula 2. A 0°, la longitud registrada fue de 15,755 mm. A 45°, la medida fue ligeramente menor, con un valor de 15,550 mm. Por último, a 90°, la longitud fue de 15,720 mm.



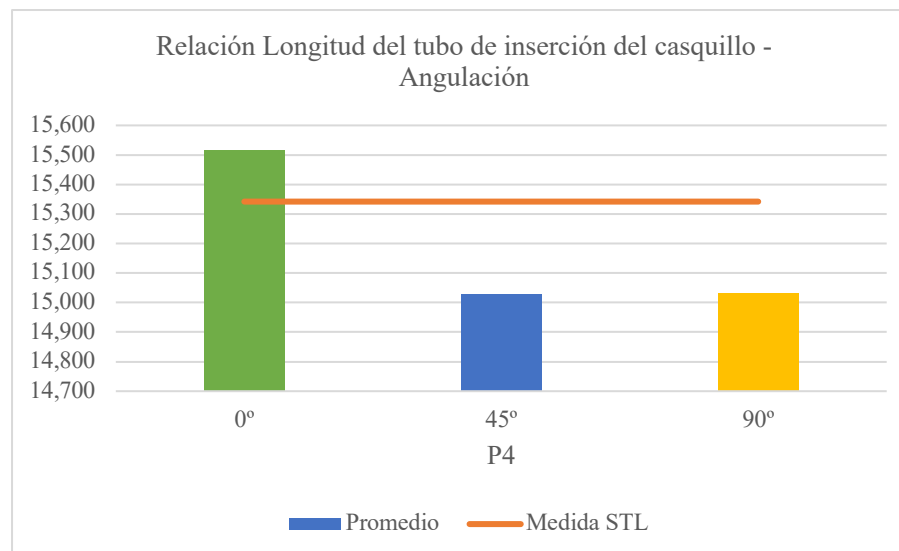
Gráfica 22: Comparación para la férula 2 de la longitud del tubo de inserción del casquillo y la angulación.

En la gráfica 23, se representan los valores medidos para la férula 3. A 0°, la longitud registrada fue de 15,765 mm. A 45°, la medida disminuyó hasta 15,585 mm. Por último, a 90°, la longitud aumentó ligeramente hasta alcanzar los 15,680 mm.



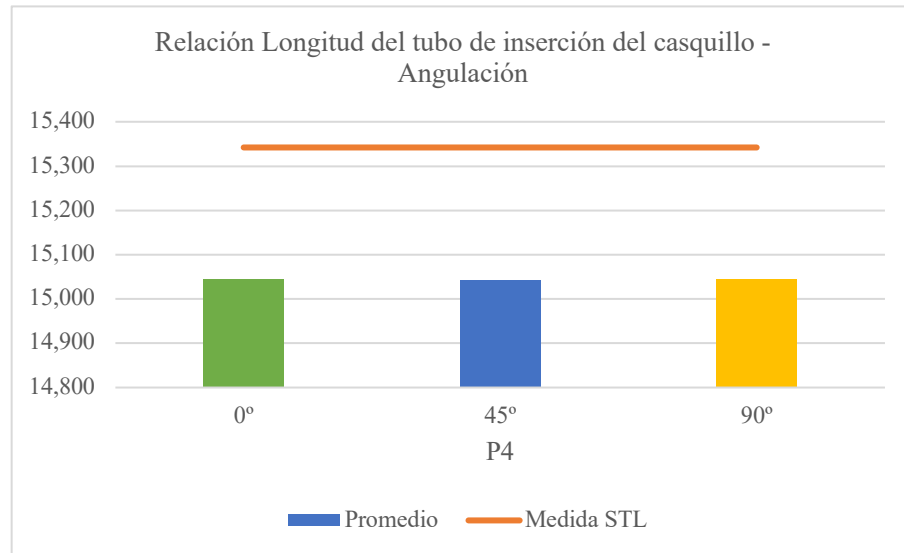
Gráfica 23: Comparación para la férula 3 de la longitud del tubo de inserción del casquillo y la angulación.

En la gráfica 24, se representan los valores medidos para la férula 4. A 0°, la longitud registrada fue de 15,515 mm. Esta medida disminuyó a 15,026 mm cuando se cambió la angulación a 45°. Posteriormente, a 90°, la longitud volvió a aumentar ligeramente, alcanzando un valor de 15,031 mm.



Gráfica 24: Comparación para la férula 4 de la longitud del tubo de inserción del casquillo- la angulación.

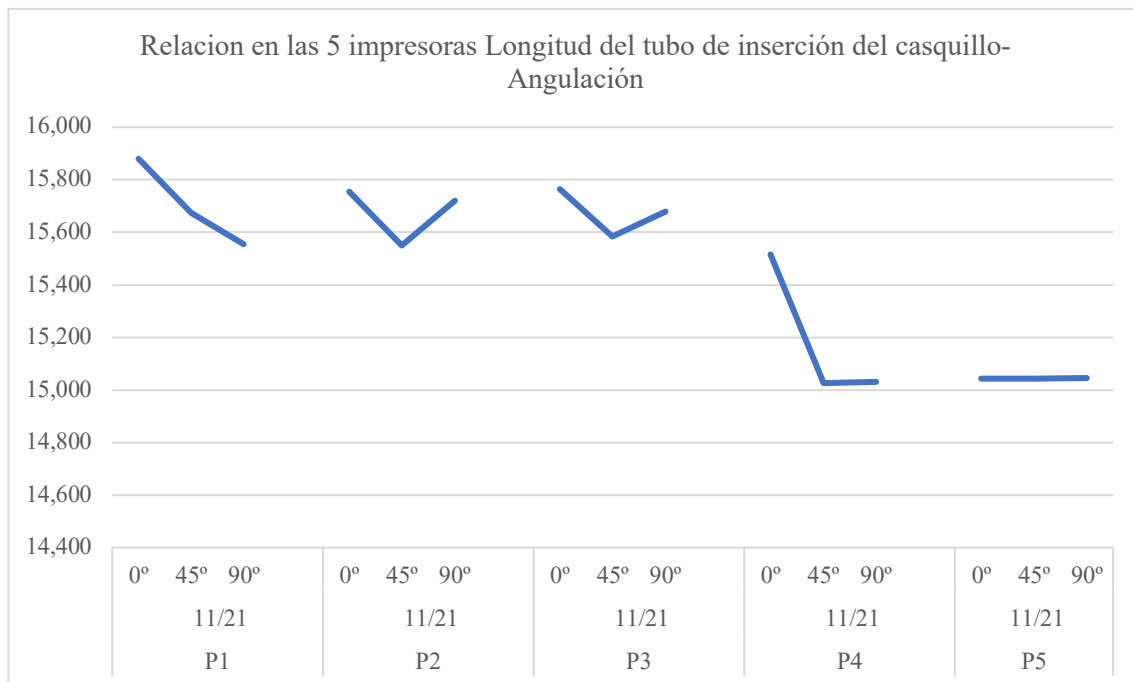
En la gráfica 25, se representan los valores medidos para la férula 5. A 0° , la longitud registrada fue de 15,044 mm. A 45° , el valor disminuyó levemente, con una medida de 15,042 mm. Por último, a 90° , la longitud fue de 15,045 mm.



Gráfica 25: Comparación para la férula 5 de la longitud del tubo de inserción del casquillo y la angulación.

3.4.2 Resultados conjuntos de las cinco férulas

En la gráfica 26, se representan las longitudes medidas del tubo de inserción del casquillo en las cinco férulas. En la férula 1, se observó una longitud de 15,880 mm a 0°, que disminuyó a 15,675 mm a 45° y a 15,555 mm a 90°. En la férula 2, la medida fue de 15,755 mm a 0°, descendiendo a 15,550 mm a 45°, y aumentando ligeramente a 15,720 mm a 90°. En la férula 3, la longitud registrada fue de 15,765 mm a 0°, descendiendo a 15,585 mm a 45° y elevándose a 15,680 mm a 90°. Para la férula 4, la longitud fue de 15,515 mm a 0°, disminuyendo notablemente a 15,026 mm a 45°, y manteniéndose estable en 15,031 mm a 90°. Finalmente, en la férula 5 se registraron valores muy similares entre ángulos: 15,044 mm a 0°, 15,042 mm a 45° y 15,045 mm a 90°.



Gráfica 26: Comparación para las 5 férulas en conjunto de la longitud del tubo de inserción del casquillo con respecto a la angulación.

3.4.3 Resultados comparativos de las cinco férulas con el STL

Por último, en la gráfica 27 se presenta la comparación entre la medida de la malla obtenida mediante el software del ordenador (ilustración 22) y el promedio de las medidas registradas con micrómetro en la férula impresa, agrupadas por angulación (ilustración 23). Esta comparación permite identificar que angulación se aproxima más y presenta menor discrepancia con el archivo STL.

Se observa que la medida de la malla obtenida por software fue de 15,342 mm, mientras que las mediciones promedio con micrómetro fueron: 15,592 mm a 0°, 15,376 mm a 45° y 15,406 mm a 90°.

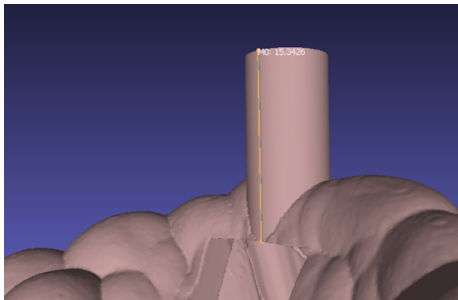
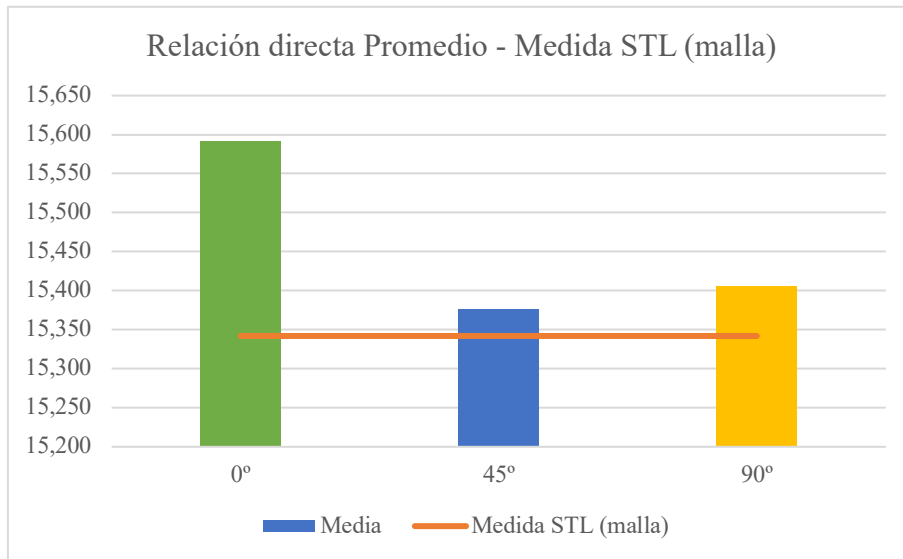


Ilustración 22: Medida de la malla en el software.

º	P1	P2	P3	P4	P5	Media	Malla
0º	15,880	15,755	15,765	15,515	15,044	15,592	15,342
45º	15,675	15,550	15,585	15,026	15,042	15,376	15,342
90º	15,555	15,720	15,680	15,031	15,045	15,406	15,342

Ilustración 23: Comparación de datos promedios entre el micrómetro y la malla.



Gráfica 27: Relación directa entre la medida de la malla y el promedio del micrómetro.

4 Discusión

La precisión de los modelos impresos en 3D es un aspecto crítico en la elaboración de férulas para endodoncia guiada, dado que este procedimiento odontológico demanda exactitud milimétrica en los tres planos espaciales, para asegurar que la trayectoria desde la entrada practicada en la cara oclusal hasta la permeabilización del conducto radicular, sea lo más lineal y precisa posible. Cualquier desviación provocará un debilitamiento innecesario del diente o en perforaciones iatrogénicas, comprometiendo la integridad estructural y funcional de este. En este contexto, el presente estudio se centró en evaluar cómo la angulación del modelo impreso sobre la plataforma de la impresora afecta la precisión dimensional del resultado final, analizando tres orientaciones distintas: 0, 45 y 90 grados. Los datos obtenidos mostraron resultados estadísticamente significativos en la precisión según la orientación, lo que llevó a rechazar la hipótesis nula de que la posición no influye en el resultado.

Este hallazgo se suma a evidencias previas que indican que la orientación del modelo durante la impresión afecta no solo la precisión, sino también el consumo de material y las propiedades mecánicas de los modelos fabricados mediante impresión 3D (8). Como ya hemos mencionado anteriormente en varias ocasiones, entre las tecnologías de fabricación aditiva empleadas en odontología, la estereolitografía digital (DLP) ha destacado por ofrecer la mayor precisión, influida por variables ópticas intrínsecas al sistema, tales como la calidad de lentes, el tamaño del píxel, el dispositivo de microespejos digitales (DMD) y la resolución de la plataforma de impresión (8, 19). Por esta razón, además de estudiar la influencia del ángulo, se consideraron en el estudio las configuraciones y parámetros específicos de cada impresora y resina utilizada para controlar las posibles fuentes de variabilidad.

Aunque los parámetros recomendados por los fabricantes suelen seguirse rigurosamente, la altura de capa es uno de los pocos ajustes libres que impactan directamente la resolución y la eficiencia del proceso. Una menor altura de capa implica mayor resolución, al tiempo que incrementa el tiempo de impresión y el consumo de resina, mientras que aumentar la altura de capa reduce ambos, pero a costa de la precisión (13). Sin embargo, otro factor menos estudiado en el campo específico de la endodoncia guiada es la orientación del modelo, que en la práctica puede variar según criterios de ahorro de material, aprovechamiento del espacio o tiempo en los laboratorios protésicos, pero que puede no coincidir con la posición óptima para obtener resultados clínicos satisfactorios solicitados por el odontólogo, generando discrepancias en la calidad final del producto (8).

Se sabe que, más allá de la orientación, otros factores como el espesor de capa, la tecnología de impresión, el material utilizado, la contracción post-fabricación y las condiciones de almacenamiento influyen de manera significativa en la precisión de los modelos impresos con técnicas de fabricación aditiva (8, 19). En particular, estudios previos han reportado que el grosor de capa y la tecnología de impresora (por ejemplo, DLP frente a SLA) son determinantes para la calidad dimensional, siendo las capas más finas las que ofrecen una mayor fidelidad, aunque con el inconveniente de tiempos de producción más largos (13).

El uso clínico de modelos digitales fabricados mediante CAD/CAM en procedimientos de endodoncia guiada ha sido evaluado en estudios que demuestran que estos modelos pueden reproducir con alta precisión las dimensiones necesarias para la elaboración de férulas diagnósticas y guías endodónticas personalizadas. Sin embargo, la exactitud de estas reproducciones depende de factores clave como el diseño de los componentes digitales y la tecnología de impresión empleada. En particular, la influencia del diseño de las propias férulas teniendo en cuenta factores como la estabilidad, corrección de errores de impresión, escaneados sin arrastres/superposiciones...es fundamental para garantizar que las férulas impresas guíen adecuadamente el acceso y tratamiento, minimizando desviaciones y asegurando un ajuste óptimo durante el procedimiento (20, 21).

El post-procesado en la fabricación aditiva de férulas dentales impresas en 3D es una fase crítica para garantizar sus propiedades mecánicas, estabilidad dimensional y biocompatibilidad clínica. En la práctica habitual de la mayoría de los laboratorios, se emplean impresoras con resolución 4K junto con protocolos estandarizados que aseguran la calidad del proceso. Estos protocolos incluyen la limpieza de los modelos impresos con alcohol isopropílico al 99,9% para eliminar restos de resina, seguida de una etapa de curado en unidades específicas con atmósfera controlada de nitrógeno (8, 22). Este procedimiento permite un curado óptimo, mejora la biocompatibilidad y minimiza los defectos superficiales, factores clave para la funcionalidad y seguridad de las férulas destinadas al uso humano. Según investigaciones detalladas en trabajos como los de Jindal et al. (2020), el curado con luz ultravioleta es una fase crítica que afecta directamente la resistencia, elasticidad y estabilidad dimensional de las piezas. En este sentido, la duración del curado y la temperatura a la que se realiza deben ser cuidadosamente controladas para evitar distorsiones que puedan comprometer el ajuste y la funcionalidad de las férulas (23). Asimismo, McCarty et al. (2020) demuestran que no solo el tiempo de curado, sino también la orientación de impresión previa impacta significativamente en la precisión dimensional, señalando que una combinación óptima de ambos factores mejora la fidelidad del producto final (17).

Antes y después del curado, el lavado con alcohol isopropílico al 99% o agentes similares es indispensable para eliminar cualquier residuo de resina no polimerizada. Este paso no solo contribuye a mejorar el acabado superficial y la estética de las piezas, sino que también es crucial para garantizar la biocompatibilidad y evitar posibles reacciones adversas al paciente. La limpieza meticulosa minimiza la presencia de materiales tóxicos o contaminantes que pudieran quedar atrapados en la superficie, aspecto que es especialmente importante en dispositivos destinados a contacto prolongado con tejidos orales (24).

En cuanto al mantenimiento y almacenamiento posterior, diversos estudios han evaluado el impacto de las condiciones ambientales en la estabilidad dimensional y la durabilidad de las férulas impresas. Yousef et al. (2022) y Alshaibani et al. (2024) coinciden en que factores como la temperatura y la humedad pueden generar cambios estructurales que afectan la precisión y la funcionalidad clínica de las piezas. Específicamente, se recomienda conservar los modelos a temperaturas controladas cercanas a 20 ± 2 °C y en ambientes con humedad regulada entre un 30 y un 50% para evitar deformaciones o degradaciones prematuras del material (25, 26). Además, el tiempo de almacenamiento debe limitarse para preservar la integridad dimensional; Joda et al. (2020) evidencian que el envejecimiento, incluso en condiciones óptimas, disminuye progresivamente la precisión, recomendando no superar un plazo de uso de 3 a 4 semanas tras la impresión (27).

El primer punto medido en este estudio es la Dureza, en la que los resultados obtenidos muestran una relación consistente entre la dureza de la resina y la angulación con la que se posicionan las férulas durante la impresión 3D. Al analizar la dureza en dos puntos críticos de la férula —el incisivo central y el premolar— se observa que la variabilidad en la dureza es relativamente baja, indicando una buena uniformidad del material a lo largo de distintas áreas de la pieza.

En términos de angulación, las mediciones realizadas a 0°, 45° y 90° presentan diferencias sutiles. En general, la dureza tiende a mantenerse estable o ligeramente aumentar en algunas angulaciones intermedias, como los 45°, en comparación con 0° o 90°. Este comportamiento puede atribuirse a la orientación del láser o fuente de impresión respecto al plano de la pieza, que afecta la polimerización y compactación del material.

Asimismo, la comparación entre las distintas impresoras utilizadas revela que, pese a las diferencias tecnológicas y niveles de profesionalismo (impresoras básicas vs. profesionales), la dureza se mantiene dentro de rangos aceptables y similares para cada angulación y punto de medición. Esto indica que el parámetro de angulación tiene una influencia más determinante sobre la dureza que el modelo de impresora empleado,

Finalmente, al consolidar los datos en una gráfica general que agrupa todas las durezas medidas en los diferentes puntos y angulaciones, se confirma que la impresión 3D de férulas guiadas con resinas utilizadas en los distintos laboratorios garantiza una resistencia homogénea y adecuada, independientemente de la impresora y siempre en rangos por encima de la dureza recomendada en férulas y aparatología impresa utilizada en odontología, que se recomienda una dureza superior a 80D con el shore A (14).

De los análisis realizados sobre la dureza de las férulas impresas, se observa que la angulación de 45° ofrece los valores más consistentes y elevados de dureza en los puntos medidos (incisivo y premolar), lo que sugiere una mejor polimerización y compactación del material.

El segundo punto medido en el estudio es el Diámetro externo del casquillo, para ver las posibles discrepancias del cilindro en cuanto a la impresión 3d. Las mediciones obtenidas en dos puntos críticos — el diámetro a nivel de la férula (en la base) y el diámetro a nivel oclusal (en el punto de inserción del casquillo) — ofrecen una perspectiva precisa sobre la estabilidad dimensional y la fidelidad de las impresiones 3D en función de la angulación aplicada durante el proceso.

En todas las impresoras evaluadas, se aprecia en aspectos generales que los valores de diámetro se mantienen dentro de un rango muy estrecho, reflejando una alta precisión y consistencia dimensional tanto a nivel de la base como a nivel de la entrada oclusal. Esto sugiere que la variación en el posicionamiento angular (0°, 45° y 90°) no induce deformaciones significativas que afecten a la integridad dimensional de las piezas, aunque, podemos destacar que medidas como la de 90° que en la fabricación se hace de manera vertical en capas mucho más pequeñas e inestables por gravedad, tenemos muchas discrepancias en las medidas como encontramos en las diagonales o diámetros medidos en la férulas de las impresoras 1, 2 o 5 que es la que más discrepancias presenta de todo el estudio.

Un patrón observable es que, en general, las mediciones de diámetro realizadas a 45° tienden a ser ligeramente mayores en comparación con las realizadas a 0° y 90° , aunque estas diferencias son mínimas (7,303 mm frente a los 7,295 mm a 90° o los 7,270 mm medidos a 0°), a la hora de compararlas con las medidas de la malla bien sea a nivel oclusal en la entrada del casquillo o en las 5 alturas medidas en el software (desde la base hasta la entrada oclusal), vemos que las medidas de la angulación de 45° son las que más se aproximan a esta medida (7,325 mm a la altura de entrada del casquillo), representando así el mínimo error y menor discrepancia en comparación con el archivo STL original.

Al analizar la gráfica consolidada que agrupa todas las impresoras y angulaciones, se confirma que, a pesar de la diversidad tecnológica y de marca de los dispositivos, la precisión dimensional presenta diferencias muy sutiles entre las cinco impresoras. Sin embargo, las medidas más estables, tanto en la medición real de la férula impresa con micrómetro como en la comparación con la malla medida en el software, corresponden a la angulación de 45° , que es la que ofrece mayor precisión y menor error.

Por tanto, la angulación de 45° es la que presenta mayor estabilidad y precisión dimensional, con valores más homogéneos entre la férula y el casquillo.

El tercer punto medido es la Fuerza de encaje del casquillo en la propia férula, representa el objetivo principal del estudio, evaluada mediante el dinamómetro midiendo la fuerza que ejerce el casquillo en la propia férula, encontramos una clara influencia de la angulación de impresión sobre este parámetro crítico para la funcionalidad clínica del dispositivo, siendo el factor medido el objetivo principal del estudio y el que más discrepancias ha tenido entre las diferentes pruebas.

Los datos obtenidos en las cinco impresoras muestran un aumento progresivo y significativo de la fuerza necesaria para insertar el casquillo conforme se incrementa la angulación de la férula durante la impresión, siendo el valor más alto registrado a 90° . Esta tendencia se refleja consistentemente en todas las unidades evaluadas, con diferencias marcadas en comparación con las fuerzas medidas a 0° y 45° , donde la fuerza de encaje es notablemente menor.

Este comportamiento puede atribuirse a que la orientación de 90° afecta la geometría y el ajuste entre la férula y el casquillo, probablemente generando un mayor grado de interferencia o fricción durante el ensamblaje. Aunque una fuerza adecuada de encaje es necesaria para garantizar la estabilidad y precisión del casquillo dentro de la férula, valores excesivamente altos en la introducción del casquillo pueden dificultar su manipulación, aumentar el desgaste del material, incluso dilatar la propia resina o crear microfracturas en la resina, ya que el casquillo es de material metálico y tiene mayor dureza que la resina utilizada.

Desde una perspectiva clínica y práctica, la angulación de impresión de 45° se presenta como la opción más equilibrada, al proporcionar una fuerza de encaje moderada que garantiza un ajuste adecuado sin generar resistencias excesivas. La impresión a 0° registra la fuerza más baja, lo que podría resultar en un ajuste demasiado laxo y menor estabilidad. Por otro lado, la impresión a 90° , aunque ofrece una fuerza elevada, puede ocasionar interferencias o dificultades intraoperatorias.

En conclusión, se recomienda optimizar el proceso de impresión orientando las férulas a 45°, con el objetivo de alcanzar un equilibrio óptimo entre precisión dimensional, dureza y fuerza de encaje.

Y, para terminar, el último parámetro evaluado es la Longitud del tubo de inserción del casquillo medida hasta el borde de la férula por la cara interna a nivel de los incisivos centrales (11-21). Las mediciones, realizadas con micrómetro físico, evidencian que la angulación de impresión influye ligeramente en las dimensiones finales. En general, las piezas impresas a 0° presentan una longitud algo mayor en comparación con las angulaciones de 45° y 90°, que tienden a mostrar valores ligeramente inferiores pero muy próximos.

Al contrastar estos datos físicos con la medición obtenida directamente en el modelo digital o malla (realizada con software de análisis Meshmixer y Meshlab), se observa una buena concordancia en las dimensiones medidas. Esta coincidencia confirma la precisión de las impresoras y la fidelidad del proceso de digitalización y post-procesamiento para reproducir fielmente las dimensiones originales del diseño CAD, aunque podemos observar con diferencias muy pequeñas pero reales, cómo una vez más, los valores medios registrados con el micrómetro en la medición de las férulas impresas a 45° (15,736 mm frente a los 15,406 mm medidos a 90° y los 15,592 mm medidos a 0°), se aproxima más a la medición de la propia malla que tiene un valor de 15,342 mm.

Los resultados indican que la angulación de impresión afecta muy sutilmente a la longitud del tubo de inserción del casquillo, manteniendo una estabilidad dimensional que asegura un ajuste adecuado en el sistema guiado. Aunque la impresión a 0° presenta una ligera tendencia a dimensiones mayores, la angulación a 45° muestra una ventaja práctica al mantener una longitud más cercana a la medida digital ideal, lo que contribuye a minimizar posibles distorsiones y mejorar la estabilidad dimensional general. Esta orientación favorece un ajuste más uniforme y predecible del conjunto, alineándose con los resultados observados en dureza, precisión dimensional y fuerza de entrada del casquillo. Por tanto, desde una perspectiva clínica y técnica, la impresión a 45° puede considerarse la opción más equilibrada y recomendable para la fabricación de férulas guiadas.

Estos hallazgos se alinean con múltiples estudios previos en la literatura científica como pueden ser los de Unkovskiy et al. (2018) (28); Derban et al. (2021) (29); Williams et al. (2022) (30) o el de García et al. (2024) (31), que aunque ninguno se base en endodoncia guiada y se basen en cirugía u otros campos como la ortodoncia, destacan la superioridad de orientaciones intermedias, principalmente alrededor de 45°, para mejorar la precisión, propiedades mecánicas y eficiencia en la impresión de dispositivos dentales aditivos.

5 Conclusiones

Considerando las limitaciones de este estudio, de los resultados obtenidos se extrajeron las siguientes conclusiones:

- La dureza de las férulas impresas varía según la angulación, siendo 45° la que ofrece valores más consistentes y elevados, lo que indica una mejor compactación del material, aunque todas cumplen con creces la dureza mínima recomendada de 80D.
- Las mediciones del diámetro externo en las dos alturas (en la férula y en el casquillo), mantienen alta precisión en todas las angulaciones, pero dentro de estas, las de 90° presentan las máximas discrepancias posibles en medidas y las que presentan menor error y mayor estabilidad son las anguladas a 45°, incluso comparadas con el STL original.
- En cuanto a la fuerza de encaje, esta aumenta con la angulación, alcanzando el valor más alto a 90°, lo que puede dificultar la introducción del casquillo o complicaciones intraoperatorias; en contraste, 45° brinda una fuerza moderada que garantiza un ajuste estable sin excesiva resistencia.
- Finalmente, la longitud del tubo de inserción del casquillo varía ligeramente con la angulación, siendo 45° la que mejor se aproxima a las dimensiones del modelo digital (STL original), favoreciendo un ajuste uniforme y predecible.
- Por lo tanto, en conclusión, la impresión a 45° representa un equilibrio óptimo entre dureza, precisión dimensional y fuerza de encaje, recomendándose para la fabricación de férulas guiadas. Después de la posición de 45°, la más precisa fue la de 0° (posición horizontal, paralela al eje de impresión) y por último a 90° (posición vertical, perpendicular al eje).

6 Referencias bibliográficas

1. Abarca J, Barraza C, Matamala P, Mazzeo G, Monardes H. Endodoncia guiada Para el manejo de Canales Obliterados, Reporte de Caso 2021;14:187–90. <https://doi.org/10.4067/S2452-55882021000200187>.
2. Kulinkovych-Levchuk K, Pecci-Lloret MP, Castelo-Baz P, Pecci-Lloret MR, Oñate-Sánchez RE. Guided Endodontics: A Literature Review 2022;19:13900. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113900>.
3. Connert T, Zehnder MS, Amato M, Weiger R, Kühl S, Krastl G. Microguided Endodontics: a method to achieve minimally invasive access cavity preparation and root canal location in mandibular incisors using a novel computer-guided technique 2018;51:247–55. <https://doi.org/10.1111/iej.12809>.
4. Strbac GD, Schnappauf A, Giannis K, Moritz A, Ulm C. Guided Modern Endodontic Surgery: A Novel Approach for Guided Osteotomy and Root Resection 2017;43:496–501. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.11.001>.
5. Connert T, Zehnder MS, Weiger R, Kühl S, Krastl G. Microguided Endodontics: Accuracy of a Miniaturized Technique for Apically Extended Access Cavity Preparation in Anterior Teeth 2017;43:787–90. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.12.016>.
6. Zehnder MS, Connert T, Weiger R, Krastl G, Kühl S. Guided endodontics: accuracy of a novel method for guided access cavity preparation and root canal location 2016;49:966–72. <https://doi.org/10.1111/iej.12544>.
7. Connert T, Krug R, Eggmann F, Emsermann I, ElAyouti A, Weiger R, et al. Guided Endodontics versus Conventional Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using 3-dimensional-printed Teeth 2019;45:327–31. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.11.006>.
8. Tian Y, Chen C, Xu X, Wang J, Hou X, Li K, et al. A Review of 3D Printing in Dentistry: Technologies, Affecting Factors, and Applications 2021;2021:9950131. <https://doi.org/10.1155/2021/9950131>.
9. Rouzé l'Alzit F, Cade R, Naveau A, Babilotte J, Meglioli M, Catros S. Accuracy of commercial 3D printers for the fabrication of surgical guides in dental implantology 2022;117:103909. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103909>.
10. Mistry G, Sardar C, Pandey P, De Souza M, Kailaje V, Sachdev SS. 3D printed full-arch versus digital reference dental models: A systematic review 2024;20:1100–5. <https://doi.org/10.6026/9732063002001100>.
11. Mistry G, Sardar C, Pandey P, De Souza M, Kailaje V, Sachdev SS. 3D printed full-arch versus digital reference dental models: A systematic review 2024;20:1100–5. <https://doi.org/10.6026/9732063002001100>.
12. Sherman SL, Kadioglu O, Currier GF, Kierl JP, Li J. Accuracy of digital light processing printing of 3-dimensional dental models 2020;157:422–8. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.10.012>.
13. Favero CS, English JD, Cozad BE, Wirthlin JO, Short MM, Kasper FK. Effect of print layer height and printer type on the accuracy of 3-dimensional printed orthodontic models 2017;152:557–65. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.06.012>.
14. Report of formlabs dental 3D printer tech specs [Internet]. Formlabs. [citado el 25 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://dental.formlabs.com/eu/products/tech-specs/>.

15. Hassanpour M, Narongdej P, Alterman N, Moghtadernejad S, Barjasteh E. Effects of Post-Processing Parameters on 3D-Printed Dental Appliances: A Review 2024;16:2795. <https://doi.org/10.3390/polym16192795>.
16. Yu B-Y, Son K, Lee K-B. Evaluation of intaglio surface trueness and margin quality of interim crowns in accordance with the build angle of stereolithography apparatus 3-dimensional printing 2021;126:231–7. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.04.028>.
17. McCarty MC, Chen SJ, English JD, Kasper F. Effect of print orientation and duration of ultraviolet curing on the dimensional accuracy of a 3-dimensionally printed orthodontic clear aligner design 2020;158:889–97. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.03.023>.
18. Mascha EJ, Vetter TR. Significance, Errors, Power, and Sample Size: The Blocking and Tackling of Statistics 2018;126:691–8. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002741>.
19. Alghazzawi TF. 3D printing in dentistry: A paradigm shift from traditional to digital workflow. *J Contemp Dent Pract.* 2022;23(1):94–100. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/362775023>
20. Buda M, Bratos M, Sorensen JA. Accuracy of 3-dimensional computer-aided manufactured single-tooth implant definitive casts 2018;120:913–8. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.02.011>.
21. Revilla-León M, Fogarty R, Barrington JJ, Zandinejad A, Özcan M. Influence of scan body design and digital implant analogs on implant replica position in additively manufactured casts 2020;124:202–10. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.07.011>.
22. Kamble SS, Jadhav GR, Dhamande S. Digital dentistry: 3D printing applications [Internet]. [place unknown]: ResearchGate; [no date] [citado 2025 May 18]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/318443616_Digital_Dentistry_-_3D_Printing_Applications
23. Jindal P, Geerts GA, Tredoux WR, Parthasarathy J, Sinha N, Mohan S. Effects of post-curing conditions on mechanical properties of 3D printed clear dental aligners. *Korean J Orthod.* 2020;50(4):262–270. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7370079/>
24. Revilla-León M, Cascos-Sánchez R, Zeitler JM, Barmak AB, Kois JC, Gómez-Polo M. Influence of print orientation and wet-dry storage time on the intaglio accuracy of additively manufactured occlusal devices. *J Prosthet Dent.* 2024;131(6):1226–34. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.12.005>
25. Yousef H, Harris BT, Elathamna EN, Morton D, Lin W-S. Effect of additive manufacturing process and storage condition on the dimensional accuracy and stability of 3D-printed dental casts 2022;128:1041–6. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.02.028>.
26. Alshaibani RM, Fan Y, Giordano R. Effect of different storage conditions on dimensional accuracy of 3D-printed dental models. *J Prosthodont.* 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/jopr.13834>
27. Joda T, Matthisson L, Zitzmann NU. Impact of aging on the accuracy of 3D-printed dental models: An in vitro investigation. *J Clin Med.* 2020;9(5):1436. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jcm9051436>
28. Unkovskiy A, Bui PHB, Schille C, Geis-Gerstorfer J, Huettig F, Spintzyk S. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. *Dent Mater.* 2018;34:e324–e333.

- doi:10.1016/j.dental.2018.09.011. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.09.011>
29. Derban P, Negrea R, Rominu M, Marsavina L. Influence of the Printing Angle and Load Direction on Flexure Strength in 3D Printed Materials for Provisional Dental Restorations. *Materials (Basel)*. 2021;14(13):3376. doi:10.3390/ma14123376. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma14123376>
30. Williams A, Bencharit S, Yang IH, Stilianoudakis SC, Carrico CK, Tufekci E. Effect of print angulation on the accuracy and precision of 3D-printed orthodontic retainers. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2022;161(1):133-139. doi:10.1016/j.ajodo.2021.01.020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.01.020>
31. García N, Gómez-Polo M, Fernández M, Antonaya-Martín JL, Ortega R, Gómez-Polo C, et al. Influence of Printing Angulation on the Accuracy (Trueness and Precision) of the Position of Implant Analogs in 3D Models: An In Vitro Pilot Study. *Appl Sci*. 2024;14(7):2966. doi:10.3390/app14072966. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/7/2966>

7 Anexos

7.1 Anexo 1. Procedimiento y parámetros de impresora y resina utilizados

7.1.1 Características para la férula 1.

FÉRULA 1 (transparente):

1. Procedimiento de la prueba:

- Revolver y calentar resina a 27°
- Impresión
- Lavado con alcohol isopropílico 99,9% 2-3 minutos
- Curado con polimerizador de gas nitrógeno Tera Harz Cure (1000 fotos, aprox 2-3 minutos)

2. Parámetros impresora:

Nombre	Unizz dental NBEE2
Precio	10.000 euros
Material	resina
Fuente de luz	LCD
Intensidad de luz	405 nm
Volumen de impresión	192 x 120 x 180 mm (4,14 mm ³)
Resolución XY (tamaño del píxel)	3840x2160 (50 µm)
Altura de capa	50 µm
Velocidad de impresión	280 mm/h
Tiempo de exposición	1,500-2,500 s

3. Parámetros resina:

Nombre	Keyprint keymodel ultra
Precio	80 euros/kg
Alargamiento a la rotura	5%
Fuerza de extensión	50 MPa
Resistencia a la flexión	70 MPa
Viscosidad (25-27°)	500-600 cP
Dureza	-
Contracción	-

7.1.2 Características para la férula 2.

FÉRULA 2 (naranja):

1. Procedimiento de la prueba:

- Revolver y calentar resina a 27°
- Impresión
- Lavado con alcohol al 98%
- Curado con polimerizador Otofash G171-N6 (1000 fotos, aprox 2-3 minutos)

2. Parámetros impresora:

Nombre	Envisiontec D4K
Precio	15.000 euros
Material	Resina
Fuente de luz	DLP
Intensidad de luz	385 nm
Volumen de impresión	148 x 83 x 110 mm (1,35mm ³)
Resolución XY (tamaño del píxel)	3840 x 2160 (52 µm)
Altura de capa	52 µm
Velocidad de impresión	80 mm/h
Tiempo de exposición	1,500-4,000 s

3. Parámetros resina:

Nombre	Envisiontec E1-E model light (50-100 micras)
Precio	250 euros/Kg
Alargamiento a la rotura	5,5 %
Fuerza de extensión	55 Mpa
Resistencia a la flexión	90 Mpa
Viscosidad (25-27°)	150 cP
Dureza	83 <u>D</u>
Contracción	-

7.1.3 Características para la férula 3.

FÉRULA 3 (translucida):

1. Procedimiento de la prueba:

- Revolver y calentar resina a 27° (lo hace la propia impresora en la cuba)
- Impresión
- Lavado con alcohol isopropílico al 99,9% (durante 2-3 minutos)
- Curado con polimerizador de gas nitrógeno (1000 fotos, aprox. 2-3 minutos)

2. Parámetros impresora:

Nombre	Microaly versus 4k
Precio	10.000 euros
Material	Resina
Fuente de luz	DLP
Intensidad de luz	385 nm con radiómetro interno
Volumen de impresión	1,4L/101,19oz
Resolución XY (tamaño del píxel)	3840x2160 (65 µm)
Altura de capa	0,050 mm
Velocidad de impresión	40-50 mm/h
Tiempo de exposición	6,000 s

3. Parámetros resina:

Nombre	Keystone keyguide
Precio	220 euros
Alargamiento a la rotura	6,3%
Fuerza de extensión	-
Resistencia a la flexión	106 Mpa
Viscosidad (25-27°)	-
Dureza	95D
Contracción	-

7.1.4 Características para la férula 4.

Férula 4 (gris):

1. Procedimiento de la prueba:

- Revolver y calentar resina a 27°
- Impresión
- Lavado: cuba de alcohol isopropílico 99,9% durante 3 minutos
- Curado en cuba de curado 5 minutos.

2. Parámetros impresora:

Nombre	Anycubic photon M3
Precio	280 euros
Material	Resina
Fuente de luz	LCD
Intensidad de luz	405 nm
Volumen de impresión	180 x 163,9 x 102,4 mm (3 mm ³)
Resolución XY (tamaño del píxel)	4096x2560 pixeles (50 µm)
Altura de capa	0,050 mm
Velocidad de impresión	50mm/hr
Tiempo de exposición	6,000 s

3. Parámetros resina:

Nombre	Resina ABS estándar LCD
Precio	25,99 euros/kg
Alargamiento a la rotura	14,2%
Fuerza de extensión	36-53 Mpa
Resistencia a la flexión	59-70 Mpa
Viscosidad (25-27°)	150-200 MPa
Dureza	84D
Contracción	7,1%

7.1.5 Características para la férula 5.

FÉRULA 5 (translucida 2)

1. Procedimiento de la prueba:

- Revolver y calentar la resina a 25-27°
- Impresión
- Lavado con alcohol isopropílico al 99,9%
- Curado con polimerizador de nitrógeno

2. Parámetros impresora:

Nombre	Microaly versus 4k
Precio	10.000 euros
Material	Resina
Fuente de luz	DLP
Intensidad de luz	385 nm con radiómetro interno
Volumen de impresión	1,4L/101,19oz
Resolución XY (tamaño del píxel)	3840x2160 (65 µm)
Altura de capa	0,050 mm
Velocidad de impresión	40-50 mm/h
Tiempo de exposición	6,000 s

3. Parámetros resina:

Nombre	Keystone keyguide
Precio	220 euros
Alargamiento a la rotura	6,3%
Fuerza de extensión	-
Resistencia a la flexión	106 Mpa
Viscosidad (25-27°)	-
Dureza	95D
Contracción	-

7.2 Anexo 2: Mediciones de las férulas.

7.2.1 Férula 1.

7.2.1.1 Tabla de medición de dureza con relación a la angulación.

		Dureza																														
°	Pieza	Nº de medición																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
0°	Incisivo (11)	0.880	0.910	0.910	0.910	0.920	0.925	0.960	0.930	0.935	0.955	0.890	0.920	0.960	0.930	0.935	0.930	0.985	0.980	0.940	0.905	0.960	0.910	0.975	0.985	0.975	0.850	0.945	0.960	0.910	0.950	0.950
	PM 15	0.910	0.885	0.825	0.830	0.940	0.925	0.950	0.920	0.920	0.945	0.950	0.815	0.840	0.945	0.925	0.925	0.980	0.955	0.985	0.985	0.935	0.900	0.945	0.985	0.985	0.975	0.975	0.960	0.945	0.945	0.945
45°	Incisivo (11)	0.910	0.925	0.930	0.915	0.940	0.945	0.950	0.930	0.995	0.940	0.925	0.975	0.975	0.980	0.965	0.955	0.965	0.945	0.910	0.975	0.965	0.985	0.985	0.945	0.930	0.950	0.945	0.940	0.940	0.940	
	PM (15)	0.930	0.970	0.995	0.935	0.945	0.915	0.935	0.930	0.995	0.940	0.925	0.975	0.975	0.980	0.965	0.955	0.965	0.945	0.910	0.975	0.965	0.985	0.985	0.945	0.930	0.950	0.945	0.940	0.940	0.940	
90°	Incisivo (11)	0.945	0.950	0.870	0.895	0.915	0.865	0.845	0.890	0.940	0.870	0.915	0.935	0.935	0.935	0.885	0.945	0.970	0.885	0.975	0.945	0.965	0.975	0.965	0.945	0.935	0.935	0.945	0.945	0.945	0.945	
	PM (15)	0.930	0.935	0.940	0.915	0.905	0.935	0.945	0.890	0.940	0.870	0.915	0.935	0.935	0.935	0.885	0.945	0.970	0.885	0.975	0.945	0.965	0.975	0.965	0.945	0.935	0.935	0.945	0.945	0.945	0.945	

7.2.1.2 Tabla de medición del micrómetro con relación a la angulación.

		Micrómetro																													
°	Pieza	Nº de medición																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0°	n°1 (férula)	7.280	7.290	7.310	7.300	7.290	7.300	7.340	7.300	7.290	7.300	7.300	7.290	7.290	7.300	7.300	7.280	7.330	7.290	7.270	7.310	7.280	7.330	7.300	7.300	7.310	7.310	7.300	7.290	7.300	7.300
	n°2 (casquillo)	7.280	7.260	7.280	7.290	7.290	7.280	7.300	7.380	7.290	7.280	7.300	7.290	7.290	7.300	7.300	7.280	7.330	7.290	7.270	7.310	7.280	7.330	7.300	7.300	7.310	7.310	7.300	7.290	7.300	7.300
45°	n°1 (férula)	7.360	7.370	7.280	7.350	7.340	7.370	7.300	7.310	7.390	7.280	7.360	7.290	7.290	7.300	7.300	7.340	7.260	7.370	7.290	7.310	7.300	7.330	7.300	7.300	7.310	7.310	7.300	7.290	7.300	7.300
	n°2 (casquillo)	7.330	7.340	7.290	7.340	7.340	7.350	7.300	7.310	7.270	7.280	7.360	7.290	7.290	7.300	7.300	7.340	7.260	7.370	7.290	7.310	7.300	7.330	7.300	7.300	7.310	7.310	7.300	7.290	7.300	7.300
90°	n°1 (férula)	7.330	7.330	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.450	7.460	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410
	n°2 (casquillo)	7.280	7.290	7.410	7.420	7.340	7.350	7.300	7.310	7.450	7.460	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410	7.410

7.2.1.3 Tabla de medición del dinamómetro en relación con la angulación.

		Dinamómetro																													
°	Pieza	Nº de medición																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0°	Casquillo	0.025	0.015	0.010	0.014	0.009	0.012	0.023	0.029	0.031	0.020	0.016	0.032	0.028	0.028	0.013	0.015	0.016	0.018	0.024	0.019	0.027	0.009	0.012	0.014	0.015	0.020	0.015	0.022	0.017	0.017
45°	Casquillo	0.145	0.249	0.223	0.277	0.111	0.312	0.198	0.198	0.032	0.176	0.195	0.146	0.086	0.075	0.181	0.113	0.082	0.141	0.067	0.125	0.262	0.226	0.116	0.151	0.041	0.071	0.066	0.125	0.101	
90°	Casquillo	El casquillo no ha entrado, pero en vista al resto de férulas, la presión del dinamómetro sería la máxima registrable																													

7.2.1.4 Tabla de medición de la longitud del tubo de inserción del casquillo con relación a la angulación.

Longitud casquillo-férula		
Angulación	Pieza	Nº de medición
		1
0°	11-21	15.880
45°	11-21	15.675
90°	11-21	15.555

7.2.2 Férula 2

7.2.2.1 Tabla de medición de dureza con relación a la angulación.

°	Pieza	Dureza																													
		Nº de medición																													
0°	Incisivo (11)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,955	0,935	0,925	0,905	0,880	0,890	0,895	0,950	0,985	0,960	0,960	0,965	0,925	0,945	0,960	0,970	0,965	0,965	0,970	0,975	0,955	0,950	0,975	0,945	0,910	0,935	0,965	0,965	0,960	0,935	0,945
45°	Incisivo (11)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,925	0,925	0,905	0,960	0,900	0,940	0,925	0,960	0,965	0,935	0,955	0,940	0,960	0,935	0,965	0,965	0,965	0,965	0,945	0,970	0,985	0,935	0,930	0,905	0,975	0,955	0,960	0,975	0,985	0,975
90°	Incisivo (11)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,955	0,935	0,925	0,985	0,980	0,965	0,945	0,940	0,925	0,920	0,925	0,930	0,930	0,975	0,945	0,965	0,945	0,945	0,940	0,990	0,955	0,955	0,990	0,965	0,940	0,945	0,955	0,965	0,935	0,975

7.2.2.2 Tabla de medición del micrómetro con relación a la angulación.

°	Pieza	Micrómetro																													
		Nº de medición																													
0°	n°1 (férula)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		7,220	7,230	7,220	7,230	7,240	7,250	7,240	7,250	7,260	7,270	7,280	7,290	7,300	7,310	7,320	7,330	7,340	7,350	7,360	7,370	7,380	7,390	7,400	7,410	7,420	7,430	7,440	7,450	7,460	7,470	7,480
45°	n°2 (casquillo)	Este casquillo es más ancho en sentido lateral que delante-detrás																													
		7,330	7,340	7,350	7,360	7,370	7,380	7,390	7,400	7,410	7,420	7,430	7,440	7,450	7,460	7,470	7,480	7,490	7,500	7,510	7,520	7,530	7,540	7,550	7,560	7,570	7,580	7,590	7,600	7,610	7,620
90°	n°1 (férula)	Este casquillo es más ancho en sentido lateral que delante-detrás																													
		7,170	7,180	7,190	7,200	7,210	7,220	7,230	7,240	7,250	7,260	7,270	7,280	7,290	7,300	7,310	7,320	7,330	7,340	7,350	7,360	7,370	7,380	7,390	7,400	7,410	7,420	7,430	7,440	7,450	7,460	7,470

7.2.2.3 Tabla de medición del dinamómetro en relación con la angulación.

°	Pieza	Dinamómetro																													
		Nº de medición																													
0°	Casquillo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,025	0,055	0,040	0,594	0,550	2,759	2,623	2,868	2,170	2,131	2,321	1,842	2,170	2,478	3,120	2,436	1,719	1,644	1,436	1,560	1,727	1,656	2,342	2,456	2,106	1,960	1,997	1,745	2,848	1,810
45°	Casquillo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,467	0,407	0,594	0,550	2,759	2,623	2,868	2,170	2,131	2,321	1,842	2,170	2,478	3,120	2,436	1,719	1,644	1,436	1,560	1,727	1,656	2,342	2,456	2,106	1,960	1,997	1,745	2,848	1,810	
90°	Casquillo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		3,845	3,711	2,989	2,759	2,623	2,868	2,170	2,131	2,321	1,842	2,170	2,478	3,120	2,436	1,719	1,644	1,436	1,560	1,727	1,656	2,342	2,456	2,106	1,960	1,997	1,745	2,848	1,810		

7.2.2.4 Tabla de medición de la longitud del tubo de inserción del casquillo con relación a la angulación.

Longitud casquillo-férula		
Angulación	Pieza	Nº de medición
		1
0°	11-21	15,755
45°	11-21	15,550
90°	11-21	15,720

7.2.3 Férula 3.

7.2.3.1 Tabla de medición de dureza con relación a la angulación.

		Dureza																																	
°	Pieza	N° de medición																																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
0°	Incisivo (11)	0,950	0,885	0,990	0,930	0,945	0,965	0,925	0,965	0,965	0,940	0,945	1,000	0,965	0,965	0,960	0,975	0,930	0,945	0,960	0,960	0,975	0,965	0,985	0,900	0,945	0,970	0,985	0,990	0,975	0,945	0,930	0,975	0,930	0,930
	PM 15	0,995	0,965	0,935	0,965	0,935	0,965	0,975	0,965	0,965	0,965	0,965	0,955	0,965	0,945	0,935	0,905	0,915	0,930	0,985	0,965	0,955	0,955	0,985	0,960	0,975	0,985	0,980	0,990	0,965	0,945	0,980	0,980	0,985	0,985
45°	Incisivo (11)	0,950	0,955	0,940	0,935	0,970	0,915	0,970	0,965	0,965	0,965	0,965	0,950	0,950	0,930	0,915	0,980	0,980	0,940	0,985	0,965	0,955	0,945	0,985	0,960	0,965	0,980	0,985	0,990	0,965	0,945	0,980	0,980	0,985	0,985
	PM (15)	0,935	0,940	0,945	0,965	0,970	0,915	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,950	0,950	0,930	0,915	0,980	0,980	0,940	0,985	0,965	0,955	0,945	0,985	0,960	0,965	0,980	0,985	0,990	0,965	0,945	0,980	0,980	0,985	0,985
90°	Incisivo (11)	0,955	0,955	0,935	0,965	0,970	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,950	0,950	0,930	0,915	0,980	0,980	0,940	0,985	0,965	0,955	0,945	0,985	0,960	0,965	0,980	0,985	0,990	0,965	0,945	0,980	0,980	0,985	0,985
	PM (15)	0,935	0,935	0,945	0,965	0,970	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,950	0,950	0,930	0,915	0,980	0,980	0,940	0,985	0,965	0,955	0,945	0,985	0,960	0,965	0,980	0,985	0,990	0,965	0,945	0,980	0,980	0,985	0,985

7.2.3.2 Tabla de medición del micrómetro con relación a la angulación.

		Micrómetro																																			
°	Pieza	N° de medición																																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30						
0°	n°1 (ferula)	7,300	7,280	7,290	7,310	7,300	7,310	7,230	7,240	7,290	7,280	7,290	7,200	7,290	7,280	7,290	7,310	7,320	7,280	7,280	7,270	7,290	7,250	7,250	7,260	7,290	7,270	7,290	7,260	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280	
	n°2 (casquillo)	7,300	7,280	7,290	7,310	7,300	7,310	7,230	7,240	7,290	7,280	7,290	7,200	7,290	7,280	7,290	7,310	7,320	7,280	7,280	7,270	7,290	7,250	7,250	7,260	7,290	7,270	7,290	7,260	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280	
45°	n°1 (ferula)	7,280	7,340	7,400	7,410	7,240	7,250	7,230	7,240	7,240	7,250	7,220	7,400	7,400	7,200	7,210	7,300	7,420	7,410	7,420	7,250	7,260	7,190	7,250	7,340	7,260	7,260	7,270	7,270	7,270	7,270	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280	
	n°2 (casquillo)	7,340	7,270	7,280	7,310	7,230	7,240	7,230	7,240	7,240	7,250	7,220	7,400	7,400	7,200	7,210	7,300	7,420	7,410	7,420	7,250	7,260	7,190	7,250	7,340	7,260	7,260	7,270	7,270	7,270	7,270	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280	
Este casquillo es más ancho en sentido delante-detrás que lateral																																					
90°	n°1 (ferula)	7,310	7,320	7,260	7,270	7,250	7,260	7,260	7,260	7,260	7,270	7,240	7,270	7,260	7,280	7,270	7,290	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	7,280	7,240	7,270	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	7,260	
	n°2 (casquillo)	7,260	7,270	7,240	7,250	7,230	7,240	7,230	7,240	7,240	7,250	7,220	7,400	7,400	7,200	7,210	7,300	7,420	7,410	7,420	7,250	7,260	7,190	7,250	7,340	7,260	7,260	7,270	7,270	7,270	7,270	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280	7,260	7,280

7.2.3.3 Tabla de medición del dinamómetro con relación a la angulación.

		Dinamómetro																																	
°	Pieza	N° de medición																																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
0°	Casquillo	0,937	0,751	1,312	0,894	0,908	1,407	1,098	1,414	1,005	1,140	0,961	1,683	0,813	0,988	0,945	1,388	2,119	1,075	1,068	1,016	1,004	0,883	1,004	1,097	1,013	0,957	1,013	1,377	1,116	1,249	1,116	1,249	1,116	1,249
45°	Casquillo	1,943	1,483	1,974	1,467	1,311	1,112	1,543	2,015	1,957	0,971	1,388	0,597	2,550	3,082	2,175	2,119	1,603	1,822	1,639	1,911	2,225	1,984	1,911	1,780	1,766	1,562	1,766	1,266	1,099	1,469	1,266	1,469	1,266	1,469
90°	Casquillo	6,452	8,220	9,546	7,686	7,263	8,107	6,959	6,514	8,502	8,529	7,171	9,757	8,302	5,846	7,972	7,500	6,528	7,226	8,891	8,346	8,346	7,984	8,346	8,572	6,420	5,985	6,420	7,240	5,420	7,444	7,240	7,444	7,240	7,444

7.2.3.4 Tabla de medición de la longitud del tubo de inserción del casquillo con relación a la angulación.

Longitud casquillo-férula		
Angulación	Pieza	N° de medición
		1
0°	11-21	15,765
45°	11-21	15,585
90°	11-21	15,680

7.2.4 Férula 4.

7.2.4.1 Tabla de medición de dureza con relación a la angulación.

		Dureza																														
°	Pieza	Nº de medición																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
0°	Incisivo (11)	0,945	0,980	0,905	0,975	0,965	0,910	0,925	0,970	0,965	0,950	0,965	0,970	0,975	0,925	0,960	0,975	0,970	0,940	0,915	0,945	0,985	0,990	0,985	0,990	0,965	0,975	0,960	0,985	0,990	0,915	0,975
	PM 15	0,990	0,975	0,960	0,950	0,940	0,935	0,925	0,935	0,945	0,935	0,945	0,935	0,945	0,935	0,960	0,975	0,970	0,930	0,915	0,945	0,985	0,990	0,985	0,990	0,965	0,975	0,960	0,985	0,990	0,915	0,975
45°	Incisivo (11)	0,940	0,970	0,960	0,975	0,965	0,910	0,925	0,970	0,965	0,950	0,965	0,970	0,975	0,925	0,960	0,975	0,970	0,940	0,915	0,945	0,985	0,990	0,985	0,990	0,965	0,975	0,960	0,985	0,990	0,915	0,975
	PM (15)	0,970	0,940	0,960	0,975	0,985	0,945	0,935	0,945	0,935	0,945	0,935	0,945	0,935	0,960	0,975	0,970	0,930	0,915	0,945	0,985	0,990	0,985	0,990	0,965	0,975	0,960	0,985	0,990	0,915	0,975	
90°	Incisivo (11)	0,920	0,925	0,940	0,955	0,965	0,960	0,975	0,970	0,965	0,950	0,965	0,970	0,975	0,925	0,960	0,975	0,970	0,940	0,915	0,945	0,985	0,990	0,985	0,990	0,965	0,975	0,960	0,985	0,990	0,915	0,975
	PM (15)	0,925	0,980	0,940	0,975	0,985	0,945	0,935	0,945	0,935	0,945	0,935	0,945	0,935	0,960	0,975	0,970	0,930	0,915	0,945	0,985	0,990	0,985	0,990	0,965	0,975	0,960	0,985	0,990	0,915	0,975	

7.2.4.2 Tabla de medición del micrómetro con relación a la angulación.

		Micrómetro																													
°	Pieza	Nº de medición																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0°	n°1 (ferula)	7,210	7,220	7,270	7,280	7,210	7,210	7,210	7,210	7,220	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230
	n°2 (casquillo)	7,300	7,250	7,260	7,210	7,220	7,280	7,290	7,310	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320
45°	n°1 (ferula)	7,350	7,300	7,330	7,340	7,380	7,390	7,350	7,360	7,330	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340	7,340
	n°2 (casquillo)	7,340	7,350	7,240	7,230	7,300	7,380	7,420	7,380	7,390	7,300	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310	7,310
90°	n°1 (ferula)	7,420	7,430	7,230	7,240	7,220	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230	7,230
	n°2 (casquillo)	7,300	7,310	7,190	7,200	7,270	7,280	7,330	7,340	7,310	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320	7,320

7.2.4.3 Tabla de medición del dinamómetro con relación a la angulación.

		Dinamómetro																													
°	Pieza	Nº de medición																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0°	Casquillo	El casquillo entra y sale totalmente sin ejercer presión ninguna																													
45°	Casquillo	El casquillo entra y sale totalmente sin ejercer presión ninguna																													
90°	Casquillo	El casquillo entra y sale totalmente sin ejercer presión ninguna																													

7.2.4.4 Tabla de medición de la longitud del tubo de inserción del casquillo con relación a la angulación.

Longitud casquillo-férula		
Angulación	Pieza	Nº de medición
		1
0°	11-21	15,515
45°	11-21	15,026
90°	11-21	15,031

7.2.5 Férula 5.

7.2.5.1 Tabla de medición de dureza con relación a la angulación.

°	Pieza	Dureza																													
		Nº de medición																													
0°	Incisivo (11) PM 15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,915	0,980	0,975	0,945	0,950	0,960	0,940	0,965	0,950	0,930	0,955	0,990	0,975	0,915	0,960	0,945	0,965	0,930	0,965	0,925	0,940	0,960	0,930	0,945	0,990	0,985	0,950	0,965	0,955	0,935	0,965	0,950
45°	Incisivo (11) PM (15)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,975	0,960	0,940	0,940	0,980	0,990	0,975	0,985	0,940	0,980	0,945	0,940	0,965	0,910	0,930	0,955	0,970	0,985	0,980	0,975	0,960	0,935	0,965	0,965	0,990	0,990	0,945	0,975	0,945	0,965	0,965
90°	Incisivo (11) PM (15)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		0,930	0,975	0,935	0,935	0,940	0,955	0,935	0,985	0,995	0,940	0,915	0,965	0,925	0,930	0,965	0,925	0,990	0,915	0,940	0,965	0,965	0,960	0,955	0,990	0,985	0,965	0,955	0,945	0,965	0,965

7.2.5.2 Tabla de medición del micrómetro con relación a la angulación.

°	Pieza	Micrómetro																													
		Nº de medición																													
0°	n°1 (férula) n°2 (casquillo)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		7,260	7,270	7,260	7,270	7,260	7,270	7,280	7,250	7,260	7,300	7,310	7,250	7,260	7,260	7,270	7,280	7,260	7,300	7,250	7,260	7,260	7,260	7,270	7,280	7,280	7,240	7,300	7,300	7,280	7,260	7,270	7,270
45°	n°1 (férula) n°2 (casquillo)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		7,370	7,380	7,270	7,280	7,290	7,300	7,250	7,260	7,290	7,300	7,310	7,220	7,240	7,340	7,210	7,210	7,240	7,250	7,290	7,300	7,300	7,360	7,370	7,190	7,200	7,260	7,270	7,290	7,300	7,180	7,190	7,250
90°	n°1 (férula) n°2 (casquillo)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		7,180	7,190	7,290	7,300	7,350	7,360	7,120	7,130	7,340	7,350	7,140	7,150	7,300	7,310	7,200	7,210	7,270	7,000	7,140	7,380	7,390	7,370	7,380	7,130	7,140	7,310	7,320	7,130	7,140	7,250

7.2.5.3 Tabla de medición del dinamómetro con relación a la angulación.

°	Pieza	Dinamómetro																													
		Nº de medición																													
0°	Casquillo	El casquillo entra y sale totalmente sin ejercer presión ninguna																													
45°	Casquillo	El casquillo entra y sale totalmente sin ejercer presión ninguna																													
90°	Casquillo	El casquillo entra y sale totalmente sin ejercer presión ninguna																													

7.2.5.4 Tabla de medición de la longitud del tubo de inserción del casquillo con relación a la angulación.

Longitud casquillo-férula		
Angulación	Pieza	Nº de medición
		1
0°	11-21	15,044
45°	11-21	15,042
90°	11-21	15,045