



**Formulación de una resina de impresión 3D biocompatible para elaboración de guías
quirúrgicas con resistencia a la degradación por luz UV.**

Carolina Andrea Arcos Soto

Informe correspondiente a la modalidad de semestre de industria presentado como requisito para
optar al título de:
Ingeniera Química

Asesor interno

Juan Miguel Marín Sepúlveda, Doctor en Ciencias Químicas

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería
Pregrado Ingeniería Química
Medellín, Colombia

2023

Cita	(Arcos Soto, 2023)
Referencia	Arcos Soto, C. (2023). <i>Formulación de una resina de impresión 3D biocompatible para la elaboración de guías quirúrgicas con resistencia a la degradación por luz UV</i> . [Practica empresarial]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Proyecto desarrollado gracias a la gerencia de investigación y desarrollo, equipo de trabajo de investigación y gestión tecnológica de la compañía New Stetic S.A. y la coordinación de prácticas académicas del departamento de ingeniería química de la facultad de ingeniería de la Universidad de Antioquia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado en primer lugar a Dios, por haberme dado la capacidad y la fuerza para enfrentar cada reto que se presentó en el camino y así poder culminar de la mejor manera cada meta. A mis padres, por darme la vida, por ser el motor de mi vida, por apoyarme en cada dificultad, por todos los esfuerzos realizados para poderme guiar, especialmente por su amor incondicional.

A mi familia por todo el apoyo moral, por ayudarme en cada momento, por sus palabras de aliento, cada uno de ellos fueron fundamentales para poder culminar esta etapa.

A mi hermana y mis amigas que siempre estuvieron para mí, para alentarme, y ayudarme a sobrellevar cada dificultad, y por siempre estar para mí en todo momento.

A mi pareja, quien me acompañó durante todo este recorrido, gracias por apoyarme, escucharme y ayudarme a cumplir esta etapa.

Agradecimientos

Un agradecimiento profundo y enorme a mi alma mater, al departamento de ingeniería química de la universidad de Antioquia y a todos aquellos maestros que me brindaron sus conocimientos de la mejor manera y con la mayor disposición para enseñar y aportar a mi desarrollo educativo.

A mi asesor interno de la práctica empresarial por su disposición en todo momento para guiarme durante esta etapa.

A New Stetic S.A. por darme la oportunidad de vivir mi práctica empresarial en una empresa tan importante, por permitirme compartir con personas excepcionales, de las cuales recibí un aprendizaje muy enriquecedor, por permitirme crecer tanto personal como profesionalmente.

Finalmente, quiero dar mis más profundos agradecimientos a los ingenieros Henry Rodríguez, Andrés Vásquez, por toda su disposición de ayudarme a crecer profesionalmente, y en especial a Julián Moreno y Alejandro Ossa quienes me acompañaron, apoyaron, y enseñaron con su amistad, dirección y conocimiento, los cuales fueron fundamentales en el desarrollo de este trabajo.

Tabla de contenido

Resumen	13
Abstract	14
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. Objetivo General	16
1.2. Objetivos específicos.....	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Impresión 3D por estereolitografía.....	17
2.2. Color	19
2.3. Guía quirúrgica	19
2.4. Implante dental	20
2.5. Poscurado de piezas.....	21
2.6. Método sistema de litografía estereoscópica para desarrollar la curva de trabajo.	22
2.7. Resistencia y Modulo a la flexión	23
3. METODOLOGÍA	24
3.1. Revisión bibliográfica.....	24
3.2. Diseño y formulación de resinas biocompatibles para fabricación de guías quirúrgicas.	25
3.3. Caracterización de resinas formuladas	26

3.4. Elaboración de modelos impresos con la mejor formulación para llevarla a un entorno real.

28

4. RESULTADOS Y ANALISIS..... 28

4.1. Caracterización de las resinas fabricadas..... 28

4.2. Archivo Ini..... 38

4.3. Impresión de guías quirúrgicas 39

4.4. Pruebas de estabilidad de color 58

4.5. Prueba de flexión..... 61

4.6. Caso clínico 67

5. CONCLUSIONES..... 70

6. REFERENCIAS 71

Índice de Tablas

Tabla 1. Experimentos por realizar variando la dosificación de aditivos.	25
Tabla 2. Tiempos de exposición con sus correspondientes espesores de capa.	29
Tabla 3. Profundidad de penetración de luz energía critica para cada formulación preliminar...	30
Tabla 4. Espesor de capa para cada tiempo de exposición. para la combinación de aditivos.....	34
Tabla 5. Formulaciones correspondientes a los experimentos realizados en la última etapa.	36
Tabla 6. Espesores de capa para las 5 formulaciones realizadas con monómero de mayor grado de etoxilacion y Z% iniciador 1.	37
Tabla 7. Condiciones de configuración de maquina PowerCure.	43
Tabla 8. Formulación óptima para resina de guías quirúrgicas.....	56
Tabla 9. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X1% aditivo de no amarillamiento.....	62
Tabla 10. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X2% aditivo de no amarillamiento.....	62
Tabla 11. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X3% aditivo de no amarillamiento.....	63
Tabla 12. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X4% aditivo de no amarillamiento.....	63
Tabla 13. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X5% aditivo de no amarillamiento.....	64
Tabla 14. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y1% aditivo anti-UV.	64
Tabla 15. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y2% aditivo anti-UV.	64
Tabla 16. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y3% aditivo anti-UV.	65
Tabla 17. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y4% aditivo anti-UV.	65

Tabla 18. Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y5% aditivo anti-UV. 65

Tabla 19. Propiedades de flexión para resina comercial VeriGuide. 66

Índice de figuras

Figura 1. Impresión 3D -----	17
Figura 2 Guía quirúrgica superior e inferior -----	20
Figura 3 Estructura de un implante dental -----	21
Figura 4 Regresión lineal correspondiente a la formulación 1 en donde a la resina de guías quirúrgicas se le agrega Y1% Aditivo anti-UV -----	30
Figura 5 Espesor de capa en función de la energía máxima en la adición de aditivo anti-UV ---	31
Figura 6 Espesor de capa en función de energía máxima en la adición de Aditivo de no amarillamiento -----	31
Figura 7 Regresión lineal correspondiente a la combinación de aditivos X1% Aditivo de no amarillamiento - Y2% aditivo anti-UV (Caso 1)-----	33
Figura 8 Regresión lineal correspondiente a la combinación de aditivos X2% Aditivo de no amarillamiento - Y1% Aditivo anti-UV. (caso 2)-----	34
Figura 9 Archivo STL para las probetas de calibración utilizadas -----	38
Figura 10 Probetas digitales de calibración de precisión y sobrecurado-----	39
Figura 11 Flujo de trabajo en la impresión 3D de guías quirúrgicas -----	40
Figura 12 Modelo digital de guía quirúrgica seleccionada -----	41
Figura 13 ELC-3DPrint Box permite poscurar los materiales de impresión 3D-----	42
Figura 14 Máquina de poscurado PowerCure de ArmaResin -----	43
Figura 15 Guía quirúrgica poscurado 15 minutos en cabina ArmaResin a una intensidad de luz nivel 16 y ciclo de 1 comparada con una guía sin poscurar de la formulación 0% de aditivo ----	44
Figura 16 Guías quirúrgicas correspondientes a resina base adicionando X1% Aditivo de no amarillamiento -----	45

Figura 17 Guías quirúrgicas correspondientes a X2% de Aditivo de no amarillamiento -----	46
Figura 18 Guías quirúrgicas correspondientes a X3% de Aditivo de no amarillamiento -----	46
Figura 19 Guías quirúrgicas correspondientes a X4% de Aditivo de no amarillamiento -----	46
Figura 20 Guías quirúrgicas correspondientes a X5% de Aditivo de no amarillamiento -----	47
Figura 21 Guías quirúrgicas correspondientes a Y1% de aditivo anti-UV -----	48
Figura 22 Guías quirúrgicas correspondientes a Y2% de aditivo anti-UV -----	48
Figura 23 Guías quirúrgicas correspondientes a Y3% de aditivo anti-UV -----	49
Figura 24 Guías quirúrgicas correspondientes a Y4% de aditivo anti-UV -----	49
Figura 25 Guías quirúrgicas correspondientes a Y5% de aditivo anti-UV -----	50
Figura 26 Guías quirúrgicas correspondiente a X2% aditivo de no amarillamiento - Y1% aditivo anti-UV-----	50
Figura 27 Guías quirúrgicas correspondiente a X1% aditivo de no amarillamiento – Y2% aditivo anti-UV-----	51
Figura 28 Guías quirúrgicas correspondientes a la adición en su formulación de Z% de iniciador 1 (derecha) y sin iniciador 1 (izquierda) -----	51
Figura 29 Guías quirúrgicas correspondientes a la adición de iniciador 1 sin aditivo (derecha) y adición de X3% de aditivo de no amarillamiento sin iniciador 1 -----	52
Figura 30 Guías quirúrgicas correspondientes a la adición de la formulación base de Z% iniciador 1 sin esterilizar (izquierda) y esterilizadas (derecha) con una combinación de monómero X de 50% de etoxilacion 4 con 50% de etoxilacion 10 -----	52

Figura 31 Guías quirúrgicas correspondientes a la adición de la formulación base de Z% iniciador 1 (izquierda) y adición de Y3% de aditivo anti-UV (derecha) utilizando monómero X de etoxilacion 4----- 53

Figura 32 Guías quirúrgicas en la adicción a la formulación base Z% de iniciador 1 - X3% de aditivo de no amarillamiento sin esterilizar (izquierda) y esterilizada (derecha) en ambos casos sin colorear.----- 53

Figura 33 Guías quirúrgicas con 60% de monómero X etoxilacion 4 y 40% de monómero X etoxilacion 10, Z% iniciador 1 y X3% aditivo de no amarillamiento sin esterilizar (izquierda) y esterilizada (derecha)----- 55

Figura 34 Guías quirúrgicas con diferente proporción de monómero X, 40% etoxilacion 10 - 60% etoxilacion 4(izquierda), 60% etoxilacion 10 - 40% etoxilacion 4 (centro) y 100% etoxilacion 10 (derecha) todos sin colorear y esterilizado----- 55

Figura 35 Guías quirúrgicas correspondientes a la resina comercial VeriGuide ----- 57

Figura 36 Resina para guías quirúrgicas VeriGuide ----- 58

Figura 37 Estabilidad de color para aditivo anti-UV aumentando su dosificación de Y1%-Y5% en orden descendente usando monómero X etoxilacion 4 poscurado durante 30 minutos ----- 59

Figura 38 Estabilidad de color para aditivo de no amarillamiento aumentando su dosificación de X1%-X5% en orden descendente usando monómero X etoxilacion 4 poscurado durante 30 min- 59

Figura 39 Estabilidad de color para combinación de aditivos, Y2% aditivo anti-UV - X1% aditivo de no amarillamiento (izquierda) y viceversa (derecha)----- 60

Figura 40 Estabilidad de color de probetas impresas con resina comercial VeriGuide----- 61

Figura 41 Maquina universal utilizada en ensayo de flexión----- 62

Figura 42 Archivo digital guías quirúrgicas superior (izquierda) e inferior (derecha)----- 67

Figura 43 Impresión guías quirúrgicas en impresora 385 nm ASIGA. ----- 67

Figura 44 Guías quirúrgicas poscurado, superior e inferior adaptadas con anillos específicos en el modelo dental.----- 68

Figura 45 Inserción de implante dental haciendo uso de guía quirúrgica ----- 69

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CAD	Diseño asistido por computador
Ini	Archivo digital de Impresión 3D
3D	Tres dimensiones
Ca	Profundidad de curado
Ec	Energía crítica
Dp	Profundidad de penetración de luz
UV	Ultravioleta
°C	Grados Centígrados
E_{max}	Energía máxima
mm	Milímetros
J	Julios
cm	centímetros
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

El objetivo de este trabajo es lograr el desarrollo de la formulación de una resina biocómpatible para la elaboración de guías quirúrgicas con resistencia a la degradación del color por luz UV para su uso en impresoras 3D de 405nm de longitud de onda, por el método de estereolitografía SLA para aplicaciones dentales, mediante el mejoramiento de esta a partir del desarrollo de una serie de experimentos evaluando el comportamiento de dos aditivos. Para cumplir con el objetivo del trabajo se comenzó con la formulación base obtenida previamente por personal de la empresa New Stetic S.A.; a partir de esto se evaluaron dos diferentes aditivos, una especie absorbedor de luz UV y una especie de no amarillamiento variando sus porcentajes dentro de la formulación base, se realizaron pruebas de impresión a 405 nm para cada formulación realizada, se caracterizó cada formulación mediante probetas de calibración mirando los detalles de impresión, adaptabilidad, precisión de detalles y degradación de color, se realizaron archivos Ini para cada formulación modificando los parámetros de impresión, además de pruebas de estabilidad de color, propiedades mecánicas como módulo de flexión y resistencia a al flexión. De acuerdo con las pruebas realizadas se llegó a una formulación óptima en cuanto a la composición del aditivo seleccionado y parámetros de impresión para el uso en impresora 385 nm, por último, se realizó una prueba de desempeño de su uso en un entorno real para evaluar la funcionalidad de la resina desarrollada logrando satisfactoriamente los objetivos planteados.

Palabras claves: impresión 3D, estereolitografía, guía quirúrgica, implante dental, degradación, luz U

Abstract

The objective of this work is to achieve the development of a biocompatible resin formulation for the elaboration of surgical guides with resistance to color degradation by UV light for use in 3D printers of 405nm wavelength, by the SLA stereolithography method for dental applications, by improving it from the development of a series of experiments evaluating the behavior of two additives. In order to fulfill the objective of the work, we started with the base formulation previously obtained by the personnel of New Stetic S.A. company. From this, two different additives were evaluated, a UV light absorber species and a non-yellowing species varying their percentages within the base formulation, printing tests were performed at 405 nm for each formulation, each formulation was characterized through calibration test tubes looking at the printing details, adaptability, detail accuracy and color degradation, Ini files were made for each formulation modifying the printing parameters, in addition to tests of color stability, mechanical properties such as flexural modulus and flexural strength. According to the tests carried out, an optimum formulation was reached in terms of the composition of the selected additive and printing parameters for use in 385 nm printers. Finally, a performance test of its use in a real environment was carried out to evaluate the functionality of the developed resin, satisfactorily achieving the objectives set.

Keywords: 3D printing, stereolithography, surgical guide, dental implant, degradation, UV light.

INTRODUCCIÓN

Los avances en el desarrollo de la tecnología digital y con ello el progreso en técnicas han logrado mejorar la eficiencia en las ciencias médicas, entre ellas la odontología. La producción de modelos mediante impresión 3D, también llamada prototipado rápido, ha aumentado debido a que posibilita una mayor precisión, optimiza los tratamientos reduce el tiempo operatorio, entre otras.

Uno de los avances se ha dado en el desarrollo de guías quirúrgicas, dispositivos biomédicos indispensables para la inserción adecuada de los implantes dentales, (Henaó et al., 2018). Estas guías deben ser translúcidas para una mayor observación del espacio dental de cada paciente por parte del especialista, pero a su vez deben ser de un color que sea estético, llamativo para su comercialización.

En el proceso de fabricación, en la última etapa, se realiza un poscurado, el cual es un proceso adicional al que se somete la pieza fabricada para obtener las máximas propiedades de resistencia mecánica, a la temperatura, biocompatibilidad y de resistencia química; el cual consiste en exponer la pieza a la luz y al calor; dicho proceso tiende a amarillar las piezas. Por dicho motivo, la empresa New Stetic S.A. se ha interesado en desarrollar productos con máxima calidad y estabilidad en sus propiedades, para ello, se estudiaron diferentes formulaciones de resina base con la adición de 2 aditivos para prevenir dicho amarillamiento, y conservar su color. Además, se observó la viabilidad de utilizar un monómero distinto en la formulación base de diferente etoxilación y marca comercial, se caracterizó cada una de las posibles formulaciones y se verificó su funcionalidad.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Formular una resina de impresión 3D biocompatible para la fabricación de guías quirúrgicas con adecuada estabilidad de color, compatible con impresoras 3D por estereolitografía de 385 nm.

1.2. Objetivos específicos

Diseñar y fabricar formulaciones de resinas de impresión 3D para guías quirúrgicas, variando composición de aditivos de estabilidad de color.

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas, de impresión y mecánicas de las resinas diseñadas y fabricadas.

Caracterizar la estabilidad de color de las resinas diseñadas y fabricadas.

Validar el desempeño de las resinas biocompatibles en un entorno real.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Impresión 3D por estereolitografía

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. La estereolitografía es una de estas técnicas de fabricación, es un proceso de fabricación aditiva, se denomina comúnmente como impresión 3D de resina. Inicialmente el prototipo de fabricación se deposita en planos virtuales realizados por diseño asistido por ordenador (CAD) o por software de modelado y animación, que la impresora utiliza posteriormente como guía para la impresión (Melchels et al., 2010).

Figura 1.
Impresión 3D



Nota. Fuente: (Impresoras3D.com, 2021)

El proceso de impresión por estereolitografía consiste en exponer una resina foto polimerizable, que se encuentran en una cuba, a una luz con determinadas longitudes de onda, para inducir la polimerización de los monómeros y oligómeros que la componen en geometrías rígidas o flexibles solidificadas. Los objetos tridimensionales se obtienen mediante la adición sucesiva de finas capas, impresas una encima de otra. Cada capa es una sección transversal del objeto que la fuente de luz traza en la superficie de la resina (Formalabs, 2022).

Al finalizar la impresión, se debe retirar o remover las piezas sólidas de la plataforma utilizando una espátula plana, teniendo cuidado de no rayar la superficie de impresión. Luego de que la impresión esté lista, la pieza tendrá una cierta cantidad de resina en la superficie, la cual para tener un buen resultado final se debe garantizar una forma correcta de limpieza, se enjuaga durante al menos 10 minutos con etanol en ultrasonido. Si el objeto impreso en 3D no se limpia, la resina en la superficie puede distorsionar la forma del modelo, se pueden encontrar goteos curados y la parte puede quedar pegajosa al final.

Después de este paso de limpieza, se debe secar las piezas antes del poscurado aplicando aire a presión. El último paso incluye el curado en una caja/cámara de curado UV de alta potencia durante cierta cantidad de tiempo a determinadas intensidades de luz y rangos de longitud de onda.

2.2. Color

El color es un concepto extremadamente complicado ya que combina una característica de las ondas electromagnéticas (factor objetivo) y una sensación que percibe el observador (respuesta subjetiva) (L'Oréal Groupe, 2021). Según la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), el color percibido se define como el aspecto de la percepción visual mediante el cual un observador puede distinguir entre dos campos del mismo tamaño, forma y textura basándose en las diferencias en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación. Esta misma organización definió el color como la característica de la percepción visual que puede ser descrita por los atributos de tinte o tono, valor o luminosidad e intensidad, saturación o croma.

El tono es la propiedad que distingue el rojo del naranja, del azul, del azul verdoso, y así sucesivamente. La saturación es la propiedad que distingue al rojo del rosa. A veces se dice que describe la "pureza" del color. Se dice que las propiedades matiz y saturación describen colectivamente la cromaticidad del color de interés.

2.3. Guía quirúrgica

Una guía diagnóstica y/o quirúrgica es un dispositivo biomédico que permite la preparación de los alveolos quirúrgicos y la inserción controlada de los implantes dentales respetando las estructuras anatómicas y garantizando que la futura rehabilitación sea adecuada.

En general, las guías de diagnóstico y quirúrgico deben poseer unas propiedades de rigidez, estabilidad y precisión para garantizar la exactitud y seguridad durante los procedimientos de inserción de los implantes, idealmente les corresponde tener incorporados marcadores radiopacos, ser retentivas y estables intraoralmente, confortables, esterilizables y compatibles con la técnica tomográfica (Rouzé l'Alzit et al., 2022).

Figura 2

Guía quirúrgica superior e inferior



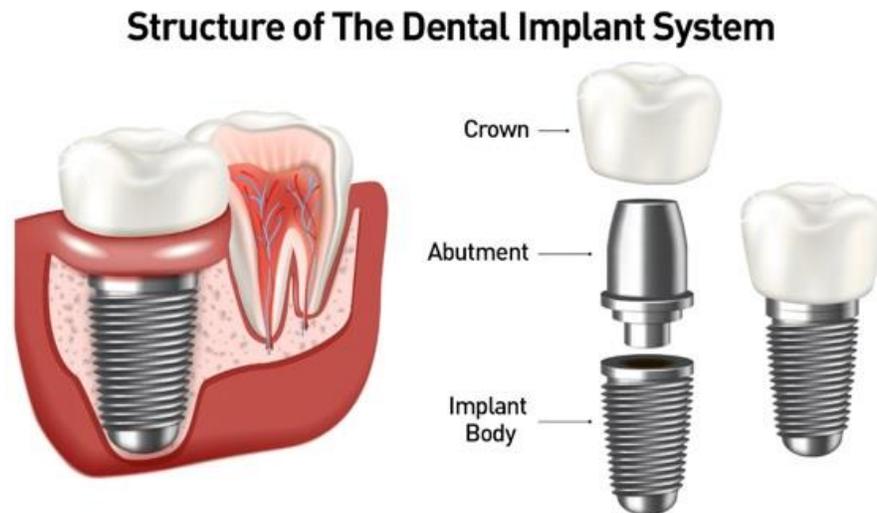
2.4. Implante dental

Los implantes dentales son dispositivos médicos implantados quirúrgicamente en la mandíbula para restaurar la capacidad de una persona para masticar o su apariencia. Brindan soporte para dientes artificiales (falsos), como coronas, puentes o dentaduras postizas.

Los implantes consisten en un cuerpo y pilar de implante dental, pueden incluir un tornillo de fijación, el cuerpo del implante se inserta quirúrgicamente en la mandíbula en lugar de la raíz del diente mientras que el pilar del implante dental se une al cuerpo del implante mediante el tornillo de fijación y se extiende a través de las encías para sostener los dientes adjuntos. (U.S. FOOD & DRUG, 2021)

Figura 3

Estructura de un implante dental.



Nota. Fuente: (U.S. FOOD & DRUG, 2021)

2.5. Poscurado de piezas

Durante la impresión 3D, la resina se polimeriza hasta el punto de que tiene las dimensiones exactas y es lo suficientemente sólida. Esto significa que ha alcanzado un grado de polimerización del 50 al 85 %, según la resina y el tipo de impresora 3D. Por lo general, las mejores propiedades físicas y mecánicas se alcanzan con un grado de polimerización > 95 %, lo que significa que las piezas impresas no han alcanzado su máximo potencial y necesitan de luz ultravioleta para alcanzar ese grado de polimerización (LIQCREATE, 2022).

El poscurado es el proceso de exponer una pieza impresa a luz ultravioleta por un tiempo determinado para aumentar el grado de polimerización y maximizar algunas de las propiedades físicas y biológicas del material. Las resinas termoestables de curado posterior pueden aumentar

las propiedades físicas como por ejemplo la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y temperatura de distorsión por calor por encima de lo que el material alcanzaría normalmente a temperatura ambiente (Hapco. Inc, n.d.).

Al exponer las piezas a luz UV toman un color amarillento, el cual hace que las piezas luzcan viejas y desgastadas. Cuando la luz ultravioleta incide en la resina o en alguno de sus elementos, ya sea de forma directa o indirecta, degrada los polímeros, (es decir, la estructura molecular) del material.

2.6. Método sistema de litografía estereoscópica para desarrollar la curva de trabajo.

Para una impresión exitosa y eficiente se requiere propiedades de foto curado, profundidad de penetración de la luz (D_p), profundidad de curado (C_d), energía crítica (E_c), energía máxima (E_{max}), nivel de potencia, tiempo de exposición para cada capa, para ello se realiza el método sistema de litografía por medio de la curva de trabajo para cada tipo de resina.

La profundidad de penetración de luz (D_p) es la profundidad a la que la luz penetra en el interior de la superficie de la resina (mm/s), está relacionada con la absorbancia de la composición de la resina, esto es posible ya que la radiación UV golpea la superficie de la resina, se dispersa y se absorbe. La profundidad de curado (C_d) que es la profundidad / grosor de la resina curada (mm), este parámetro es ideal cuando es proporcional al logaritmo de la exposición máxima en la línea central por fuente de luz UV.

$$Cd = Dp \ln\left(\frac{E_{max}}{E_c}\right) \quad \text{Ec. 1}$$

La energía máxima (E_{max}) es la energía del láser en la superficie de la resina, dicha energía es el resultado de la multiplicación de la intensidad de la luz por el tiempo de exposición (mJ/cm^2), la energía crítica (E_c) es la requerida para iniciar la polimerización (mJ/cm^2), esto permite obtener una recta al graficar Cd en función de E_{max} .

$$y = m \ln(x) + b \quad \text{Ec. 2.}$$

Al obtener la curva de trabajo el valor de Dp se obtiene mediante la pendiente de la curva que se forma, y la intersección del eje x es la energía crítica, estos dos parámetros son críticos para determinar el desempeño de la resina en el proceso de impresión, también para tener una configuración adecuada de potencia, velocidad, condiciones de curado para así lograr resultados positivos.

2.7. Resistencia y Modulo a la flexión

La resistencia a la flexión es el esfuerzo máximo que soporta una probeta justo antes que se rompa o se agriete en el ensayo de flexión, el módulo de flexión es una medida de rigidez de un material en dirección de la flexión. Un alto módulo indicará que el material es rígido mientras si tuviese un módulo de flexión bajo indica que el material es más flexible.

Durante el ensayo se somete una probeta a la deformación por flexión donde la posición inferior de la probeta se alarga y el material en la parte superior se comprime, para que el material no experimente un cambio de longitud, durante esa deformidad en las secciones transversales (Juan Carlos Briones Yupanqui, 2017).

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3 * F * L}{2 * A * E^2} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\text{Modulo flexión} = \frac{F2 * L^3}{(4 * A * E^3)^2} * 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

F: Carga sobre el punto de fractura

L: Longitud del tramo del soporte

A: Ancho de la probeta

E: Espesor de la probeta

F2: Carga aplicada en el centro de la probeta

3. METODOLOGÍA

3.1. Revisión bibliográfica

Inicialmente se realiza una búsqueda bibliográfica con el objetivo de conocer a fondo el desarrollo, fabricación, propiedades de las resinas fotopolimerizables usadas en estereolitografía, así como sus aplicaciones en el campo dental.

3.2. Diseño y formulación de resinas biocompatibles para fabricación de guías quirúrgicas.

Inicialmente se desarrolla pruebas de ensayo y error a partir de monómeros disponibles en la empresa para elaborar formulaciones preliminares con las cuales se observa el comportamiento al adicionar los aditivos a estudiar, realizando la verificación al realizar el pos curado en diferentes tiempos. Posteriormente se realiza la resina base de la cual se tomarán diferentes muestras para realizar los experimentos.

Se desarrolla una serie de experimentos encontrados en la tabla 1 con el objetivo de mejorar la precisión en la formulación de guías quirúrgicas y obtener unas piezas con estabilidad en su color incluso después del proceso de poscurado. Los factores por analizar son la concentración aditivo anti-UV y de aditivo de no amarillamiento y las variables de respuesta son la estabilidad el color, curvas de trabajo y la resistencia a la flexión.

Tabla 1.

Experimentos por realizar variando la dosificación de aditivos.

	Monómero 1	Monómero X	Monómero 2	Aditivo de no amarillamiento (%)	Aditivo anti-UV (%)	Foto iniciador	Iniciador 1
1	x	x	X	X1	-	x	x
2	x	x	X	X2	-	x	x
3	x	x	X	X3	-	x	x
4	x	x	X	X4	-	x	x
5	x	x	X	X5	-	x	x

6	x	x	X	-	Y1	x	x
7	x	x	X	-	Y2	x	x
8	x	x	X	-	Y3	x	x
9	x	x	X	-	Y4	x	x
10	x	x	X	-	Y5	x	x
11	x	x	X	X1	Y2	x	x
12	x	x	X	X2	Y1	x	x

3.3. Caracterización de resinas formuladas

La caracterización de las formulaciones del DOE para cada aditivo se llevarán a cabo con los mismos análisis efectuados a las resinas comerciales ya establecidos; con base en los resultados que se obtengan se evaluará si el comportamiento presentado es aceptable para la realización de pruebas reales en laboratorios clínicos.

Primeramente, se realizan curvas de trabajo para cada experimento, al encender la impresora, se verifica que cada uno de sus elementos este en correcto estado, se realiza una limpieza a la plataforma y se establece el nivel de potencia en 34%. Antes de adicionar la resina en la bandeja de impresión, se debe agitar la resina para lograr una buena homogenización y dejar reposar para que no presente burbujas en la bandeja. Se ingresa la bandeja en la impresora y se asegura con las manijas, entrar al panel de ajuste de la impresora en modo Material Test y se define un radio Spot Radius de 5 mm.

Después de tener los parámetros listos para impresión, en material test Spot Timer se varía el tiempo registrando la Intensidad de luz (I), se retira la probeta con mucho cuidado y se mide el espesor de cada probeta con un espesímetro ingresando el dato en la columna de curado (Cd).

Se realiza la impresión de piezas de prueba para cada formulación del DOE con el propósito de observar la variación en el color final y el comportamiento de la resina en el proceso, variando los tiempos de poscurado.

Adicionalmente se realiza la prueba a la estabilidad de color, se inicia con la impresión de modelos de guías quirúrgicas sometiénolas a distintos tiempos de post curado, siguiendo las normas ISO 4049, ISO 10477, las cuales indican que el procedimiento a seguir para resinas fotopolimerizables se debe tener 3 probetas por cada ensayo, la primera será el patrón a comparar, la cual se la deja guardada durante 7 días, la segunda se coloca en seco en cabina a 37°C durante 24 horas, pasado este tiempo se cubre la mitad en papel aluminio, y se las lleva a cabina de irradiación durante 24 horas, al terminar se las guarda por 5 días, y la tercera se coloca en agua a 37°C por 7 días; al terminar los 3 ensayos se observan las 3 probetas y se compara la estabilidad del color.

Finalmente, se realiza la prueba a la resistencia y módulo a la flexión, se inicia realizando la impresión de las probetas utilizadas en flexión, se lavan por 10 min con etanol en el ultrasonido y secan muy bien antes de ingresarlas a la cámara de poscurado. En la máquina universal se realizan dos ensayos, en el primero las probetas en seco, ubicando la probeta a analizar horizontalmente sobre el soporte, se manipula el cabezote movable hasta que el émbolo

haga contacto con la probeta. Luego se inicia la máquina en el ensayo de módulo flexión para así ingresar los datos de ancho y espesor de cada probeta para que el ensayo comience; en el segundo se dejan las probetas en agua a 37°C durante 24 horas, pasado el tiempo se fallan de igual forma al ensayo anterior.

3.4. Elaboración de modelos impresos con la mejor formulación para llevarla a un entorno real.

Al determinar una formulación viable, se realiza un proceso completo en la implementación de una cirugía dental, se realiza inicialmente un escaneo intraoral en un modelo digital para el diseño de la guía quirúrgica, luego se realiza su impresión 3D, finalmente, se hace un acompañamiento al cirujano dental en donde se verifica el correcto funcionamiento de la guía quirúrgica y de sus propiedades, recolectando evidencias que corroboren la no decoloración de la resina de guías quirúrgicas.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1. Caracterización de las resinas fabricadas

Se realizaron diferentes experimentos adicionando a la formulación base distintos porcentajes iniciando en X1% hasta X5% de aditivo cada uno por separado, en una primera etapa se obtuvieron 12 experimentos en total, se realizaron curvas de trabajo para observar el cambio en tiempos de impresión, espesores de capa y energía crítica que requería cada una de las formulaciones realizadas.

Los resultados de las curvas de trabajo realizadas preliminarmente se observan en la tabla 2.

Tabla 2.

Tiempos de exposición con sus correspondientes espesores de capa.

t (s)	Espesor de capa (mm)											
	Sin Aditivo		Aditivo de no amarillamiento (%)					Aditivo anti-UV (%)				
	Sin color	0%	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
2	0,064		0,064	0,058	0,065	0,059	0,060	0,052	0,050	0,045	0,041	0,040
3	0,079	0,077	0,081	0,080	0,078	0,072	0,084	0,069	0,065	0,060	0,053	0,051
4	0,095	0,089	0,089	0,092	0,092	0,082	0,097	0,082	0,075	0,065	0,060	0,060
5	0,102	0,102	0,093	0,097	0,103	0,097	0,105	0,088	0,079	0,071	0,066	0,063
6	0,107	0,107	0,099	0,108	0,106	0,102	0,110	0,098	0,086	0,082	0,072	0,072
8	0,123	0,125	0,120	0,121	0,121	0,117	0,125	0,106	0,094	0,093	0,085	0,078
10	0,135	0,131	0,128	0,129	0,134	0,125	0,145	0,115	0,105	0,099	0,087	0,092
12	0,137	0,143	0,140	0,144	0,148	0,140	0,150	0,121	0,114	0,108	0,096	0,097
14	0,152	0,151	0,146	0,149	0,149	0,147	0,155	0,128	0,116	0,111	0,101	0,099
16	0,158	0,158	0,155	0,155	0,156	0,160	0,164	0,134	0,120	0,114	0,105	0,101
20	0,164	0,170	0,162	0,169	0,171	0,169	0,178	0,144	0,132	0,124	0,112	0,110
25	0,175	0,182	0,181	0,183	0,184	0,184	0,187	0,159	0,141	0,136	0,120	0,121
30	0,185	0,193	0,188	0,191	0,192	0,195	0,199	0,170	0,150	0,143	0,126	0,126
35	0,198	0,203	0,199	0,209	0,216	0,207	0,217	0,179	0,158	0,148	0,136	0,134
40	0,208	0,213	0,205	0,215	0,218	0,217	0,221	0,182	0,161	0,158	0,143	0,140
45	0,216	0,220	0,221	0,223	0,228	0,217	0,231	0,190	0,171	0,163	0,149	0,145

Mediante la figura 4, la cual tiene un comportamiento lineal se determinó la profundidad de penetración de luz (D_p), el cual corresponde a la pendiente de la ecuación obtenida de la regresión lineal de los datos, y la energía crítica necesaria mediante regresión lineal. Para todas

las formulaciones se realizó el mismo procedimiento obteniendo un coeficiente de determinación R2 mayor al 99% garantizando una confiabilidad de los datos existiendo la menor variabilidad entre ellos, dichos parámetros se observan en la tabla 3.

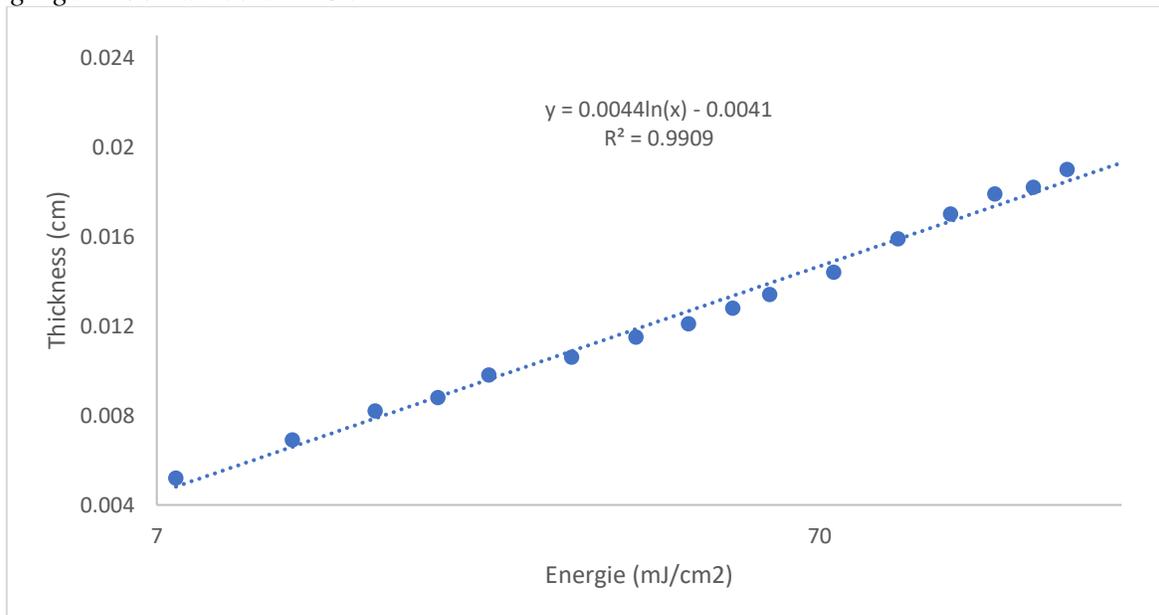
Tabla 3.

Profundidad de penetración de luz energía crítica para cada formulación preliminar.

	Sin Aditivo		Aditivo de no amarillamiento (%)					Aditivo anti-UV (%)				
	Sin color	0%	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
Dp (um)	4,9	5,3	5,1	5,3	5,3	5,4	5,4	4,4	3,8	3,8	3,4	3,4
Ec	2,309	2,770	2,718	2,667	2,618	3,152	2,524	2,539	2,202	2,447	2,639	2,563

Figura 4

Regresión lineal correspondiente a la formulación 1 en donde a la resina de guías quirúrgicas se le agrega Y1% Aditivo anti-UV



Como se observa en la figura 5, el aditivo anti-UV el cual protege contra la degradación causada por los rayos UV al ser expuesta la pieza cuando se realiza el proceso de pos curado, afecta en mayor grado los tiempos de impresión ya que al aumentar el porcentaje de dosificación los espesores disminuyen ya que el aditivo anti-UV tiene la capacidad de absorber radiación electromagnética, impidiendo que la luz emitida por el proyector de la impresora traspase la resina disminuyendo así las capas de polimerización, lo cual disminuye la capacidad de penetración de luz (D_p) como se observa en la tabla 3. Este parámetro nos indica que tan sensible es la resina a los cambios en la salida de luz, un D_p más bajo garantiza una mayor precisión en los detalles de las piezas impresas, además de un mejor rendimiento cuando es expuesto a varios tiempos con diferente potencia de la fuente de luz, sin embargo, causa tiempos de impresión mayores. En cambio, el aditivo no amarillamiento no presenta cambios significativos en los tiempos de impresión ni en los espesores de capa como se observa en la figura 6, la línea de tendencia de cada dosis es similar al comportamiento de la resina base sin aditivo.

La energía crítica (E_c) se mantiene dentro del rango en las 12 formulaciones, al agregar los aditivos se evidencia que no afecta en gran medida la cantidad mínima de energía requerida para formar una capa sólida y, por lo tanto, la cantidad mínima de energía requerida para la impresión 3D.

En una segunda etapa, se realizó una combinación de los aditivos con una dosificación de X1% de aditivo de no amarillamiento y Y2% de aditivo anti-UV (caso 1), e inversamente (caso 2), las curvas de trabajo correspondientes a estas formulaciones se observan en las figuras 7 y 8

con sus respectivos espesores de capa para un tiempo de exposición de 2 a 45 segundos, profundidad de penetración y ecuación crítica en la tabla 4.

Figura 7

Regresión lineal correspondiente a la combinación de aditivos X1% Aditivo de no amarillamiento - Y2% aditivo anti-UV (Caso 1)

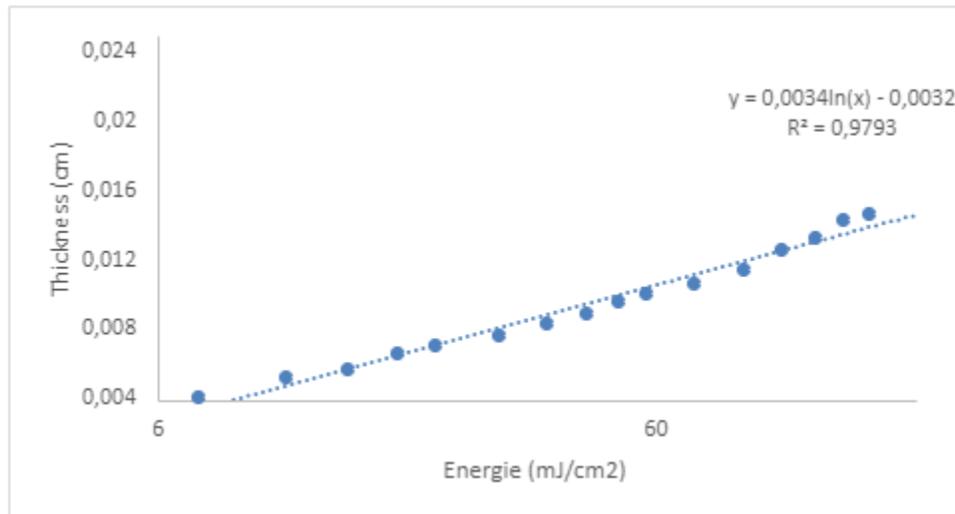


Figura 8

Regresión lineal correspondiente a la combinación de aditivos X2% Aditivo de no amarillamiento - Y1% Aditivo anti-UV. (caso 2)

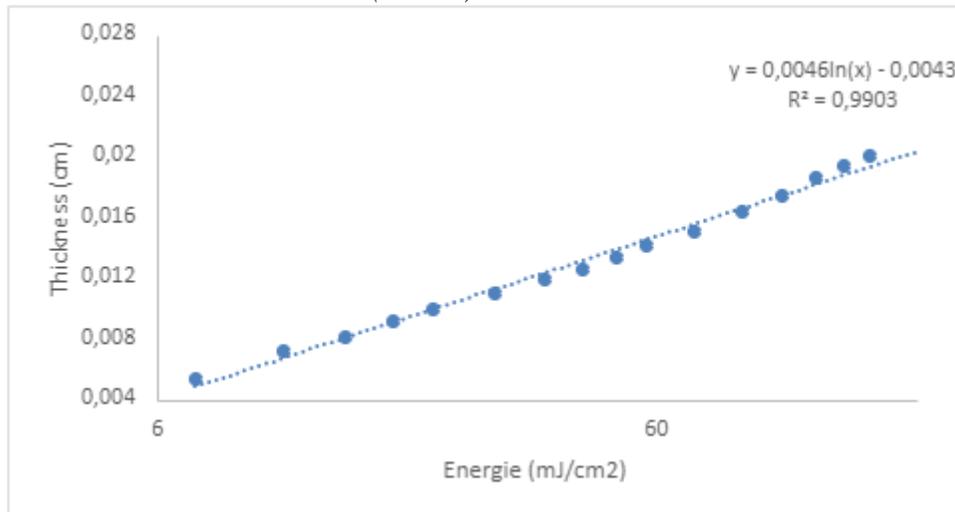


Tabla 4.

Espesor de capa para cada tiempo de exposición. Para la combinación de aditivos.

	Espesor de capa (mm)	
t (s)	Caso 1	Caso 2

2	0,041	0,054
3	0,053	0,072
4	0,057	0,081
5	0,067	0,091
6	0,071	0,100
8	0,077	0,110
10	0,084	0,119
12	0,090	0,126
14	0,097	0,134
16	0,101	0,141
20	0,107	0,150
25	0,115	0,164
30	0,126	0,174
35	0,133	0,186
40	0,143	0,194
45	0,147	0,200
Dp (um)	3,4	4,6
Ec	2,563	2,547

Los espesores de capa de las formulaciones presentadas en la tabla 4 tienen un comportamiento similar al comportamiento individual del aditivo de mayor proporción, al tener mayor cantidad del aditivo anti-UV tanto los espesores de capa y la profundidad de penetración disminuyen al aumentar el tiempo de exposición. Cuando se adiciona mayor cantidad del aditivo

de no amarillamiento no hay un cambio significativo en dichos espesores y no afecta la profundidad de penetración ni la energía crítica necesaria comparando con los resultados de la resina base sin aditivos en su formulación.

En una tercera etapa se realizó un cambio en uno de los monómeros utilizados en la formulación base, se utiliza un monómero con un grado de etoxilacion mayor, inicialmente se utilizaba monómero de grado 4 cambiando a grado 10, esto aumentando su peso molecular y flexibilidad.

Además, se adiciona un iniciador 1 en una dosificación de Z%, el cual actúa ayudando a mantener las propiedades y eficacia de un producto cuando está expuesto al aire (para evitar un cambio de olor, color, textura...). (L'Oréal Groupe, 2021) y que puede proporcionar restauraciones con resultados más satisfactorios por tener una estabilidad de color más aceptable. (Carlos Carrillo Sanchez & A. Montserrat Monroy Pedraza, 2009)

Se realizaron 6 experimentos, a la formulación base se la adiciona la dosificación observada en la tabla 5 para cada experimento.

Tabla 5.

Formulaciones correspondientes a los experimentos realizados en la última etapa.

	Aditivo de no amarillamiento (X3%)	Iniciador 1 (Z%)	Monómero Et 10 (%)	Monómero Et 4 (%)	Aditivo anti-UV (Y3%)
Formulación 1	x	X	x		
Formulación 2		X		x	

Formulación 3		X	x	x	
Formulación 4		X	x		x
Formulación 5	x	X	x		

*En la formulación 5 se cambia de la marca comercial del monómero utilizado con igual grado de etoxilación.

Al adicionar antioxidante y cambiar el grado de etoxilación de uno de los monómeros base los espesores de capa no difieren en gran medida a los obtenidos para la formulación de resina sin agregar aditivo (tabla 1), la profundidad de penetración se encuentra sin cambios observables excepto al utilizar el aditivo anti-UV en el cual disminuye por lo mencionado anteriormente, esto se observa en la tabla 6.

Tabla 6.

Espesores de capa para las 5 formulaciones realizadas con monómero de mayor grado de etoxilación y Z% iniciador 1.

Espesor de capa (mm)					
t (s)	Formulación 1	Formulación 2	Formulación 3	Formulación 4	Formulación 5
2	0,051	0,044	0,053		0,059
3	0,073	0,066	0,072	0,053	0,075
4	0,088	0,08	0,083	0,064	0,09
5	0,097	0,091	0,093	0,069	0,097
6	0,103	0,098	0,103	0,074	0,106
8	0,116	0,113	0,113	0,085	0,119
10	0,127	0,121	0,123	0,090	0,128
12	0,136	0,129	0,132	0,096	0,138
14	0,145	0,133	0,138	0,100	0,146
16	0,151	0,142	0,144	0,103	0,154
20	0,160	0,153	0,156	0,117	0,165
25	0,171	0,161	0,169	0,125	0,176

30	0,183	0,173	0,176	0,128	0,183
35	0,189	0,183	0,185	0,138	0,190
40	0,197	0,190	0,193	0,143	0,198
45	0,203	0,197	0,200	0,148	0,204
Dp (um)	4,8	4,8	4,7	3,5	4,8
Ec	2,449	2,718	2,444	2,642	2,301

4.2. Archivo Ini

Una vez obtenidas las curvas de trabajo se procede a realizar el archivo ini para las formulaciones que se les adicionó aditivo anti-UV ya que afecta en gran medida las propiedades de impresión. Para esto se realizaron distintas pruebas manipulando los parámetros off set y Multiplier, iniciando en 1 para Multiplier y 0.3 en off set. Se imprime probetas de calibración las cuales se encuentran en las figuras 4 y 5, que utilizan para verificar adaptación, precisión de los detalles, sobrecurado y escalas XY consecutivamente para así encontrar los parámetros perfectos para obtener una impresión óptima.

Figura 9

Archivo STL para las probetas de calibración utilizadas.

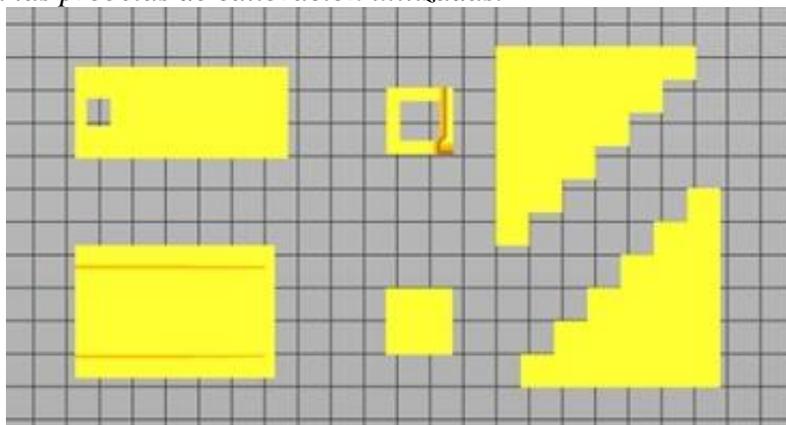
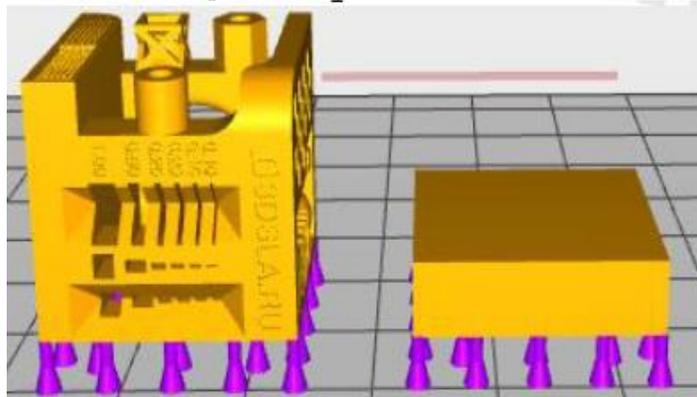


Figura 10

Probetas digitales de calibración de precisión y sobrecurado.



4.3. Impresión de guías quirúrgicas

Para realizar la impresión de las guías quirúrgicas y observar estabilidad de color y propiedades mecánicas, se realizó el flujo de trabajo observado en la figura 6.

Figura 11

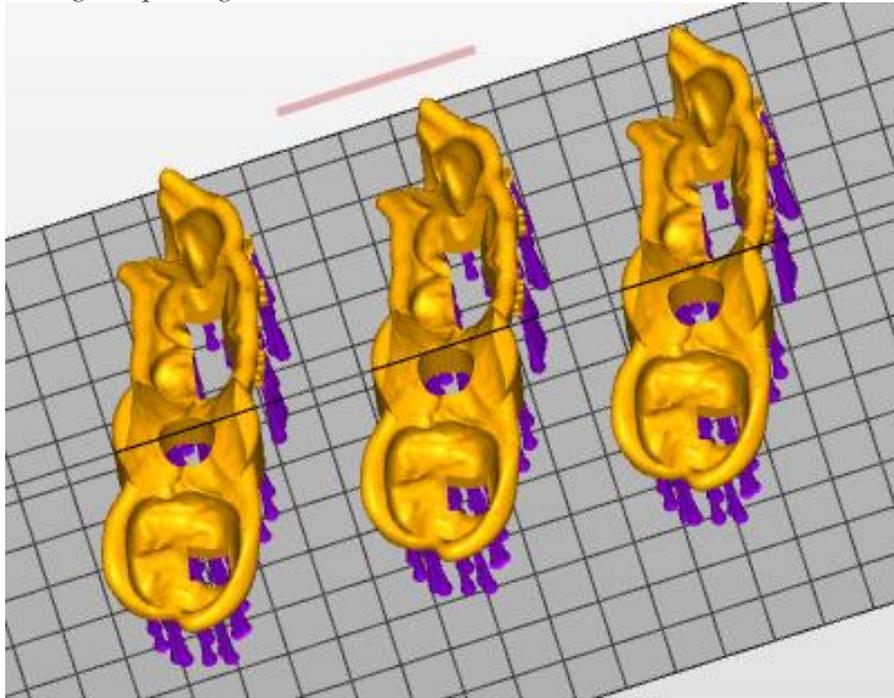
Flujo de trabajo en la impresión 3D de guías quirúrgicas.



El modelo de guía quirúrgica utilizada para observar la degradación de color es el que se muestra en la figura 11.

Figura 12

Modelo digital de guía quirúrgica seleccionada.



Después del proceso de impresión, la pieza impresa aún no está completamente curada, por tanto, luego de realizar una limpieza en alcohol se realiza diferentes ciclos de poscurado a 15 y 30 minutos en la maquina LC-3DPrint Box la cual está equipada con 12 bombillas de luz ultravioleta colocadas estratégicamente dentro de la caja. Esto asegura que un producto se ilumine desde todos los lados, lo que da como resultado un ciclo de curado rápido y uniforme; Solo se cuenta con manejo del tiempo, se observa en la figura 13. (NextDent, 2021).

Figura 13

ELC-3DPrint Box le permite poscurar los materiales de impresión 3D dental NextDent.



Adicionalmente se cuenta con una segunda máquina de poscurado, PowerCure de ArmaResin, la cual posee distintas opciones de manejo (figura 14), como: (ArmaResin, 2020)

- Configuración de tiempo: hasta 995 segundos
- Ajuste de intensidad de luz - Nivel 1 a Nivel 16
- Ciclo de Curado - Nivel 1 a Nivel 10

Figura 14

Máquina de poscurado PowerCure de ArmaResin



Para su uso se realizó distintos tipos de poscurado, todos ellos con una duración de 900 segundos o 15 minutos en las condiciones observadas en la tabla 7.

Tabla 7

Condiciones de configuración de maquina PowerCure.

	Condición 1	Condición 2	Condición 3	condición 4
Intensidad de luz	16	10	10	10
Ciclo de curado	1	10	4	4
LED (BL)	Desactivado	Desactivado	Desactivado	Activado

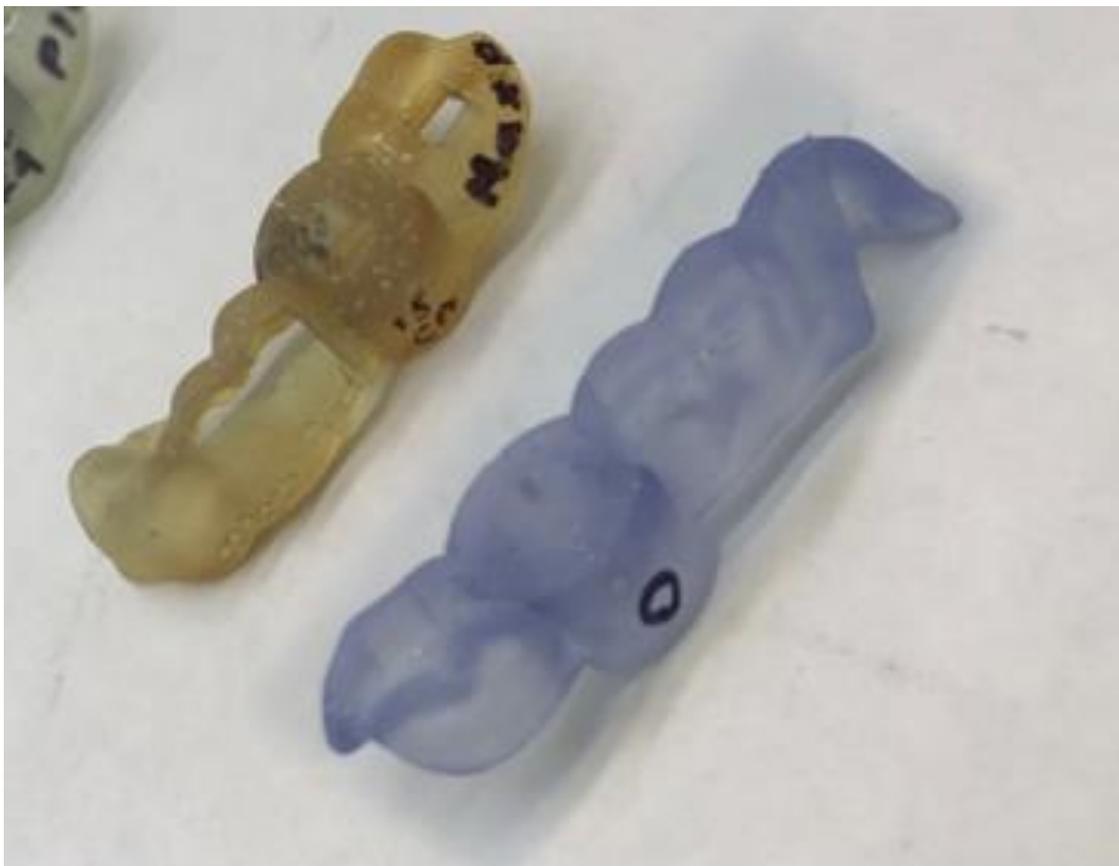
Cuando se realiza la primera formulación encontrada en la tabla 2 donde no se agrega ningún porcentaje de aditivo se expone la pieza obtenida en la máquina PowerCure a la condición 1 dando como resultado una degradación en mayor grado ya que la máquina está a potencia de

luz máxima, como se observa en la figura 15 se degrada completamente el color, pasando de un color violeta a amarillo.

Por tal razón se deja la intensidad de luz en un valor más neutro, en 10 para los demás experimentos.

Figura 15

Guía quirúrgica poscurado 15 minutos en cabina ArmaResin a una intensidad de luz nivel 16 y ciclo de 1 comparada con una guía sin poscurar de la formulación 0% de aditivo.



Las guías quirúrgicas correspondientes a la adición de aditivo de no amarillamiento y anti-UV se observan en las figuras 16- 27 siguiendo la nomenclatura:

O: sin poscurar

15: 15 minutos poscurado en cabina LC-3DPrint Box

30: 30 minutos poscurado en cabina LC-3DPrint Box

P10F10: Condición 2 (tabla 6)

P10F4: Condición 3 (tabla 6)

P10F10BL: Condición 4 (tabla 6)

Figura 16

Guías quirúrgicas correspondientes a resina base adicionando X1% Aditivo de no amarillamiento.



Figura 17

Guías quirúrgicas correspondientes a X2% de Aditivo de no amarillamiento



Figura 18

Guías quirúrgicas correspondientes a X3% de Aditivo de no amarillamiento.

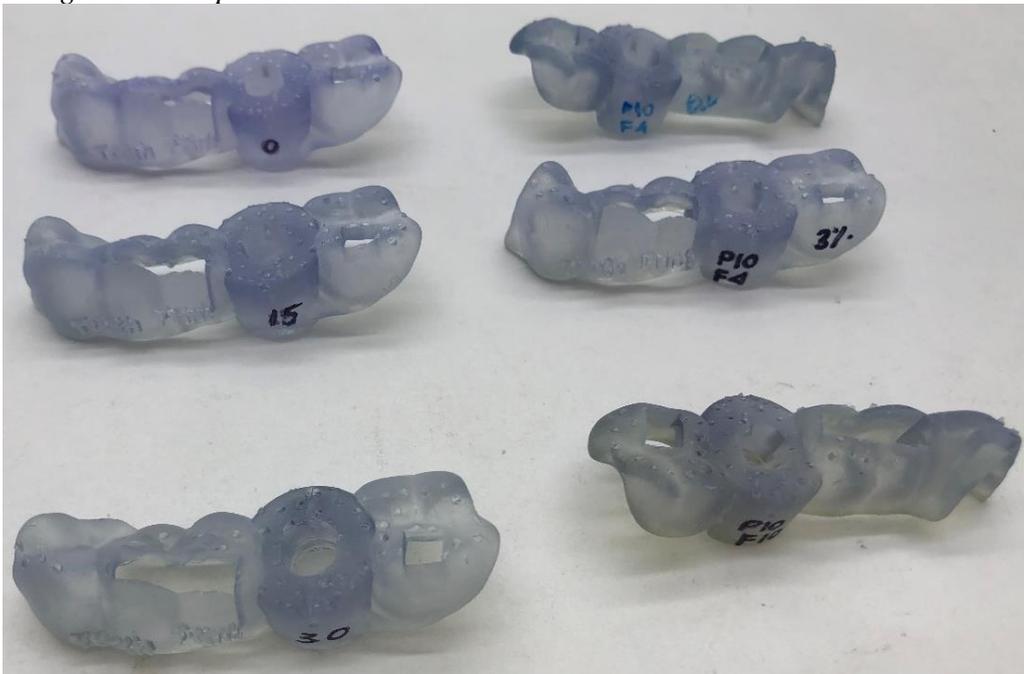


Figura 19

Guías quirúrgicas correspondientes a X4% de Aditivo de no amarillamiento



Figura 20

Guías quirúrgicas correspondientes a X5% de Aditivo de no amarillamiento



Figura 21

Guías quirúrgicas correspondientes a Y1% de aditivo anti-UV.

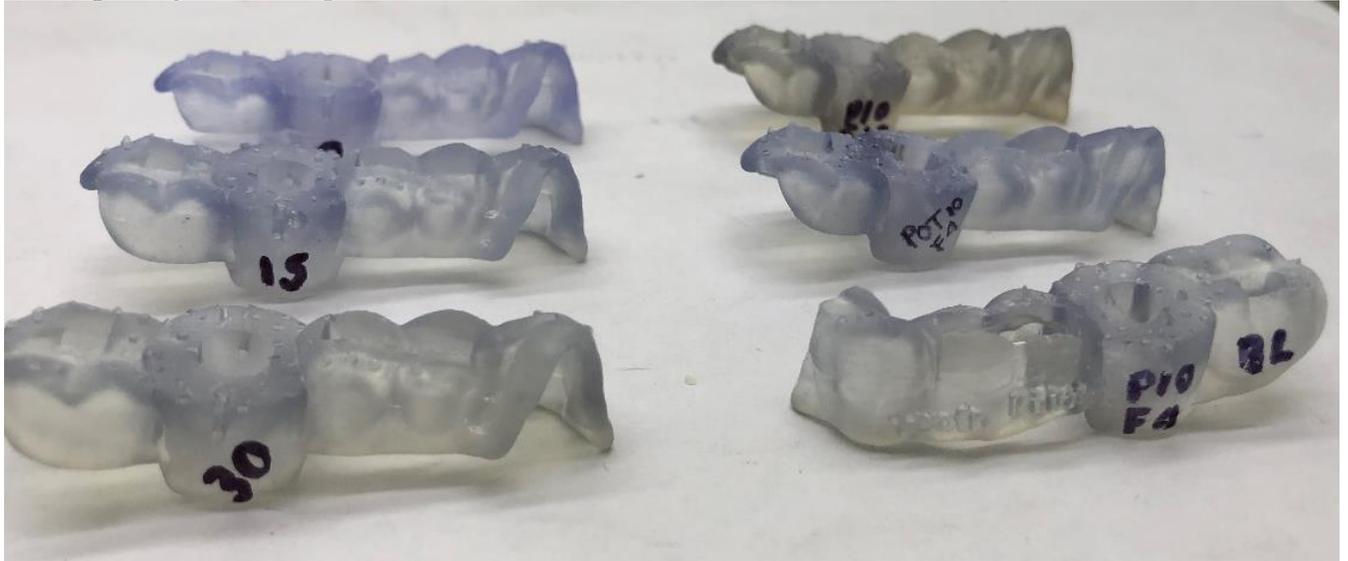


Figura 22

Guías quirúrgicas correspondientes a Y2% de Aditivo anti-UV.



Figura 23

Guías quirúrgicas correspondientes a Y3% de Aditivo anti-UV.

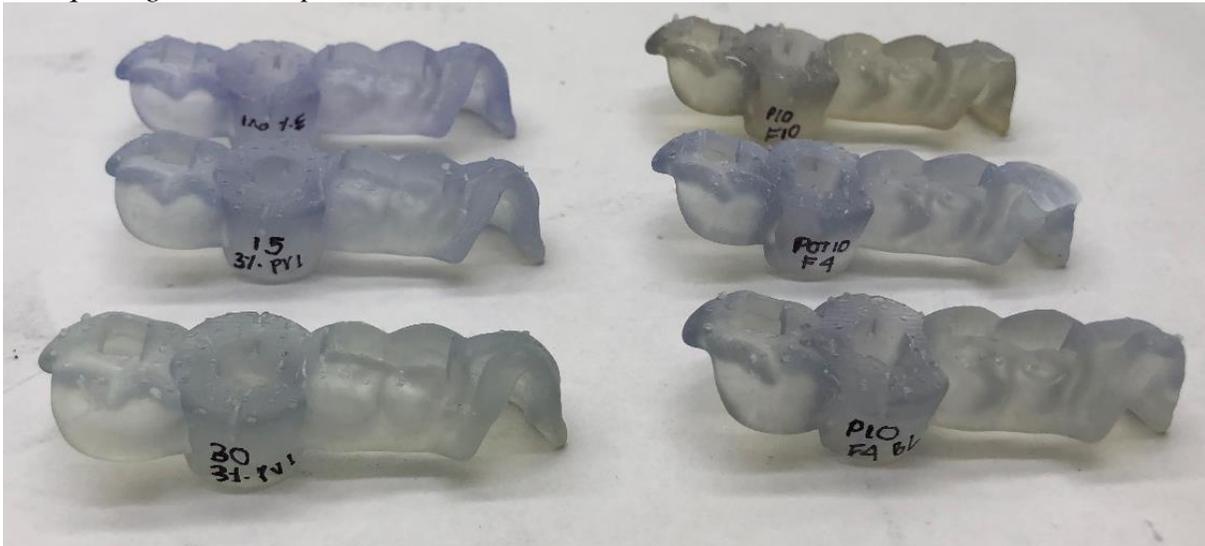


Figura 24

Guías quirúrgicas correspondientes a Y4% de aditivo anti-UV.



Figura 25

Guías quirúrgicas correspondientes a Y5% de aditivo anti-UV



Figura 26

Guías quirúrgicas correspondiente a X2% aditivo de no amarillamiento - Y1% aditivo anti-UV.



Figura 27

Guías quirúrgicas correspondiente a X1% aditivo de no amarillamiento - Y2% aditivo anti-UV.



Figura 28

Guías quirúrgicas correspondientes a la adición en su formulación de Z% de iniciador 1 (derecha) y sin iniciador 1 (izquierda).

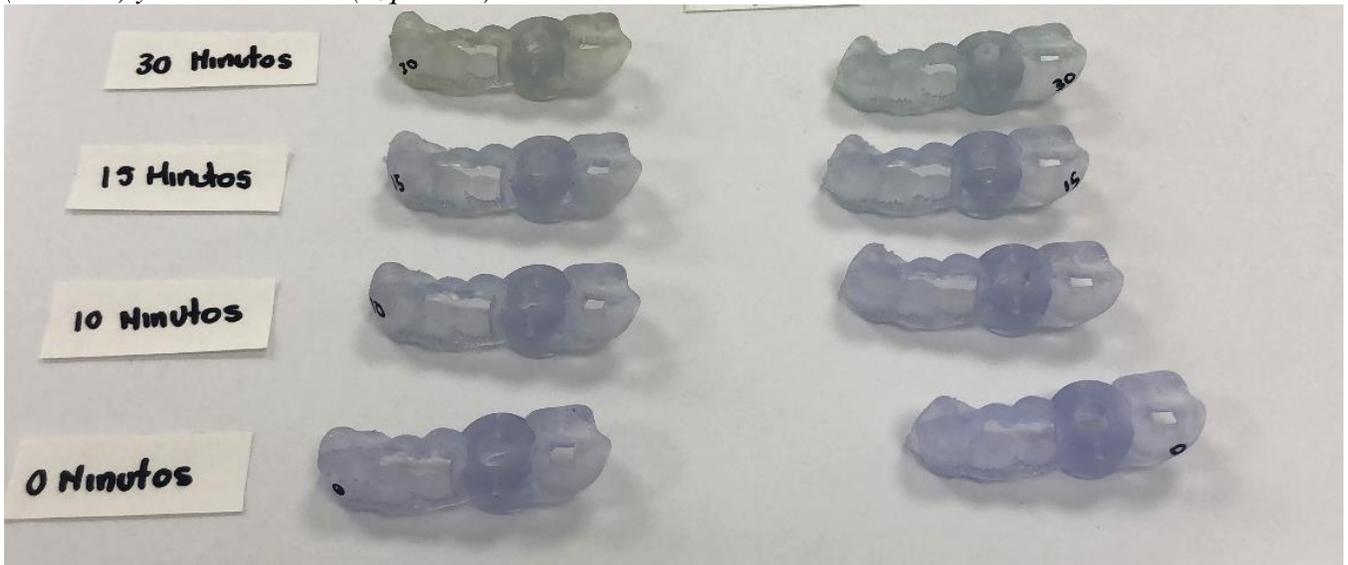


Figura 29

Guías quirúrgicas correspondientes a la adición de iniciador 1 sin aditivo (derecha) y adición de X3% de aditivo de no amarillamiento sin iniciador 1.

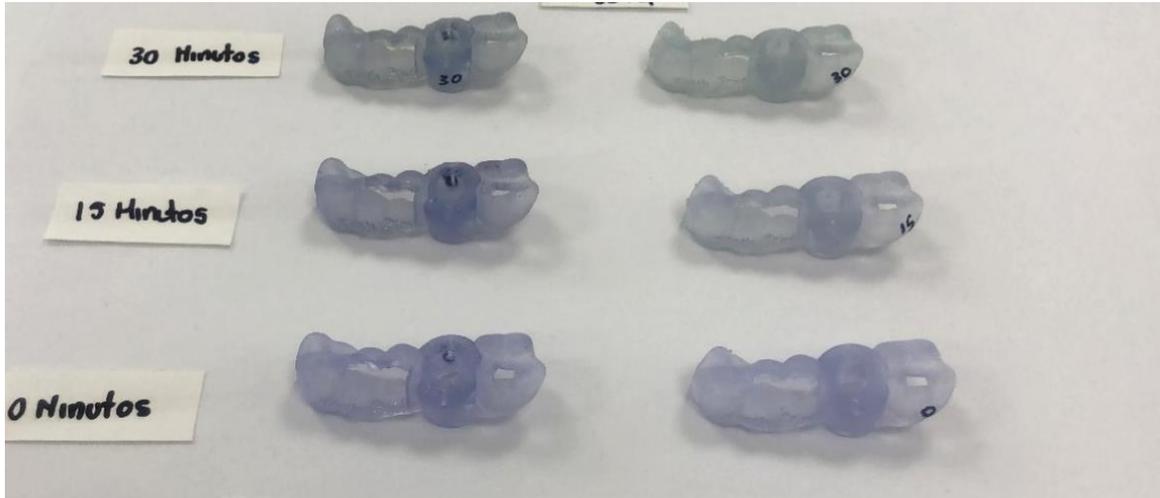


Figura 30

Guías quirúrgicas correspondientes a la adición de la formulación base de Z% iniciador 1 sin esterilizar (izquierda) y esterilizadas (derecha) con una combinación de monómero X de 50% de etoxilacion 4 con 50% de etoxilacion 10.

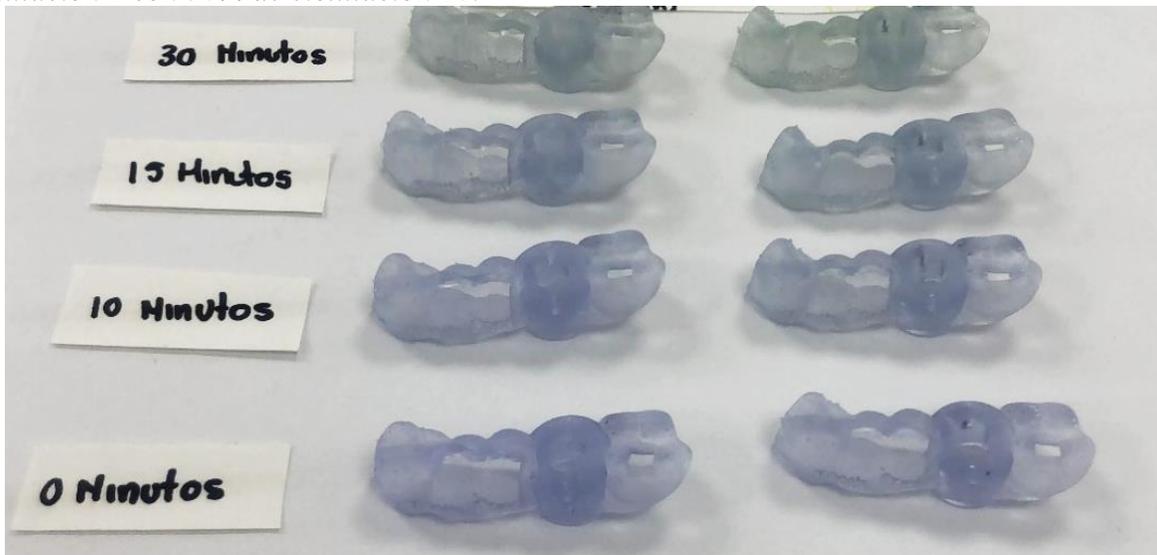


Figura 31

Guías quirúrgicas correspondientes a la adición de la formulación base de Z% iniciador 1 (izquierda) y adición de Y3% de aditivo anti-UV (derecha) utilizando monómero X de etoxilacion 4.

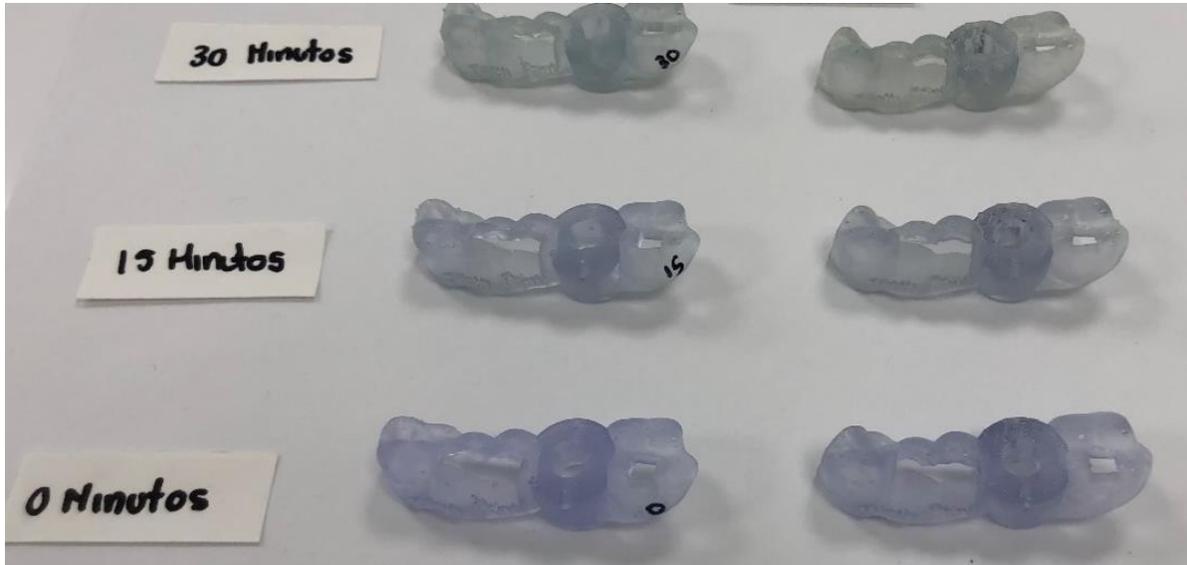


Figura 32

Guías quirúrgicas en la adicción a la formulación base Z% de iniciador 1 - X3% de aditivo de no amarillamiento sin esterilizar (izquierda) y esterilizada (derecha) en ambos casos sin colorear.



El aditivo no amarillamiento causó en las piezas impresas un efecto azulado que incrementa proporcionalmente al aumento en la dosificación, dicho aditivo proporciona un efecto

menor en la degradación causada por el poscurado y la esterilización, como se observa en las figuras 16 a 20, sin embargo el aditivo anti-UV no tiene el efecto azulado pero tiende a degradar el color hasta volver más traslucida la pieza, este aditivo tiene un rango de protección contra exposición prolongada de luz UVA en una longitud de onda de 320 a 400 nm pero las cámaras de poscurado utilizadas exceden este rango llegando a 550 nm, además ralentiza la velocidad de impresión pasado de un tiempo de exposición por cada capa de 2.88 segundos en la resina base a 4 segundos en promedio aumentando mientras más se aumente la dosis.

Adicionalmente se realizó una prueba del efecto de la temperatura de la cabina de poscurado en el resultado final de color, se realizaron pausas de 2 minutos esperando a que la máquina disminuya su temperatura y se enfríe cada 5 minutos hasta completar 15 minutos. Se evidenció que hay un efecto muy significativo en la disminución de la temperatura en comparación con la pieza que estuvo expuesta 15 minutos prolongados sin pausa.

Se realizaron dos experimentos finales, combinando los dos monómeros de diferente etoxilación (4 y 10) en distintas proporciones de la cantidad de monómero X agregado a la formulación, el primero 60% de monómero de etoxilación 4 y 40% etoxilación 10 y el segundo intercambiando los porcentajes, los resultados se muestran en las figuras 33 y 34.

Figura 33

Guías quirúrgicas con 60% de monómero X etoxilacion 4 y 40% de monómero X etoxilacion 10, Z% iniciador 1 y X3% aditivo de no amarillamiento sin esterilizar (izquierda) y esterilizada (derecha).

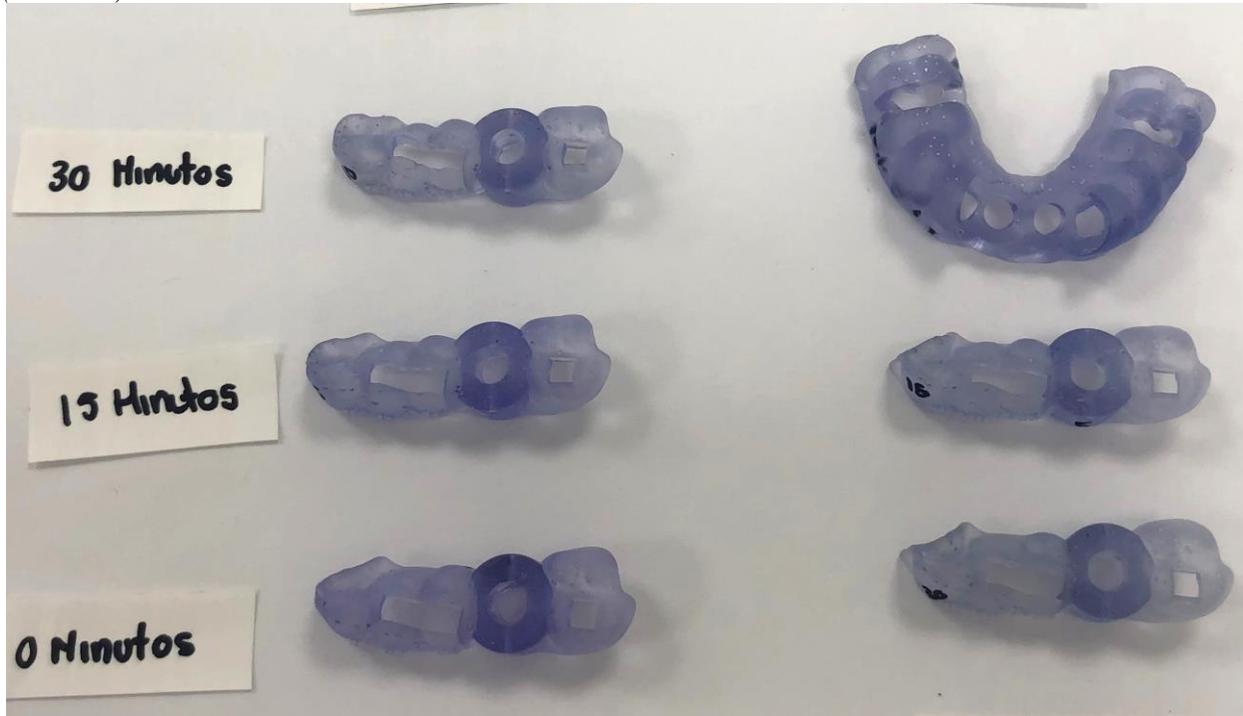


Figura 34

Guías quirúrgicas con diferente proporción de monómero X, 40% etoxilacion 10 - 60% etoxilacion 4 (izquierda), 60% etoxilacion 10 - 40% etoxilacion 4 (centro) y 100% etoxilacion 10 (derecha) todos sin colorear y esterilizados.



La formulación obtenida en la figura 33 arrojó un resultado favorable en cuanto precisión, adaptabilidad y conservación de color, por tanto, la formulación óptima se encuentra en la tabla 8.

Tabla 8.

Formulación óptima para resina de guías quirúrgicas.

Materias Primas
Monómero 1
Monómero X EO 4 60%
Monómero X 10 (H) 40%
Monómero 2
Aditivo de no amarillamiento
Foto iniciador
Iniciador 1

Para tener un comparativo se realizó la caracterización de la resina comercial VeriGuide OS observada en la figura 36, a la cual se expone a las mismas pruebas realizadas en el desarrollo de la resina para guías quirúrgicas con una formulación óptima para New Stetic, en la figura 35 se evidencia una notable degradación de color.

Figura 35

Guías quirúrgicas correspondientes a la resina comercial VeriGuide.



Figura 36

Resina para guías quirúrgicas VeriGuide.



4.4. Pruebas de estabilidad de color

Para cada una de las formulaciones presentadas en la tabla 1 se observó la estabilidad de color mediante la norma ISO 4047 tanto para las formulaciones estudiadas como para la resina comercial, el resultado obtenido se encuentra en las figuras 37-40.

Figura 37

Estabilidad de color para aditivo anti-UV aumentando su dosificación de Y1%-Y5% en orden descendente usando monómero X etoxilacion 4 poscurado durante 30 minutos.



Figura 38

Estabilidad de color para aditivo de no amarillamiento aumentando su dosificación de X1%-X5% en orden descendente usando monómero X etoxilacion 4 poscurado durante 30 minutos.

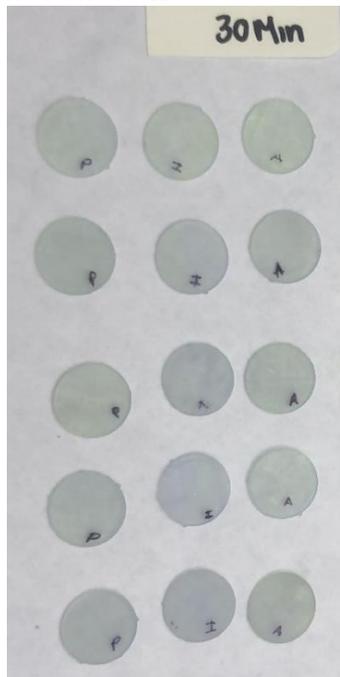
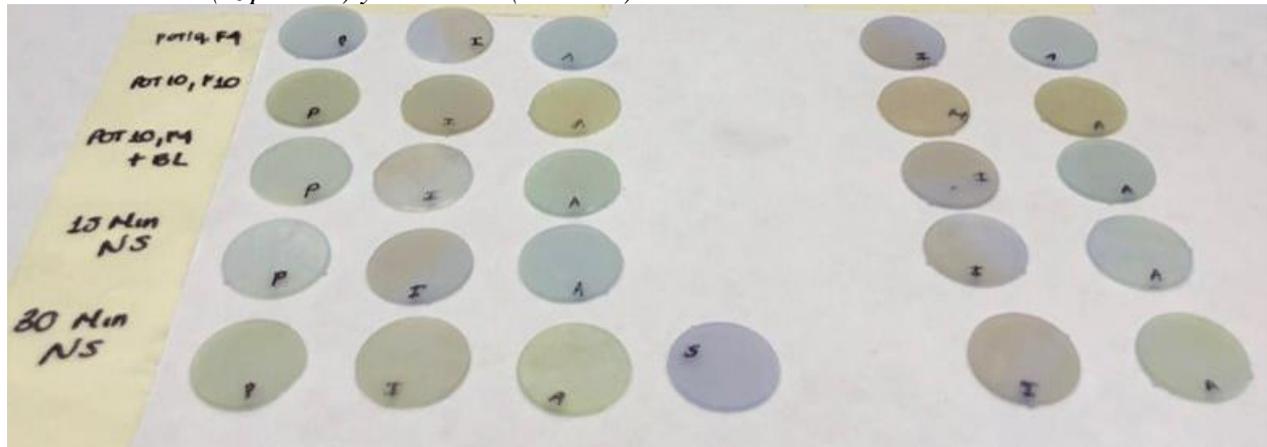


Figura 39

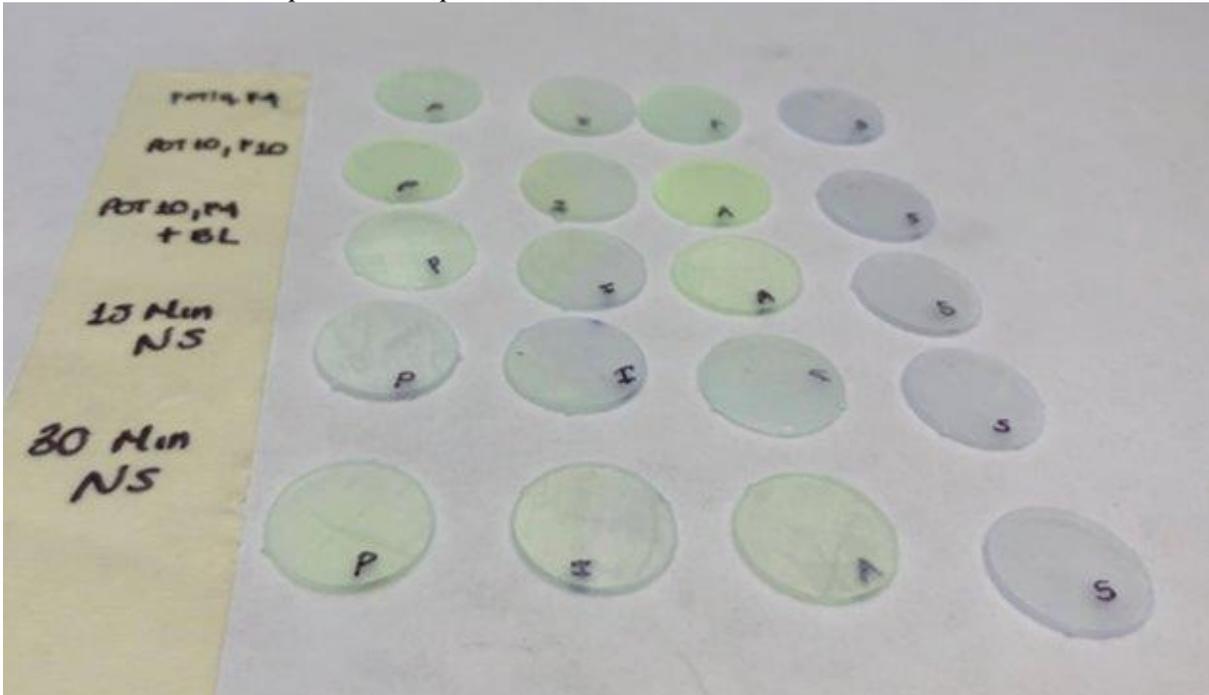
Estabilidad de color para combinación de aditivos, Y2% aditivo anti-UV - X1% aditivo de no amarillamiento (izquierda) y viceversa (derecha).



Al aplicarle irradiación durante 24 horas las probetas con aditivo anti-UV son las que mayormente se ven afectadas, ya que al no tener el efecto azulado tienden a tener una tonalidad más clara en la cual el cambio es más notorio, el aditivo anti-UV retrasa el cambio de color mas no elimina el tono amarillento que adquiere la resina al poscurar, las probetas que son sometidas al agua durante 7 días a 37°C presentan un cambio de color mínimo ya que hay posibilidad de que exista absorción de agua lo que puede cambiar sus propiedades tanto física o químicamente. En la figura 39 se observa que la combinación de aditivos no proporciona una mejoría en la degradación de color.

Figura 40

Estabilidad de color de probetas impresas con resina comercial VeriGuide.



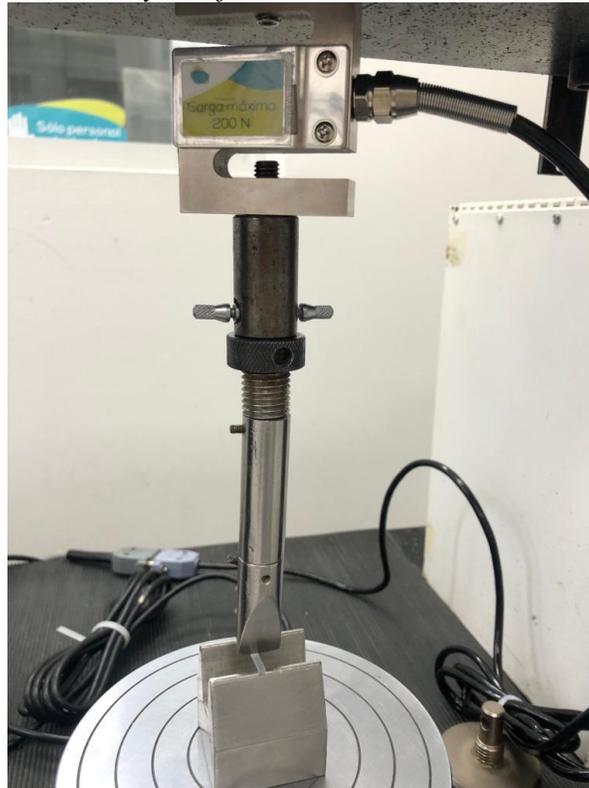
4.5. Prueba de flexión

Las pruebas de flexión se realizaron en la maquina Universal ubicando la probeta a analizar horizontalmente sobre el soporte, se manipula el cabezote movable hasta que el émbolo haga contacto con la probeta.

Luego iniciar la máquina en el ensayo de modulo flexión y resistencia la flexión para así ingresar los datos de ancho y espesor de cada probeta en el módulo de resina fotopolimerizable para que el ensayo comience, como se muestra en la figura 41.

Figura 41

Maquina universal utilizada en ensayo de flexión.



Los resultados obtenidos para el módulo de flexión, resistencia a la flexión con sus respectivas desviaciones se observan en las tablas 9-19.

Tabla 9.

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X1% aditivo de no amarillamiento.

Tiempo de Poscurado (min)	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación n	SECO		AGUA		Módulo de flexión (MPa)	Desviación Módulo
			Módulo de flexión (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación		
15 MIN NS	99,01	5,85	1868,05	229,09	101,147	4,94	1987,70	204,90
30 MIN NS	124,97	8,29	2591,36	524,13	105,987	7,35	1998,05	218,69
P10 F4	95,36	4,94	1693,82	382,29	97,6817	8,13	2119,31	257,21
P10 F4 + BL	93,89	6,00	1926,03	175,67	106,116	6,00	2195,71	161,81
P10F10	101,28	9,00	2089,20	398,73	106,148	10,71	2128,86	361,64

Tabla 10.

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X2% aditivo de no amarillamiento.

Tiempo de Poscurado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación
15 MIN NS	101,69	11,48	2099,61	339,38	81,85	2,72	1573,54	86,70
30 MIN NS	113,07	25,39	2147,40	469,98	98,86	9,83	1917,01	106,71
P10 F4	96,09	4,36	1927,02	111,27	73,19	7,93	1239,14	248,39
P10 F4 + BL	113,86	8,96	2496,74	230,77	87,01	7,46	1855,59	144,15
P10F10	96,99	9,82	1986,71	167,34	86,86	2,41	1967,88	167,42

Tabla 11.

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X3% aditivo de no amarillamiento.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación
15 MIN NS	96,31	2,66	1804,29	57,66	85,05	6,66	1845,22	235,63
30 MIN NS	118,43	9,72	2749,76	427,71	111,57	12,55	1995,19	206,37
P10 F4	87,02	9,44	1739,22	67,05	78,59	4,04	1905,94	225,28
P10 F 4 + BL	95,96	3,08	2038,81	66,94	96,08	6,08	1907,41	149,19
P10F10	104,27	12,15	2835,19	576,10	95,96	3,08	2038,81	66,94

Tabla 12.

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X4% aditivo de no amarillamiento.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación
15 MIN NS	98,05	6,58	2104,04	203,88	81,67	7,76	1523,62	368,11
30 MIN NS	126,55	9,05	2739,85	125,76	92,29	9,21	2020,34	243,19
P10 F4	100,61	3,06	2231,67	238,84	80,88	5,13	1709,32	175,01
P10 F4 + BL	95,62	11,14	2278,57	246,19	93,08	10,11	2079,15	247,16
P10F10	97,23	4,51	2001,49	118,88	100,96	6,74	2199,07	214,08

Tabla 13

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando X5% aditivo de no amarillamiento.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (0 a 15 N) (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación
15 MIN NS	89,81	8,01	2050,66	148,65	91,36	10,40	2123,54	480,04
30 MIN NS	107,69	8,54	2314,74	114,09	89,04	8,05	1924,36	106,70
P10 F4	85,07	11,18	1832,28	204,89	79,60	6,86	1758,40	192,09
P10 F4 + BL	98,56	11,18	2145,81	215,64	94,61	4,88	1873,65	112,73
P10F10	100,51	13,99	2268,73	79,02	98,40	11,03	2195,04	407,14

Tabla 14

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y1% aditivo anti-UV.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (0 a 15 N) (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (0 a 15 N) (MPa)	Desviación
15 MIN NS	102,02	7,44	2078,21	164,89	97,57	5,07	1746,74	155,21
30 MIN NS	112,57	8,44	2260,29	152,68	113,42	13,60	2138,99	414,24
P10 F4	89,75	5,81	2001,21	170,74	102,43	3,66	2175,19	214,97
P10 F4 + BL	101,32	2,60	2050,87	202,19	94,70	12,72	2011,97	123,41
P10F10	111,66	5,84	2297,15	170,57	108,54	11,05	2103,03	314,02

Tabla 15.

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y2% aditivo anti-UV.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (0 a 15 N) (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (0 a 15 N) (MPa)	Desviación
15 MIN NS	-	-	-	-	95,75	10,05	2171,99	481,45
30 MIN NS	118,79	4,91	2489,12	168,01	113,39	8,83	2291,73	143,75
P10 FLASH4	82,42	4,95	1682,12	166,15	82,70	21,48	1579,29	1058,67
P10 F4 + BL	91,70	2,86	1957,36	164,50	90,15	7,48	1924,36	259,20
P10F10	103,51	3,69	2295,30	146,23	103,47	7,03	2252,09	136,80

Tabla 16

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y3% aditivo anti-UV.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (Mpa)	Desviación Resistencia	Módulo de flexión (Mpa)	Desviación Módulo	Resistencia a la flexión (Mpa)	Desviación Resistencia	Módulo de flexión (Mpa)	Desviación Módulo
15 MIN NS	105,88	6,89	2422,50	215,76	94,52	11,33	2087,99	189,77
30 MIN NS	128,82	2,88	2745,72	255,24	114,34	13,83	2215,32	241,75
P10 F4	90,93	3,38	2015,53	226,64	82,95	8,86	1804,45	242,65
P10 F4 + BL	104,48	9,20	2410,22	339,15	96,08	4,57	1982,42	109,15
P10P10	97,66	5,83	2145,60	254,62	104,48	9,20	2410,22	339,15

Tabla 17

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y4% aditivo anti-UV.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	Módulo de flexión (MPa)	Desviación
15 MIN NS	92,22	17,97	2276,21	442,40	86,76	15,85	1949,37	374,41
30 MIN NS	95,91	8,50	2030,06	181,12	97,10	10,34	1913,83	265,34
P10 FLASH4	84,33	5,20	2011,39	235,82	72,55	3,44	1243,66	211,87
P10 F4 + BL	85,64	5,66	1930,73	134,90	80,71	0,93	1688,93	195,68
P10F10	98,17	8,37	2149,14	188,56	94,70	5,41	1826,03	189,98

Tabla 18

Propiedades de flexión para la formulación base adicionando Y5% aditivo anti-UV.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación Resistencia	Módulo de flexión (MPa)	Desviación Módulo	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación Resistencia	Módulo de flexión (MPa)	Desviación Módulo
15 MIN NS	95,55	5,66	1758,93	144,38	86,76	15,85	1949,37	374,41
30 MIN NS	-	-	-	-	97,10	10,34	1913,83	265,34
P10 F4	75,09	10,23	1650,47	297,90	72,55	3,44	1243,66	211,87
P10 F4 + BL	86,41	2,53	1791,92	187,27	80,71	0,93	1688,93	195,68
P10F10	99,81	49,10	3862,52	5377,53	94,70	5,41	1826,03	189,98

Tabla 19.
Propiedades de flexión para resina comercial VeriGuide.

Tiempo de Pos Curado (min)	SECO				AGUA			
	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación Resistencia	Módulo de flexión (0 a 15 N) (MPa)	Desviación Módulo	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación Resistencia	Módulo de flexión (0 a 15 N) (MPa)	Desviación Módulo
15 MIN NS	90,81	24,45	1599,44	1220,83	79,19	3,89	1687,06	211,97
30 MIN NS	104,54	5,50	2291,36	270,95	84,67	4,01	1718,36	129,51
P10 F4	76,40	3,80	1545,99	180,04	66,67	4,95	1125,80	279,31
P10 F4 + BL	68,02	3,56	1084,61	281,44	58,57	1,19	511,14	165,27
P10F10	90,61	7,66	1964,62	533,45	68,55	3,77	1150,87	160,40

La aplicación de los aditivos en las formulaciones realizadas evidencia que el módulo de flexión al aumentar la dosis de aditivo agregado tiene una disminución que no es significativa, los valores correspondientes a cada ciclo de poscurado están dentro del mismo intervalo, al exponerse en agua por 24 horas a 37 °C afecta en mayor medida tanto al módulo de flexión como a la resistencia a la flexión, dichos parámetros disminuyen su valor, un menor módulo de flexión lo que indica una menor rigidez, permite una mayor deformación del material antes de una falla o fractura, lo que se evidenció el tiempo en el que cada probeta tardo en fracturarse.

Al aumentar la dosis de aditivo anti-UV la resistencia a la flexión disminuye, lo que hace más frágil a la pieza impresa.

Para la resina comercial, en sus especificaciones, el módulo de flexión debe ser mayor a 2000 MPa (Whip Mix Corporation, n.d.), lo cual no se cumple según la tabla 19, lo cual puede deberse a ser expuestas a una mayor potencia entregada por la cabina de poscurado ArmaResin.

4.6. Caso clínico

Se realiza un procedimiento clínico el cual consiste en la imposición de 5 implantes dentales, dos en maxilar superior y 3 en inferior, se inicia con el escaneo intraoral de la zona afectada para poder realizar el diseño de las guías quirúrgicas necesarias, el proceso para su obtención se observa en las figuras 42-45.

Figura 42

Archivo digital guías quirúrgicas superior (izquierda) e inferior (derecha)

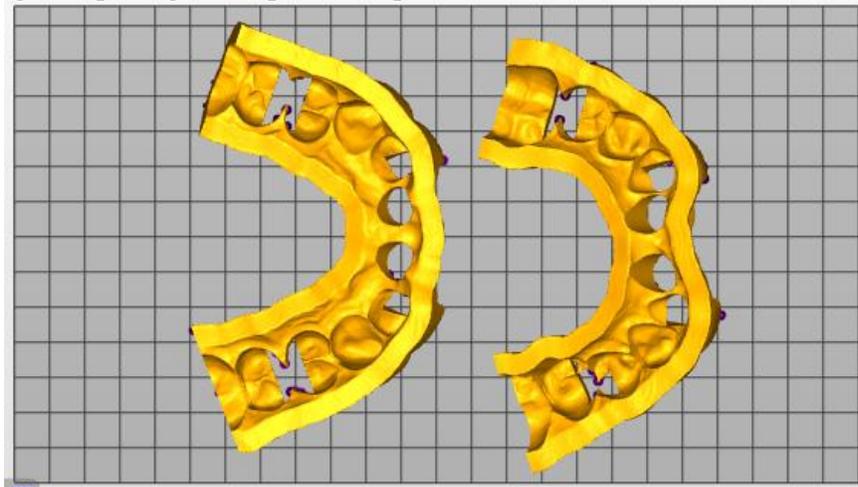


Figura 43

Impresión guías quirúrgicas en impresora 385 nm ASIGA.



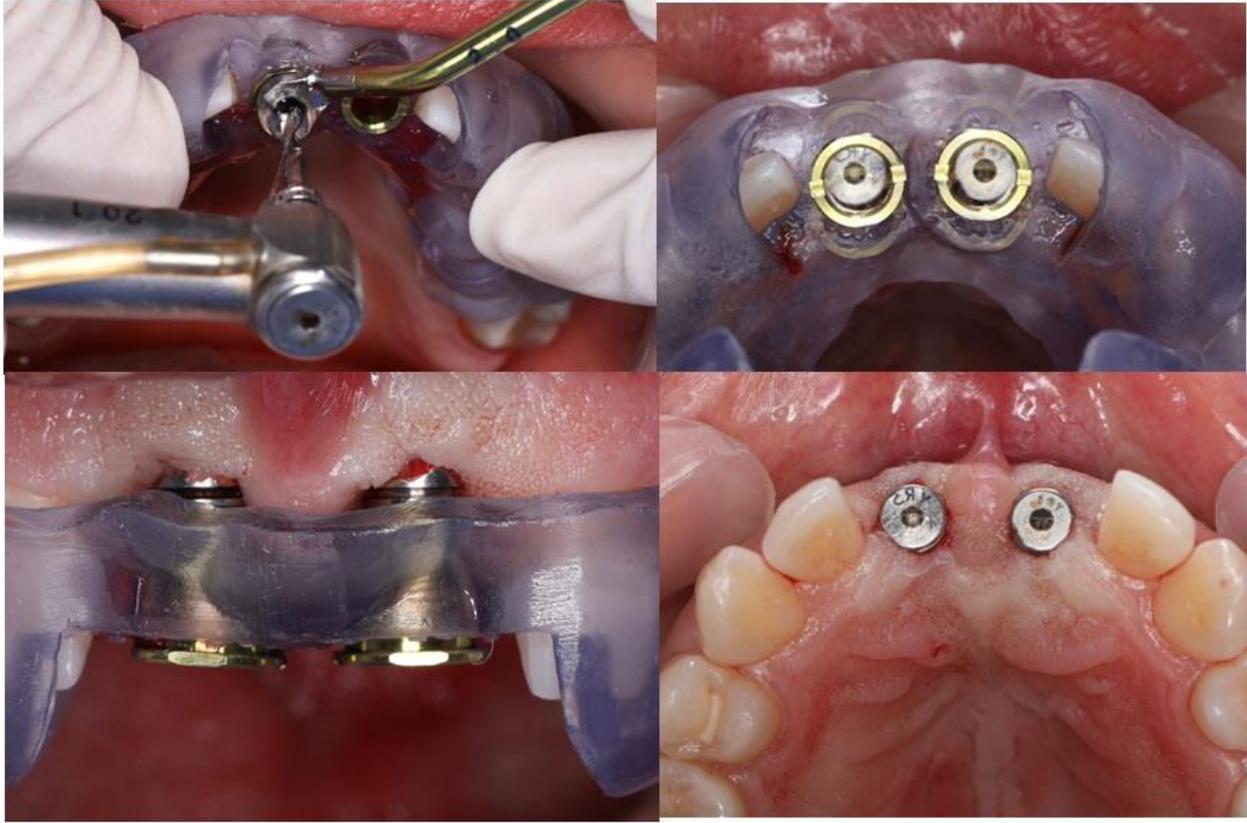
Figura 44

Guías quirúrgicas poscurado, superior e inferior adaptadas con anillos específicos en el modelo dental.



Figura 45

Inserción de implante dental haciendo uso de guía quirúrgica.



El proceso clínico fue satisfactorio, el laboratorista dental encargado del proceso de adecuación de las piezas, de terminado de proceso, verificación del ajuste adecuado de la pieza en el modelo dental y colocación de los anillos en las guías quirúrgicas previo a la cirugía arrojó una evaluación positiva acerca de la resina suministrada. Las piezas se adaptaron perfectamente en el modelo dental, su color violeta dio buenos resultados por el contraste que presenta con la gingiva (tejido conectivo fibroso que está alrededor del cuello de los dientes y cubre el hueso alveolar), no presentaron fracturas a la hora de colocar los anillos y en general presentaron buenas características.

5. CONCLUSIONES

La utilización de una guía quirúrgica para realizar un procedimiento dental como un implante ha adquirido muchos beneficios tanto para el paciente como para el personal médico, con su uso, los cirujanos pueden planificar con mayor precisión la posición, el tamaño, la profundidad y la dirección de la colocación del implante para que se adapte a sus características individuales.

La impresión 3D ha sido de gran ayuda para el avance y evolución del mundo de la tecnología, mediante esta técnica gracias a su precisión y calidad se logra imprimir guías quirúrgicas para generar elementos que ayuden durante una cirugía dental.

El aditivo con mayor eficacia en cuanto a la degradación de color fue el aditivo de no amarillamiento, además de no aumentar significativamente los tiempos de impresión por capa.

La temperatura es uno de los factores que mayormente afectan a la estabilidad de color, al aumentar la temperatura aumenta la degradación de la pieza impresa y de igual forma al aumentar el tiempo de exposición a determinadas longitudes de onda.

La cabina en la cual se poscure las piezas impresas es de vital importancia ya que potencias elevadas de intensidad de luz pueden afectar en gran medida al color final de la pieza.

La marca utilizada de monómeros es de gran importancia, ya que el cambio realizado de grado de etoxilacion no fue suficiente para mejorar la formulación, la marca Healthcare

proporcione un monómero incoloro diferente al monómero obtenido mediante la marca comercial habitual, el comportamiento en cuanto a degradación de color del proveedor habitual arroja resultados similares a los obtenidos con monómero de menor grado de etoxilación, al final del proceso luego de esterilizar la pieza se obtuvo un color verdoso.

Se logró obtener una formulación aceptable y viable para la elaboración y producción de guías quirúrgicas, la cual arroja resultados positivos en cuanto a degradación de color, adaptación, durabilidad y propiedades mecánicas.

6. REFERENCIAS

ArmaResin. (2020). *POWER CURE*. ARMA DENTAL. <https://armaresin.com/power-cure.php>

Impresoras3D.com. (2021, April 30). *Guía rápida de Cómo Imprimir con Resina.*

<https://www.impresoras3d.com/guia-rapida-de-como-imprimir-con-resina/>

L'Oréal GROUPE. (2021). *BHT - Ingrédient | Au coeur de nos produits.* <https://interior-productos.loreal.es/ingredients/bht>

U.S. FOOD & DRUG. (2021, October 29). *Dental Implants: What You Should Know.* FDA.

<https://www.fda.gov/medical-devices/dental-devices/dental-implants-what-you-should-know>

Whip Mix Corporation. (n.d.). *RESINA DE IMPRESIÓN 3D INSTRUCCIONES.*

www.whipmix.com

Formalabs. (2022). *Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA) de 2020.*

<https://formlabs.com/latam/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>

Hapco. Inc. (n.d.). *Resinas termoestables de poscurado | hapco, inc.* Retrieved November 2, 2022,

from <https://hapcoincorporated.com/blog/post-curing-thermoset-resins/>

Henao, J., Ramos, J. S., Valencia, C. H., Adams, I., Rico, C. A., Escandón, J. M., &

Echeverri-Cedeñas, D. (2018). *Elaboracion de un nuevo tipo de guías quirúrgicas para implantes dentales mediante impresión 3D.* *Informador Técnico*, 82(1), 78–90.

<https://go.gale.com/ps/i.do?p=IFME&sw=w&issn=0122056X&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA591225602&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>

Juan Carlos Briones Yupanqui. (2017). *Resistencia al desgaste de resinas compuestas en piezas posteriores después del cepillado dental simulado - in vitro [Universidad Privada Antenor*

Orrego]. <https://1library.co/document/y498n40z-resistencia-desgaste-resinas-compuestas-posteriores-despues-cepillado-simulado.html>

LIQCREATE. (2022). Explicado y probado: poscurado de piezas impresas en 3D | liqcreate.
<https://www.liqcreate.com/supportarticles/post-curing-3d-print-liqcreate-resin/>

Melchels, F. P. W., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. In *Biomaterials* (Vol. 31, Issue 24, pp. 6121–6130).
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>

Rouzé l'Alzit, F., Cade, R., Naveau, A., Babilotte, J., Meglioli, M., & Catros, S. (2022). Accuracy of commercial 3D printers for the fabrication of surgical guides in dental implantology. *Journal of Dentistry*, 117, 103909. <https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2021.103909>