



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

JULIO 2016



COMPARACIONES GEOMÉTRICAS DE PUENTES DE CR-CO Y GUIADO EN EL ENSAMBLAJE IN-VIVO

Autor: Javier González Simón

Director: Santiago Carlos Gutiérrez Rubert

MÁSTER UNIVERSITARIO EN DISEÑO Y FABRICACIÓN INTEGRADA ASISTIDOS POR COMPUTADOR

TRABAJO FIN DE MASTER

ÍNDICE

1. OBJETIVO	2
2. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL	2
3. PREPARACIÓN DEL PROCESO DE COMPARACIÓN	3
3.1. INTRODUCCIÓN	3
3.2. MODELO DIGITAL ORIGINAL	4
3.3. FABRICACIÓN DE MODELOS REALES	6
3.4. ESCANEADO DE MODELOS REALES	7
4. ENSAMBLE DE LOS MODELOS DE LOS PUENTES	7
5. PROCESO DE COMPARACIÓN DIGITAL DE LOS MODELOS DE LOS PUENTES	10
5.1. INTRODUCCIÓN Y PLANOS DE REFERENCIA	10
5.2. DEFINICIÓN DE ÁREAS	12
5.3. DEFINICIÓN DE MÁXIMOS Y MÍNIMOS	13
5.4. RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DIGITAL	13
5.4.1. <i>Comparación por áreas</i>	14
5.4.1.1. Análisis de resultados de la comparación por área	15
5.4.2. <i>Desviaciones máximas y mínimas</i>	16
5.4.2.1. Análisis de resultados de las desviaciones máximas y mínimas	18
5.4.3. <i>Comparaciones in-vitro</i>	26
5.4.3.1. Análisis de resultados de las comparaciones in-vitro.....	32
5.5. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS A TRAVÉS DE UN SOFTWARE DE INSPECCIÓN ...	33
5.5.1. <i>Análisis de resultados y comparación entre procesos comparativos</i>	36
6. PROCESO DE AJUSTE PARA PUENTES DE TRES O MÁS APOYOS	37
6.1. AJUSTE PARA PUENTES DE TRES APOYOS	38
6.2. AJUSTE PARA PUENTES CON MÁS DE TRES APOYOS.....	39
6.3. COMPROBACIÓN DEL PROCESO DE AJUSTE	41
6.4. <i>Ejemplos de ajustes</i>	43
6.4.1. <i>Ajuste de un arco completo con cuatro apoyos</i>	43
6.4.1.1. Análisis de resultados	47
6.4.2. <i>Ajuste de un arco completo con seis apoyos</i>	48
6.4.2.1. Análisis de resultados	51
7. BIBLIOGRAFÍA	54
8. ANEXOS	55
9. DOCUMENTOS DE SÍNTESIS	55
9.1. FIGURAS.....	55
9.2. TABLAS	57

1. Objetivo

Se va a realizar una comparación entre tres modelos digitales de prótesis dentales, realizados mediante los tres procesos de fabricación más utilizados en el sector protésico, es decir, mecanizado, sinterizado y colado. Obteniendo parámetros que permitan realimentar al proceso de diseño/fabricación para un mejor ajuste de las prótesis obtenidas.

Además se establecerá y justificará un protocolo de fácil aplicación por parte de los protésicos, para conseguir el mejor ajuste posible de la prótesis dental en boca del paciente.

2. Antecedentes y situación actual

La primera parte de este trabajo está basada en un proyecto realizado con anterioridad, por lo tanto no se parte de cero en el proceso de comparación, es una ampliación y mejora de un método ya utilizado para la comparación de prótesis dentales.

Para la segunda parte, el ajuste "in vivo", se ha desarrollado íntegramente el procedimiento, pues no se cuenta con experiencias previas.

En la actualidad, para la realización de prótesis dentales se utilizan numerosos y distintos procesos de fabricación. Cuando seleccionamos un proceso, este nos va a limitar tanto las características de la prótesis como sus costes, pero sobretodo, hay que tener en cuenta el problema de durabilidad de las prótesis, para ello tenemos que conocer el ajuste marginal, "marginal fit", en cada una de ellas, que es la precisión geométrica que logra cada proceso en la zona del ajuste con los soportes y/o muñones naturales. Esta característica se puede observar en la siguiente figura (Figura 1).



Figura 1. Vista frontal del "marginal fit" de un puente dental.

3. Preparación del proceso de comparación

3.1. Introducción

Se definieron como base, los tres procesos de fabricación que mejores prestaciones y resultados dan en las prótesis, quedando así los siguientes:

- Colada a la cera perdida.
- Fresado mediante control numérico. (Mecanizado 5/6 ejes),
- Sinterizado selectivo por láser de partículas metálicas (SDML, Sinterizado Directo de Metal mediante Láser o Laser Cusing).

A continuación se va a explicar y caracterizar los procesos de fabricación sobre los que se trabaja, para un mejor conocimiento de los mismos.

La **colada** es el proceso que proporciona forma a un objeto al penetrar material líquido en un agujero o cavidad denominado molde (en el caso de la cera perdida, el modelo para obtener el molde suele ser de cera) y dejar que se solidifique el líquido en dicho molde.

Y una vez que se solidifica el material obteniéndose la forma deseada, se retira este del molde, quedándonos así el objeto sólido conformado.

Los objetos producidos con este tipo de fabricación suelen ser de textura áspera, porosa y con bastantes imperfecciones, además de quedar resto de los bebederos (pequeños orificios por donde se introduce el líquido al molde). En este tipo de proceso es necesario realizar un trabajo para eliminar los restos de los bebederos, limar, pulir y abrillantar la superficie del metal, usando generalmente arena muy fina proyectada a una gran velocidad sobre la superficie del objeto.

El **mecanizado multieje** es un proceso de mecanizado donde herramientas controladas por un ordenador de control numérico se mueven con 4 o más grados de libertad para producir piezas de metal u otros materiales por medio de fresado, corte con chorro de agua o corte con láser.

En este tipo de mecanizado se pueden utilizar herramientas más cortas, puesto que se pueden inclinar más para ajustar mejor el ángulo herramienta-pieza, esto permite que las herramientas tengan una mayor rigidez y se pueda mecanizar a una mayor velocidad y precisión, por lo que el resultado obtenido es de una mayor calidad superficial y por consiguiente permite una reducción del tiempo de acabado.

También permiten menos profundidades de pasada durante el mecanizado que el mecanizado convencional, si a esto le unimos una óptima regulación del ángulo entre la herramienta y la pieza, conseguiremos una carga de viruta constante y un avance alto en el punto de contacto, consiguiendo una mejora en el acabado y aumentando la vida de la herramienta.

El **sinterizado selectivo por láser** es una técnica de prototipado rápido basada en la adición de una capa de polvo de unas décimas de milímetro en una cuba calentada previamente a una temperatura un poco inferior al punto de fusión del polvo utilizado,

posteriormente un láser sinteriza el polvo en los puntos seleccionados provocando que las partículas de polvo se fusionen y solidifiquen posteriormente.

Generalmente se utiliza para volúmenes pequeños de piezas, debido a su elevado tiempo de fabricación. Como la materia prima de origen está en estado sólido (microesferas), no es necesario crear soportes mientras que el objeto se va fabricando, la propia materia prima sustenta al objeto, por lo que no presenta limitaciones de rotación de pieza ni la necesidad de eliminación de los soportes posteriormente.

El proceso térmico al que está sometido hace que los cambios, la posición de las piezas y cualquier variación mínima durante el mismo sean muy críticas. El acabado de las piezas producidas con este proceso de fabricación suele ser superficialmente poroso y con necesidad de eliminar los polvos sobrantes.

En cuanto a las tolerancias dimensionales, suelen ser difícil de controlar y dependen mucho de los espesores de las piezas a fabricar.

Una vez definidos brevemente los procesos de fabricación, se procede a realizar el proceso de comparación:

La cantidad de modelos fabricados son 18, es decir, 6 modelos de cada proceso de fabricación, para tener un número significativo de modelos durante el proceso de comparación.

Para la comparación se utilizarán modelos digitales escaneados a partir de los modelos reales fabricados con cada uno de los procesos seleccionados.

La secuencia seguida es:

- a) Creación del modelo digital original.
- b) Fabricación de modelos reales.
- c) Escaneo de modelos reales.
- d) Comparación entre modelos.

3.2. Modelo digital original

El modelo digital es aquel que el protésico diseña especialmente a medida para un paciente por medio del uso de programas CAD. Para conseguir este modelo se desarrollan una serie de pasos manuales realizados por el especialista sobre la boca del paciente, para luego trabajar con tecnologías de ingeniería inversa y finalmente diseñar el modelo digital personalizado.

La toma de impresiones realizada por el especialista se hace para obtener una réplica negativa precisa de cada diente preparado, a partir de las cuales y mediante un proceso de vaciado obtenemos los modelos de escayola (Ver figura 2)



Figura 2. Modelo de escayola fabricado a partir de la impresión dental.

Cuando ya tengamos el modelo físico, se utiliza un escáner 3D para obtenerlo en formato digital. Durante este proceso de ingeniería inversa se ha utilizado un escáner “Ceratomic DS-900” mostrado en la Figura 3.



Figura 3. Escáner Ceratomic DS-900, especializado en digitalización dental.

Para realizar el escaneado, se fija el modelo de escayola en la base interior del escáner, utilizando algún elemento fijador para que no existan movimientos en la pieza y de esta manera nos permita obtener un resultado más cercano a la realidad.

Este escáner genera una nube de puntos que define la superficie exterior del modelo de escayola. La nube de puntos obtenidos se trabaja con un programa de CAD para obtener el siguiente resultado. (Ver Figura 4).



Figura 4. Modelo digital de la base, donde se aprecian los dos muñones naturales ya preparados por el especialista.

A partir del modelo digital de la base y usando de nuevo un programa de CAD, se diseña la prótesis dental. El proceso consiste en ir creando una geometría que se vaya ajustando al modelo digital de la base, dándole las formas y las medidas adecuadas, al acabar obtendremos un modelo 3D que se adapta a la forma interna del muñón como se puede apreciar en la Figura 5 a continuación:

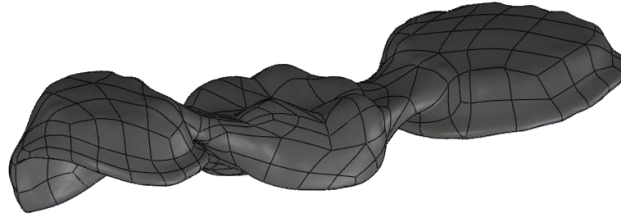


Figura 5. Modelo digital original, utilizado para fabricar los puentes.

Este modelo digital obtenido es la base para realizar las comparaciones del estudio en cuestión, además de representar la geometría óptima acoplable a la dentadura del paciente y se utilizará para fabricar los subsiguientes modelos.

3.3. Fabricación de modelos reales

Cuando tenemos el modelo digital diseñado, a través del mismo programa de CAD se exporta en formato ".stl" que servirá para generar el código G por medio de herramientas CAM.

Posteriormente se fabrican los modelos por fresado, mediante control numérico, y por sinterizado directo de metal utilizando un láser. Para el caso del modelo fabricado por colada, se utiliza directamente el modelo en escayola para la fabricación del puente dental.

La Figura 6 muestra un puente ejemplo fabricado con cada proceso. En el que se pueden observar las diferencias superficiales entre los distintos procesos, acabado pulido y liso en el caso de la colada, brillante y con las marcas dejadas por la herramienta en el fresado y basto y rugoso en el caso del sinterizado.



Figura 6. (a) Puente de Cr-Co obtenido por colada, (b) por fresado y (c) por sinterizado selectivo por láser.

3.4. Escaneo de modelos reales

Antes de escanear los modelos se les tienen que aplicar una capa de spray en polvo para evitar el reflejo de los rayos de luz que emite el escáner, consiguiendo que la nube de puntos no tenga huecos y sea lo más parecida a la realidad.

Una vez se tengan los modelos preparados se procede a escanearlos haciendo uso de nuevo del escáner “Ceratomic DS-900” y utilizando el programa “Magic Scan” para realizar dicha tarea (ver Figura 7).



Figura 7. Luz blanca estructurada utilizada por el escáner para hacer la recolección de datos.

La nube de puntos que se genera es exportada en formato “.asc”, de este formato se obtienen unos datos que una vez sean tratados por un programa de CAD podemos regenerar la geometría del puente deseado a través del empleo de los módulos de ingeniería inversa de dicho programa de CAD.

En este caso el programa regenerador ha sido Solidworks, generando así las superficies y geometrías completas de los modelos de los puentes para su comparación digital posterior realizada con el mismo programa.

Se selecciona Solidworks, por tener éste diferentes herramientas que permiten realizar comparaciones complejas entre sólidos y superficies. Es un software CAD/CAM genérico, lo cual abarata costes al no tratarse de un software cerrado y exclusivo para el sector odontológico.

4. Ensamble de los modelos de los puentes

Una vez importados y comprobada la geometría de todos los modelos, ya se pueden realizar las comparaciones entre el modelo digital original y cada uno de los 18 modelos fabricados, por lo que en total se realizan 18 comparaciones.

Para realizar esta operación, se ensamblan tres elementos, dos de ellos que siempre van a ser comunes en todos los ensayos y un elemento variable.

Los elementos comunes son el modelo digital de la base de escayola y el modelo digital original del puente y el tercer elemento se corresponde con cada uno de los modelos fabricados.

El primer elemento que hay que añadir al ensamblaje es la base (ver Figura 4), teniendo especial cuidado para posicionarlo lo más próximo posible al sistema de coordenadas y

fijándolo posteriormente para evitar que se desplace en el proceso de posicionamiento del resto de elementos.

El segundo elemento que se introduce es el modelo digital original del puente (Figura 8), el cual se diseñó directamente sobre la base, por lo que el acople con la base es el más favorable posible.

Para realizar el acoplamiento entre el modelo digital original y la base se utiliza la herramienta “mover componente” de Solidworks, que permite realizar movimientos de traslación y rotación sobre la pieza. Activando la opción “detección de colisiones” de Solidworks al realizar los movimientos conseguimos que el espacio base/modelo digital sea el menor posible, ya que ésta avisa cuando existe interferencia y posibilidad de acople entre los puntos de las superficies de los distintos cuerpos.

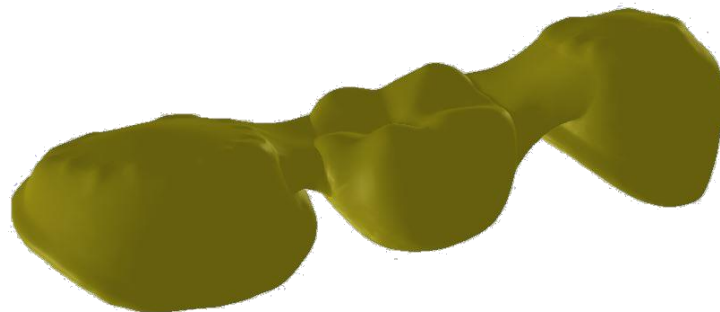


Figura 8. Modelo digital del puente original.

Esta forma de ensamblar es prácticamente la misma a la que realiza el dentista sobre el paciente, por lo que hace que los resultados obtenidos al realizar la comparación sean más interesantes.

Utilizando planos de corte con la herramienta del programa de CAD “vista de sección” (Ver figura 9) podemos comparar la regularidad del posicionamiento del modelo, visualizando los huecos y ajustando de manera más exacta el modelo, esta comprobación se debe realizar a la par que el proceso de ensamble, para asegurarnos de obtener un posicionamiento y unos resultados lo más correctos posibles.

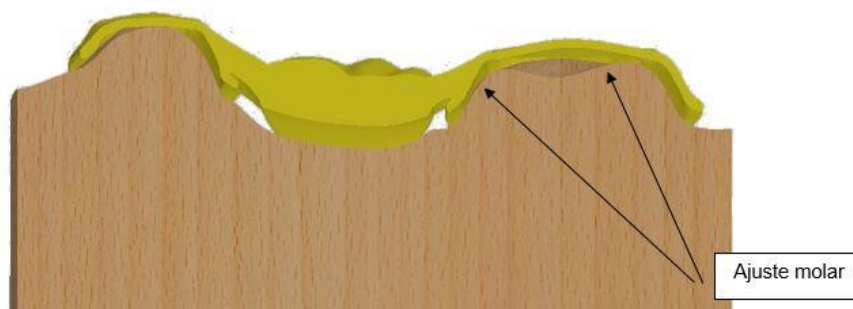


Figura 9. Plano de corte utilizado para lograr el posicionamiento del modelo digital original.

Una vez finalizado este proceso podemos dar por concluido el ajuste y posicionamiento del modelo digital original sobre la base.

Por último se añade el modelo fabricado (Figura 10), en primera instancia ocultamos el modelo del puente original para que al hacer el proceso de colocación del modelo fabricado no nos interfiera y visualicemos solamente los elementos con los que vamos a trabajar.

Como se aprecia en la figura, el postizo central tiene una geometría incompleta, Esto se debe a que el puente se sujeta a la base del escáner con un poco de plastilina, que en el modelo se ha quitado. Se sujeta por el postizo, ya que no se tiene en cuenta para realizar el ensamblaje con los muñones.

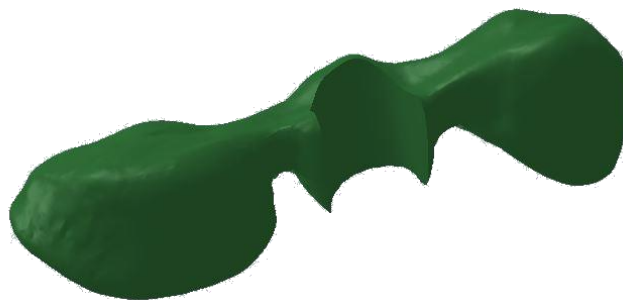


Figura 10. Modelo digital del puente fabricado.

El proceso de ensamble del modelo fabricado es similar al del modelo original, repitiendo todos los pasos tanto de acoplamiento como de verificación. Al acabar el ensamblado visualizamos el modelo original que se encontraba oculto (Figura 11), siguiendo la misma terminología de colores que en las figuras anteriores, es decir, en amarillo el modelo digital original y en verde el modelo digital fabricado.

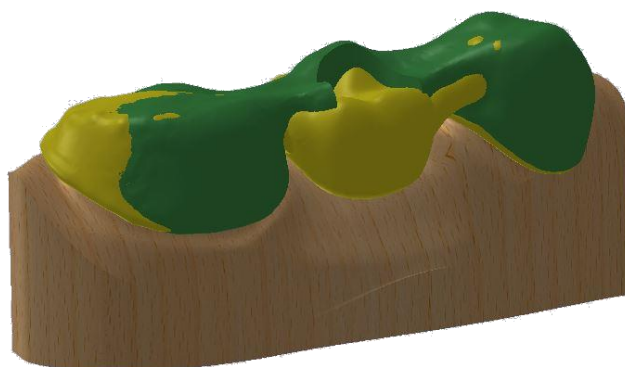


Figura 11. Ensamblaje final del modelo digital original, modelo digital fabricado y modelo digital de la base.

Este proceso se debe de realizar en las 18 comparaciones que queremos hacer, destacando que el ensamblaje de la base con el modelo original no varía, alternando en cada proceso el modelo original fabricado y escaneado.

5. Proceso de comparación digital de los modelos de los puentes

5.1. Introducción y planos de referencia

Una vez se tiene los dos puentes superpuestos se pueden comenzar a realizar comparaciones.

Como el modelo original, tal y como hemos comentado anteriormente, representa la geometría ideal, se tomarán las medidas de las desviaciones de éste como patrón y entonces los valores de las desviaciones del modelo fabricado, que se encuentra superpuesto al modelo original, se consideraran errores ya sean tanto hacia el interior o el exterior (negativas o positivas).

Para poder hacer las comparaciones es necesario definir elementos auxiliares, como es el caso de planos de referencia, además de definir una serie de pasos que nos permitan realizar el proceso de una manera lo más automatizada e intuitiva posible.

Los planos de referencia se crean para proyectar distintas geometrías y poder realizar comparaciones ellos, se necesita hacer un plano asociado al molar y otro plano asociado al premolar.

En la definición de dichos planos utilizamos la geometría del modelo digital original, para que sean los mismos en todas las comparaciones. Para la creación de los planos se utilizan tres puntos, en este caso los puntos más exteriores de la línea que define el “marginal fit”, repartidos en posiciones distintas y con separaciones entre ellos, de la línea de ajuste para evitar falsas orientaciones (que la representación del plano sea lo más fiel posible a la base del muñón).

Una vez definido un plano para cada uno de los dientes, se denominan para su distinción como plano molar y plano premolar, tal y como podemos apreciar en la figura 12.

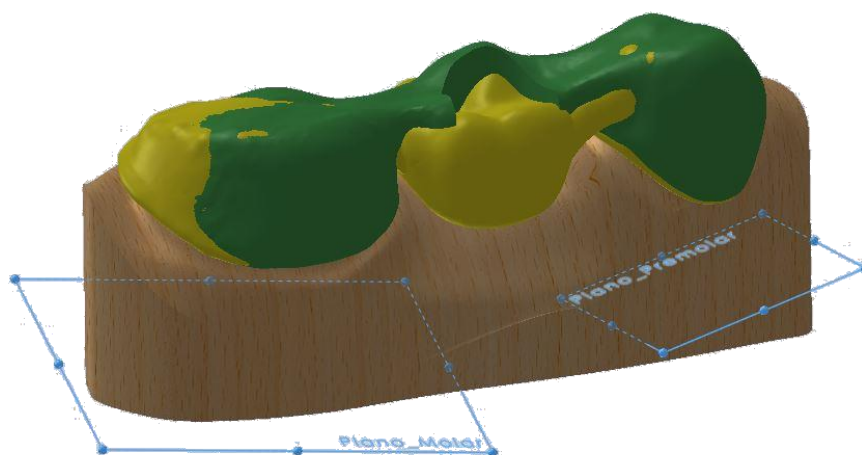


Figura 12. Plano molar y premolar

Para facilitar la visualización de las proyecciones es importante crear dos planos adicionales paralelos a los anteriores pero que se encuentren en una posición externa al ensamblaje, tal y como se observa en la figura 13 a continuación, estos planos se denominarán “planos de trabajo”.

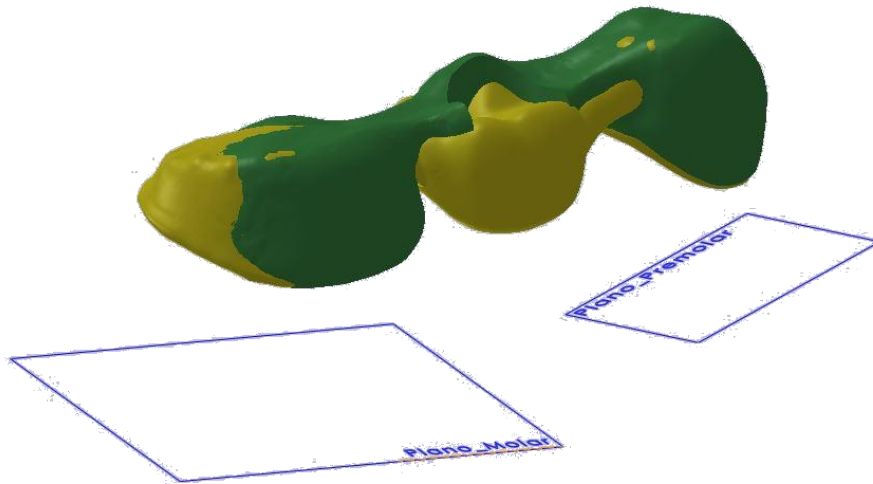


Figura 13. Planos de trabajo paralelos a los planos molar y premolar.

Cuando se tienen los planos de trabajo se proyectan los perfiles de los “marginal fit” de los dientes, en el plano de trabajo molar se proyecta el perfil correspondiente al molar del modelo original y el correspondiente al del modelo fabricado y se repite la misma operación en el plano de trabajo premolar.

Antes de comenzar a proyectar el perfil ocultamos todos los modelos que no son necesarios, en primera instancia dejamos visualizado solo el modelo digital original y nos colocamos en una orientación normal al plano en el que vamos a trabajar, para que podamos ver de manera clara el interior de la pieza dental y se aprecie bien el “marginal fit”.

Una vez tengamos claro cuál es el perfil lo dibujamos a través de un “spline” que una los distintos puntos pertenecientes al perfil que se aprecia en el modelo tridimensional, como observamos en la figura 14.



Figura 14. Perfil del marginal fit del modelo digital original.

Posteriormente, se realiza la misma operación para el perfil del modelo fabricado, teniendo así dos perfiles en los que se puede comparar, tomando como patrón ideal el perfil del modelo original y definiendo como error las desviaciones que se producen en el modelo fabricado con respecto al original. Nos quedaría la siguiente representación gráfica en la que podríamos empezar a sacar resultados. (Ver Figura 15).

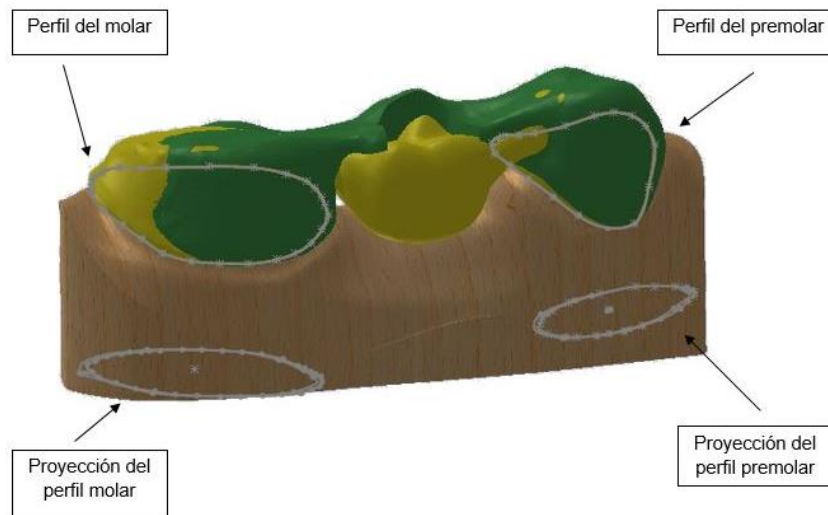


Figura 15. Perfil proyectado perteneciente al modelo digital original.

5.2. Definición de áreas

La comparación entre las líneas (perfiles proyectados) se realiza por medio de la creación de dos áreas.

- Se define “área positiva” cuando, en el plano de corte y desplazándose desde el centro del muñón hacia el exterior del mismo, se encuentra primero el perfil del modelo digital original (ver Figura 16), también se le puede denominar área de holgura.
- Se define un “área negativa” cuando se encuentra primero el perfil del modelo digital muestra. A partir de esta condición se crean las áreas por medio de curvas cerradas en el plano molar y premolar (ver Figura 16), también se le puede denominar área de apriete.

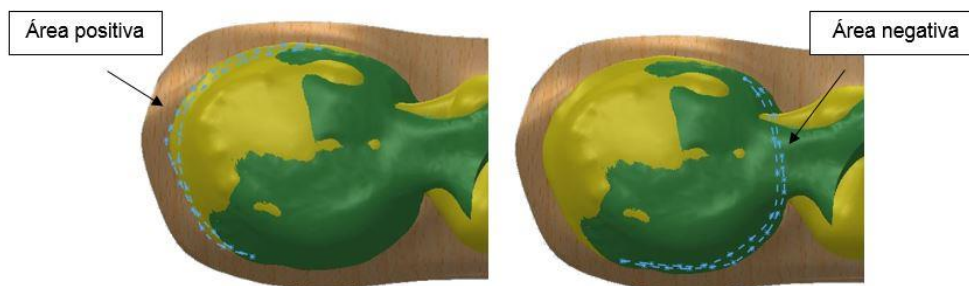


Figura 16. Desviaciones, área negativa y positiva.

Utilizando las herramientas de medición de Solidworks se puede conocer las propiedades de cualquier sección, con lo que se puede medir el área total de cada croquis. El valor de área total es el correspondiente a la suma de las áreas existentes en cada croquis, teniendo como resultado final cuatro áreas: un área positiva molar, un área negativa molar, un área positiva premolar y un área negativa premolar

5.3. Definición de máximos y mínimos

Como medición complementaria se define un sistema de coordenadas sobre cada uno de los dos planos, centrándose en la proyección del centro de gravedad de cada muñón. Se identifican las desviaciones mayores y menores entre los perfiles del modelo original y el modelo fabricado, midiéndolas y registrando en qué cuadrante está cada una.

Se han tomado las dos desviaciones más pronunciadas presentes en cada uno de los cuadrantes del sistema coordenado (ver Figura 17), registrando si se trata de valores positivos o negativos y tomando como referencia si pertenecen a las áreas positivas o negativas anteriormente definidas.

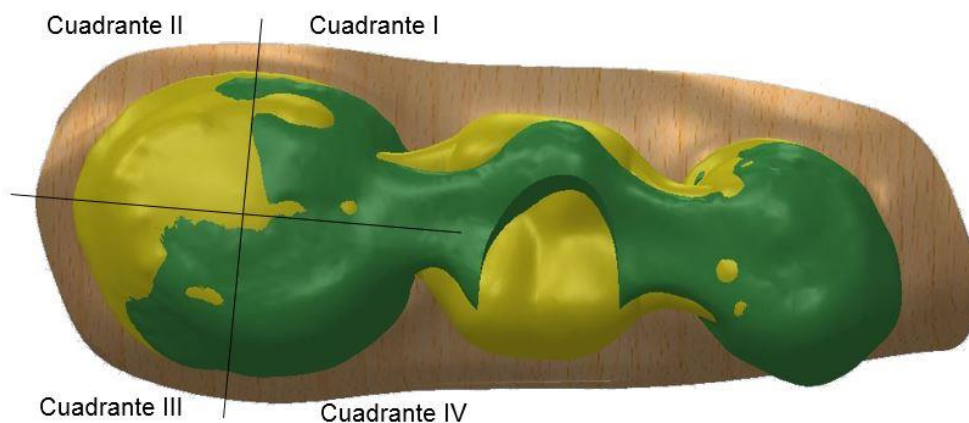


Figura 17. Distribución en el sistema coordenado.

Al definir el sistema de coordenadas en el plano y registrar en qué cuadrante se suceden cada una de las desviaciones, se tiene una idea de hacia dónde se encuentra desplazado el modelo fabricado con respecto al modelo original, además de tener una medida de longitud para saber la magnitud de dicho desplazamiento.

Esta comparación se realiza para localizar de una forma sencilla las desviaciones, para facilitar las modificaciones (en el modelo digital, en los puentes finales).

5.4. Resultados de la comparación digital

Tras realizar las comparaciones entre el modelo digital original y cada uno de los 18 modelos fabricados se obtiene los siguientes resultados:

- Comparación por áreas.
- Máximos y mínimos.
- Comparaciones in-vivo.

5.4.1. Comparación por áreas

Esta comparación evalúa la desviación presente entre la línea de ajuste que define el “marginal fit” del modelo fabricado con respecto al modelo original.

Si el área es negativa el espacio entre la base y el puente es menor al necesario por lo que posiblemente no se pueda aplicar suficiente cemento dental para fijar el puente o en el peor de los casos impida el correcto acople de la prótesis. Por el contrario, si el área es positiva el espacio entre la base y el puente es mayor que el necesario y se debe aplicar más cemento dental para llenar el exceso de espacio, aumentando el riesgo de atrapamiento de aire, el cemento es anaeróbico, y facilitando la formación de huecos y posterior retención de alimentos.

Se define como “área positiva” o zona de holgura cuando en el plano de corte y desplazándose desde el centro del muñón hacia el exterior del mismo, se encuentra primero el perfil del modelo digital original (representado en color rojo en la Figura 18).

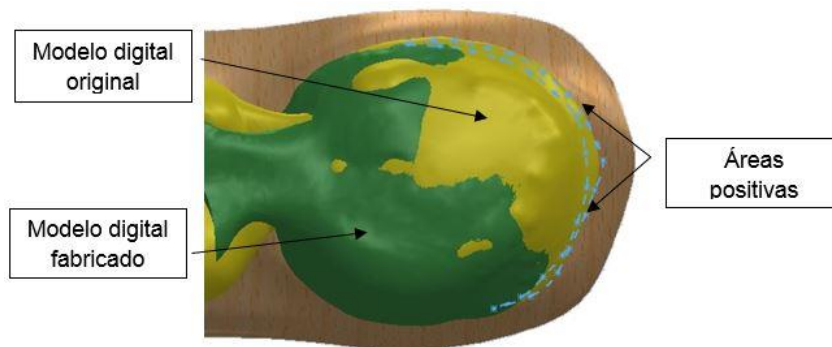


Figura 18. Área Positiva.

Se define como “área negativa” o zona de apriete cuando se encuentra primero el perfil del modelo digital fabricado (representado en color azul en la Figura 19).

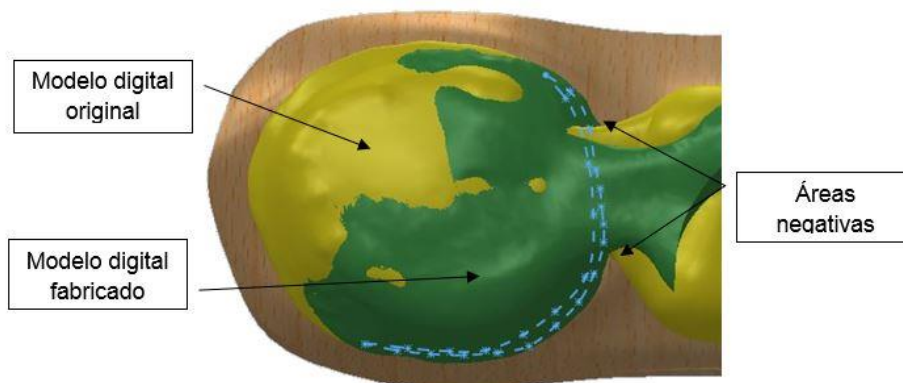


Figura 19. Área negativa.

La Tabla 1 recoge las distintas áreas de los puentes divididas entre los distintos procesos de fabricación y distintos tipos de dientes (molar-premolar). Dichos resultados se resumen a continuación.

	Molar		Premolar	
	Área positiva	Área negativa	Área positiva	Área negativa
COLADO 1	4,01	-4,57	2,32	-2,50
COLADO 2	1,18	-6,70	0,52	-2,74
COLADO 3	2,29	-4,38	0,41	-1,31
COLADO 4	0,81	-3,77	1,12	-2,03
COLADO 5	0,46	-6,14	1,31	-2,20
COLADO 6	1,05	-5,05	0,51	-1,81
FRESADO 1	0,80	-3,43	0,35	-1,13
FRESADO 2	0,53	-2,59	0,24	-1,68
FRESADO 3	1,75	-3,08	0,16	-1,45
FRESADO 4	0,78	-3,92	0,43	-1,60
FRESADO 5	2,10	-3,94	1,07	-1,30
FRESADO 6	2,70	-3,89	1,38	-1,78
SINTERIZADO 1	1,62	-4,72	0,28	-2,44
SINTERIZADO 2	2,21	-5,27	0,90	-2,41
SINTERIZADO 3	2,26	-3,87	0,71	-1,02
SINTERIZADO 4	3,30	-4,07	0,97	-2,27
SINTERIZADO 5	1,90	-4,07	1,45	-1,51
SINTERIZADO 6	1,29	-3,65	1,25	-1,51

Tabla 1. Áreas de las desviaciones entre el modelo digital original y los modelos fabricados (Unidades en mm²).

5.4.1.1. Análisis de resultados de la comparación por área

Para realizar un mejor análisis de los resultados obtenidos en la Tabla 1, se ha realizado el cálculo del valor promedio de las áreas, tanto en su valor positivo como negativo. De este modo se pueden apreciar de una manera más rápida los resultados obtenidos para cada uno de los procesos utilizados.

Este cálculo es un buen estimador para saber si la tendencia del proceso es ajustar o dejar más holgura. Se puede comparar entre ellos, a falta de un análisis individualizado.

	Molar		Premolar	
	Área positiva	Área negativa	Área positiva	Área negativa
COLADO	1,63	- 5,10	1,03	- 2,10
FRESADO	1,44	- 3,48	0,61	- 1,49
SINTERIZADO	2,10	- 4,28	0,93	- 1,86

Tabla 2. Valor medio de las desviaciones calculadas por medio de áreas para cada proceso de fabricación (unidades en mm²).

Centrándonos en los resultados de la Tabla 2 y sabiendo que el área, ya sea positiva o negativa, indica discrepancia entre el modelo digital original y los fabricados, se observan que los valores más alejados son los correspondientes a los puentes colados,

seguidos de los puentes sinterizados (estos son los más desviados en el área positiva del molar).

Se puede decir que los puentes colados son los que presentan áreas de más apriete y los puentes sinterizados áreas de más holgura, en general.

Por lo tanto, podemos concluir que **los puentes fresados** son los que mejor se adaptan a los muñones según este método de comparación.

Es conveniente indicar que antes de rehacer el puente hay dos opciones para ajustarlo: eliminar material de los muñones (más fácil, pero afecta al paciente y al aguante del muñón), o eliminar material del puente. Sólo hace falta saber por dónde eliminar.

Para ello es muy importante tener en cuenta el espesor de pared, ya que en el proceso de colado, por ejemplo, se producen espesores de pared mayores.

5.4.2. Desviaciones máximas y mínimas

Esta comparación evalúa las desviaciones máximas y mínimas definidas en cuadrantes en cada plano de trabajo, molar y premolar, como se muestra en la siguiente figura 20.



Figura 20. Algunas desviaciones máximas y mínimas en la comparación entre el modelo digital original y el modelo #1 fabricado por mecanizado CNC.

En las siguientes tablas (Tabla 3, molares y Tabla 4, premolares) se resumen los resultados de las 36 comparaciones realizadas para cada modo de fabricación (18 en el plano molar y 18 en el premolar), registrando las dos primeras desviaciones máximas (holgura) y las dos primeras mínimas (apriete) que se han producido y en que cuadrante se han producido.

	MOLAR							
	MAXIMOS				MINIMOS			
	1º		2º		1º		2º	
	MAX.	CUADRANTE	MAX.	CUADRANTE	MIN.	CUADRANTE	MIN.	CUADRANTE
COLADO 1	0,43	IV	0,39	IV	0,64	II	0,63	III
COLADO 2	0,33	IV	0,22	I	0,71	III	0,68	II
COLADO 3	0,22	III	0,15	IV	0,43	II	0,30	III

COLADO 4	0,16	I	0,14	II	0,39	IV	0,27	III
COLADO 5					0,49	III	0,47	II
COLADO 6	0,30	I	0,23	I	0,43	IV	0,42	III
FRESADO 1	0,12	IV			0,26	II	0,25	I
FRESADO 2	0,15	IV	0,13	III	0,32	IV	0,28	I
FRESADO 3	0,19	III	0,19	II	0,43	IV	0,35	IV
FRESADO 4	0,13	II	0,11	I	0,33	IV	0,32	I
FRESADO 5	0,39	III	0,32	IV	0,30	I	0,28	II
FRESADO 6	0,46	III	0,45	III	0,39	II	0,29	I
SINTERIZADO 1	0,24	IV	0,21	I	0,42	III	0,42	II
SINTERIZADO 2	0,31	I	0,28	I	0,55	IV	0,49	III
SINTERIZADO 3	0,34	I	0,30	IV	0,45	II	0,41	II
SINTERIZADO 4	0,48	III	0,44	II	0,41	I	0,33	IV
SINTERIZADO 5	0,21	IV	0,19	I	0,39	III	0,37	III
SINTERIZADO 6	0,14	I	0,13	I	0,45	III	0,32	III

Tabla 3. Desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano molar entre el modelo digital original y los modelos fabricados (unidades en mm).

PREMOLAR								
MAXIMOS					MINIMOS			
1º		2º		1º		2º		
MAX.	CUADRANTE	MAX.	CUADRANTE	MIN.	CUADRANTE	MIN	CUADRANTE	
COLADO 1	0,44	IV	0,32	IV	0,35	II	0,28	II
COLADO 2	0,10	IV			0,25	II	0,21	III
COLADO 3	0,18	IV			0,21	III	0,15	III
COLADO 4	0,22	III	0,15	II	0,31	I	0,19	I
COLADO 5	0,26	III	0,23	IV	0,28	I	0,25	I
COLADO 6	0,23	IV	0,12	I	0,25	II	0,19	II
FRESADO 1	0,16	IV			0,17	I	0,15	II
FRESADO 2	0,10	IV	0,10	III	0,20	I	0,19	II
FRESADO 3	0,14	II	0,07	III	0,22	I	0,22	I
FRESADO 4	0,16	II	0,10	IV	0,25	I	0,19	III
FRESADO 5	0,22	I	0,11	I	0,30	IV	0,22	IV
FRESADO 6	0,29	II	0,23	II	0,28	IV	0,19	III
SINTERIZADO 1	0,13	I			0,29	II	0,21	IV
SINTERIZADO 2	0,34	I	0,22	II	0,33	IV	0,36	III
SINTERIZADO 3	0,16	IV	0,13	I	0,21	III	0,16	II
SINTERIZADO 4	0,23	I	0,14	I	0,28	III	0,16	IV
SINTERIZADO 5	0,31	I	0,23	IV	0,22	II	0,15	III
SINTERIZADO 6	0,29	I	0,19	II	0,28	III	0,24	IV

Tabla 4. Desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano premolar entre el modelo digital original y los modelos fabricados (unidades en mm).

5.4.2.1. *Análisis de resultados de las desviaciones máximas y mínimas*

En primer lugar analizamos cómo se comportan las desviaciones lineales máximas y mínimas en cada proceso de fabricación.

Por eso en primera instancia se realizan unas graficas lineales Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24 en las que podemos observar la tendencia de los valores para cada proceso de fabricación.

Es importante destacar que el orden de medida de los puentes reflejados en la gráfica no importa, por lo tanto, lo más importante serían los valores promedio de cada método. Las gráficas resultantes resultan interesantes para ver las desviaciones entre las muestras en cada proceso.

Centrándonos en cada una de las tablas, en la tabla 3 y en la tabla 4, en las que se recogen los resultados de los dientes molares, podemos observar que las desviaciones más bajas se producen en los puentes fresados, por lo que son los más precisos.

Por el contrario los más desviados son los colados en valores mínimos y los puentes sinterizados en valores máximos, esto puede deberse a que son procesos de fabricación menos eficientes puesto que son los que peores resultados tanto estéticamente como funcionalmente producen, a acumulaciones de errores durante el proceso, espesores de pared.

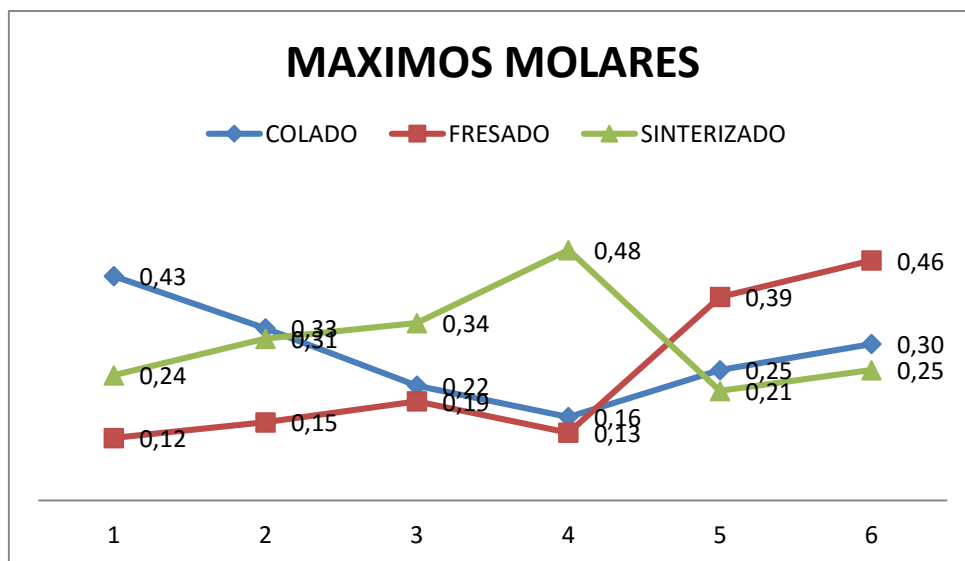


Figura 21. Distribución de las desviaciones lineales máximas en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.

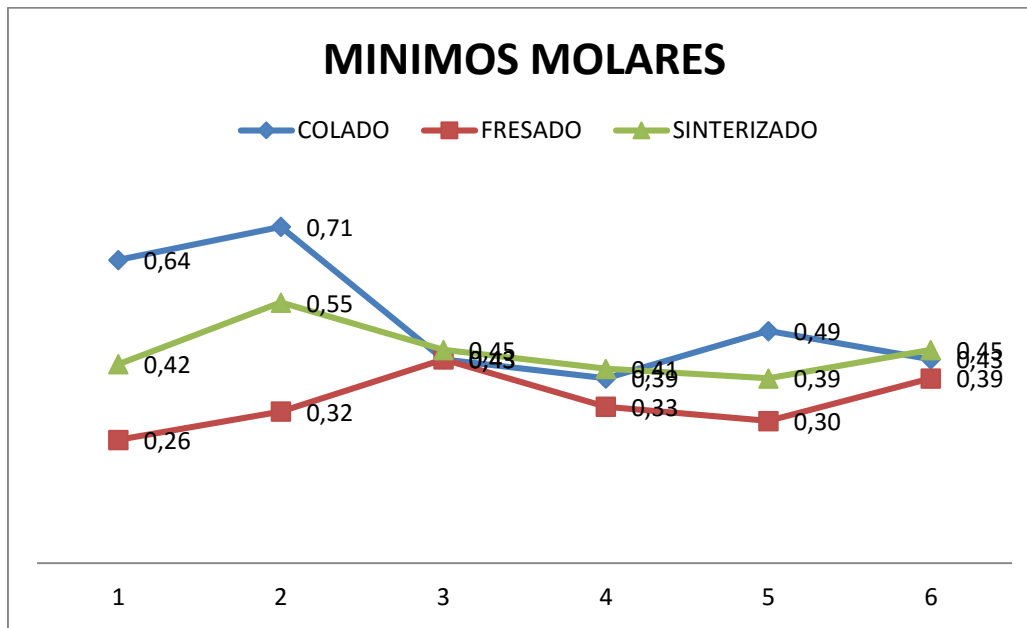


Figura 22. Distribución de las desviaciones lineales mínimas en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.

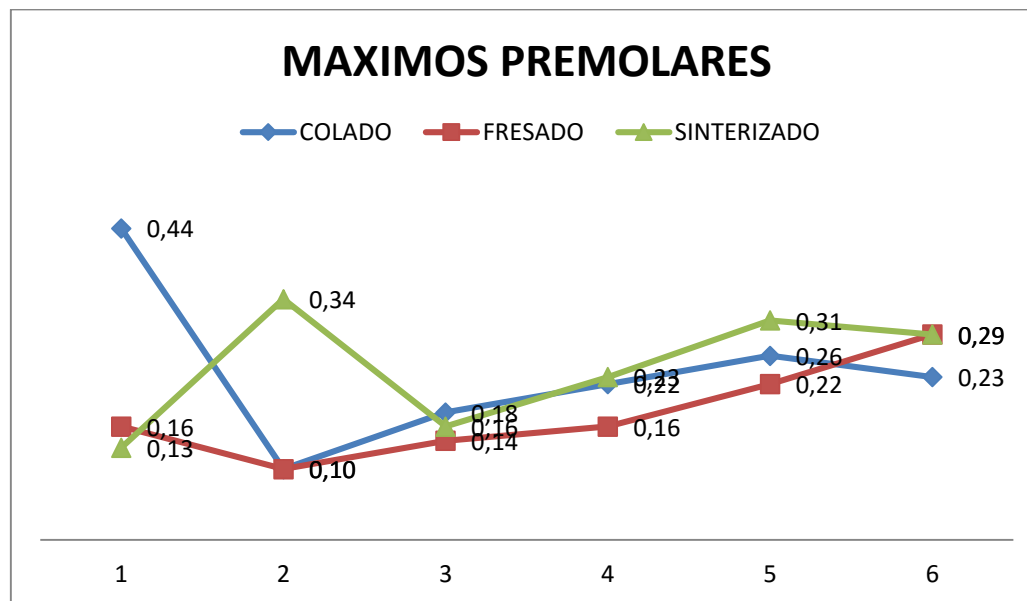


Figura 23. Distribución de las desviaciones lineales maximas en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.

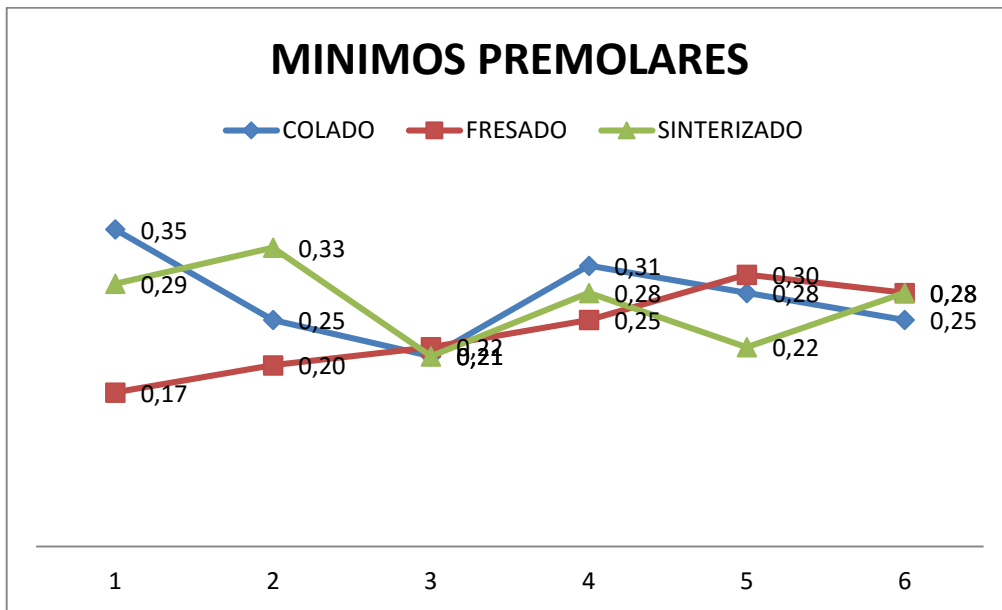


Figura 24. Distribución de las desviaciones lineales mínimas en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.

Uno de los aspectos importantes que se pueden observar en estas gráficas, es la existencia de valores anómalos, es decir, que se desvían mucho de la media, por ejemplo, el valor máximo de los molares 0,46 en los puentes fresados y el 0,48 en los puentes sinterizados.

Debido a que los valores los extrae el usuario desde un entorno CAD a partir de los modelos 3D, para comprobar que los datos son correctos y no se trata de un error de medida o apreciación, aplicaremos un criterio de rechazo probabilístico (Chauvenet). Para lo cual repetiremos la medición un número representativo de veces y calcularemos el intervalo de aceptación. Vamos a realizar esta comprobación para el valor 0,46 (molar fresado) u 0,48 (molar sinterizado).

	X _{c1}	X _{c2}	X _{c3}	X _{c4}	X _{c5}	X _{c6}	X _{c7}	X _{c8}	X _{c9}	X _{c10}	X _{cj}	S _{ci}
Medida sobre el fresado	0,46	0,42	0,44	0,40	0,47	0,42	0,42	0,45	0,45	0,47	0,44	0,024
Medida sobre el sinterizado	0,48	0,38	0,35	0,36	0,40	0,33	0,35	0,36	0,33	0,35	0,37	0,044

Media $x_{ci} = \frac{\sum_{j=1}^{n_c} X_{cj}}{n_c}$ Desviación típica $S_{ci} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_c} (X_{cj} - X_{ci})^2}{n_c - 1}}$

Para comprobar que todas las medidas se han realizado correctamente, aplicamos para dichas mediciones el criterio de rechazo de medidas de Chauvenet, donde para n_c=10 mediciones, la constante esta tabulada y toma un valor K_n=1,96.

	$X_{cj} - K_n \cdot S_{ci}$	$X_{cj} + K_n \cdot S_{ci}$	¿Cumplen criterio de Chauvenet?
Punto en puente fresado	0,39288746	0,48711254	SI
Punto en puente sinterizado	0,28210421	0,45589579	NO

Si algún punto queda fuera del intervalo establecido por Chauvenet, se descarta y se toman puntos adicionales, se vuelve a calcular la media y la desviación típica y aplicar de nuevo el criterio de rechazo.

En el caso de la medida inicial sobre el punto de sinterizado el $X_{c1}=0,48$ no cumple el criterio de Chauvenet por lo que tendremos que calcular un punto adicional y volver a calcular la media y la desviación típica.

	X_{c1}	X_{c2}	X_{c3}	X_{c4}	X_{c5}	X_{c6}	X_{c7}	X_{c8}	X_{c9}	X_{c10}	X_{cj}	S_{ci}
Punto sinterizado	0,33	0,38	0,35	0,36	0,40	0,33	0,35	0,36	0,33	0,35	0,35	0,023

	$X_{cj} - K_n \cdot S_{ci}$	$X_{cj} + K_n \cdot S_{ci}$	¿Cumplen criterio de Chauvenet?
Punto sinterizado	0,30949654	0,39850346	NO

Vuelve a ocurrir lo mismo, pero con el punto $X_{c5}=0,40$ por lo que volvemos a repetir el proceso.

	X_{c1}	X_{c2}	X_{c3}	X_{c4}	X_{c5}	X_{c6}	X_{c7}	X_{c8}	X_{c9}	X_{c10}	X_{cj}	S_{ci}
Punto sinterizado	0,33	0,38	0,35	0,36	0,35	0,33	0,35	0,36	0,33	0,35	0,35	0,016

	$X_{cj} - K_n \cdot S_{ci}$	$X_{cj} + K_n \cdot S_{ci}$	¿Cumplen criterio de Chauvenet?
Punto sinterizado	0,31773542	0,38026458	SI

Ahora si cumple el criterio por lo que el punto más cercano al valor verdadero se corresponde con la media: $X_c=0,35$ mm.

Por lo que podemos decir que el valor no se desvía tanto como la primera medida tomada, pero se desvía de la media del resto de puntos por lo que podemos decir que no se trata de un error de medida.

En la siguiente tabla Tabla 5 se recogen los valores medios de las desviaciones máximas y mínimas para cada modo de fabricación y los cuadrantes en los que predominan dichas desviaciones en los molares.

MOLAR								
MAXIMOS					MINIMOS			
1º		2º			1º		2º	
MAX.	CUADRANTE	MAX.	CUADRANTE	MIN.	CUADRANTE	MIN.	CUADRANTE	
COLADO	0,24	IV	0,19	IV	-0,52	III	-0,46	III
FRESADO	0,24	III	0,20	III	-0,34	IV	-0,30	III
SINTERIZADO	0,31	I	0,26	I	-0,45	III	-0,39	III

Tabla 5. Valor medio de las desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano molar y cuadrantes predominantes de las mismas (unidades en mm).

Analizando los valores de la tabla anterior y los resultados mostrados en las gráficas de los molares Figura 25 y Figura 26, podemos observar que los valores medios de las desviaciones máximas que menos se alejan son los de los puentes colados y fresados.

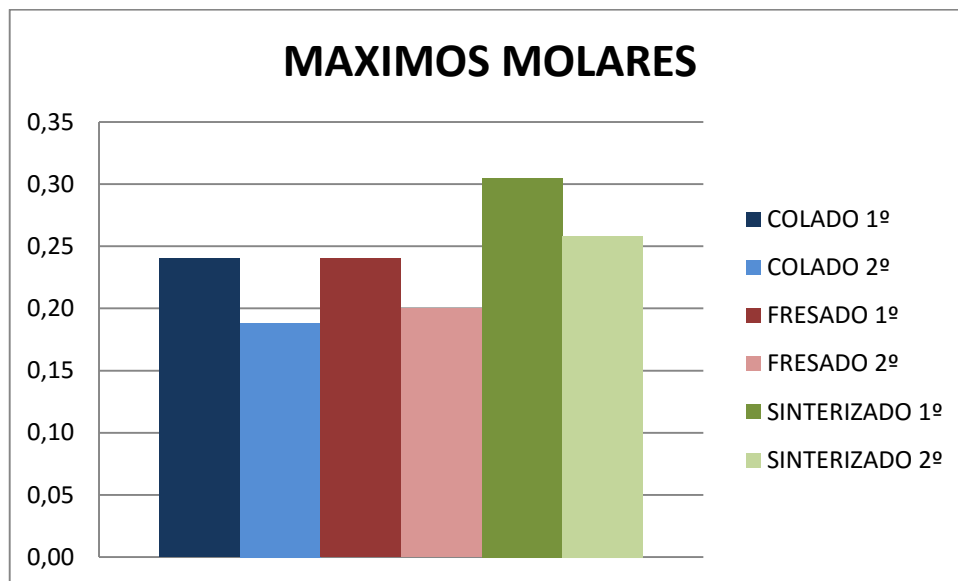


Figura 25. Distribución de las desviaciones lineales medias máximas (1ª y 2ª) en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.

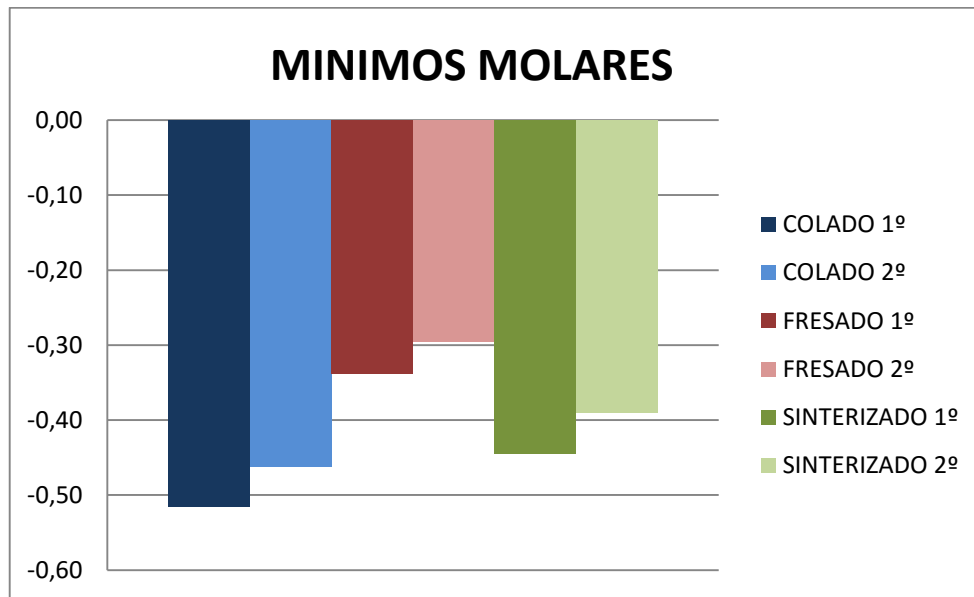


Figura 26. Distribución de las desviaciones lineales medias mínimas (1ª y 2ª) en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.

Pero observando los valores de las desviaciones mínimas, podemos concluir que los valores que menos se alejan de los valores óptimos y por lo tanto, mejor se adaptan a los muñones, son de nuevo los fabricados por mecanizado.

En la siguiente grafica Figura 27 se recogen los valores diferenciados en cuadrantes en los que se producen más desviaciones, tanto máximas como mínimas, para cada tipo de proceso de fabricación en los molares.

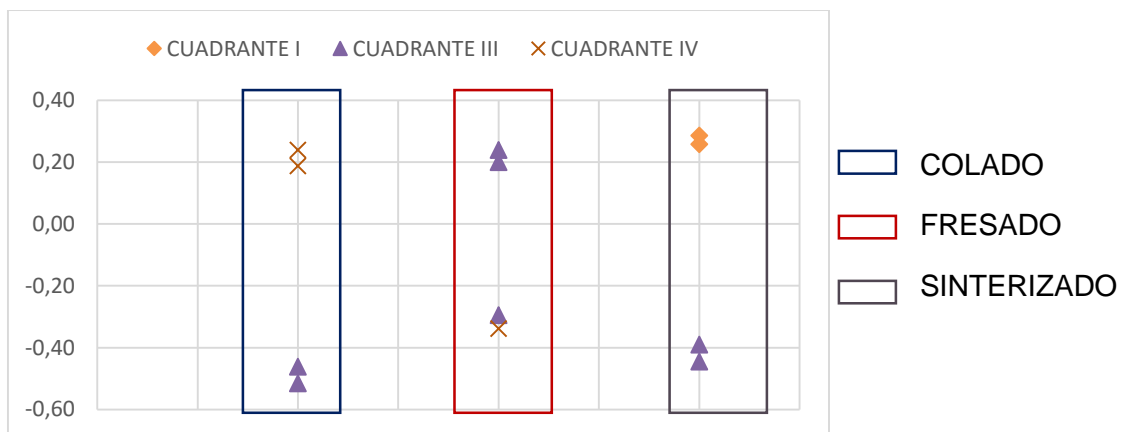


Figura 27. Distribución de los cuadrantes predominantes en cada una de las desviaciones en los molares para cada tipo de fabricación utilizado.

Observándola, podemos decir que el cuadrante en el que se producen mas irregularidades es el tercer cuadrante con mucha diferencia, aunque los puentes fresados y sinterizados las desviaciones lineales maximas se producen en el cuarto y primer cuadrante respectivamente.

Esto puede ser debido a diversos factores:

- Debido a la fabricación, por la orientación de las piezas en el plato.
- Desgaste de herramientas con lo cual afecta a los últimos mecanizados antes del cambio de herramienta. Afecta por todas partes por igual, pero al ensamblar se reparte el error (se ajusta al modelo de la base) y por el tipo de geometría queda no encajando mayoritariamente en el tercer cuadrante.
- Utilización de un solo origen (cero pieza). Suele estar centrado y no lo trasladan a cada pieza.

Por lo tanto para intentar solucionar esto habría que:

- Analizar con más detalle los pasos y la operativa seguida en la fabricación.
- Si siempre se acumula el error en ese tercer cuadrante, eso quiere decir que los parámetros influyentes son varios y no obvios, podemos modificar el modelo 3D original para contrarrestar el efecto.
- Realizar una verificación “on-line” para corregirlo por re-mecanizado
- Verificar desgaste de herramienta con mayor frecuencia.

Focalizando el problema para cada tipo de proceso, se pueden sugerir diferentes ideas para tratar de solucionar el problema.

- En colada, tener en cuenta la contracción, no se redirecciona, es totalmente libre.
- En sinterizado tener en cuenta: la focalización del haz, la expansión del metal (más controlada), la re-fundición de las capas previas, las deformaciones por calor (uso de soportes), la orientación de piezas en la máquina.
- En fresado, aunque es el proceso que mejores resultados ofrece, podemos mejorarlo prestando más atención al reglaje de la máquina y amarre de la pieza, ajustando mejor las herramientas y respetando su ciclo de vida.

En la tabla 6 se recogen los valores medios de las desviaciones máximas y mínimas para cada modo de fabricación, así como los cuadrantes en los que predominan dichas desviaciones en los premolares.

	PREMOLAR							
	MAXIMOS				MINIMOS			
	1º		2º		1º		2º	
	MAX.	CUADRANTE	MAX.	CUADRANTE	MIN.	CUADRANTE	MIN.	CUADRANTE
COLADO	0,24	IV	0,14	IV	-0,28	II	-0,21	II
FRESADO	0,18	II	0,10	III	-0,24	II	-0,19	III
SINTERIZADO	0,24	I	0,15	II	-0,27	III	-0,21	IV

Tabla 6. Valor medio de las desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano premolar y cuadrantes predominantes de las mismas (unidades en mm).

Analizando los valores de la tabla anterior y los resultados mostrados en las gráficas de los molares Figura 28 y Figura 29, podemos observar que los valores medios de las desviaciones máximas y mínimas que menos se alejan, vuelven a ser los de los puentes fresados.

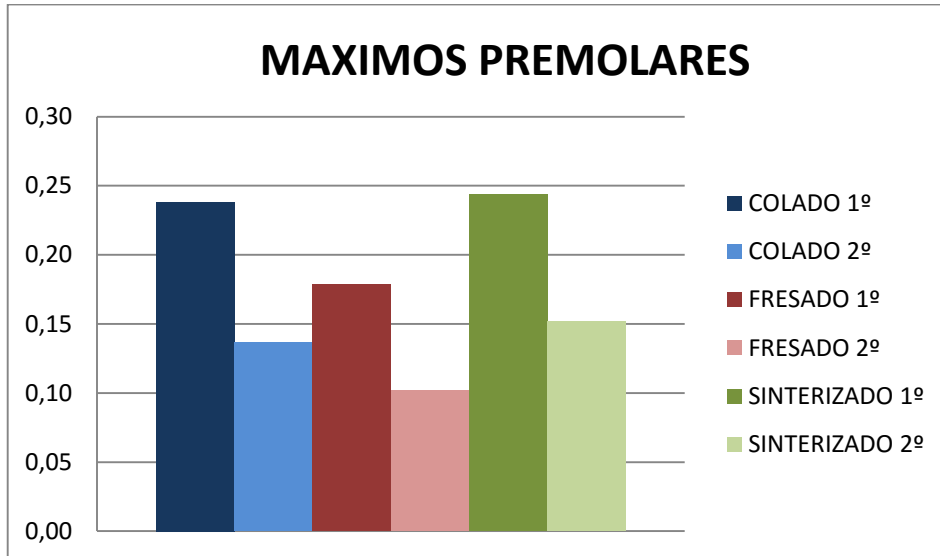


Figura 28. Distribución de las desviaciones lineales medias máximas (1ª y 2ª) en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.

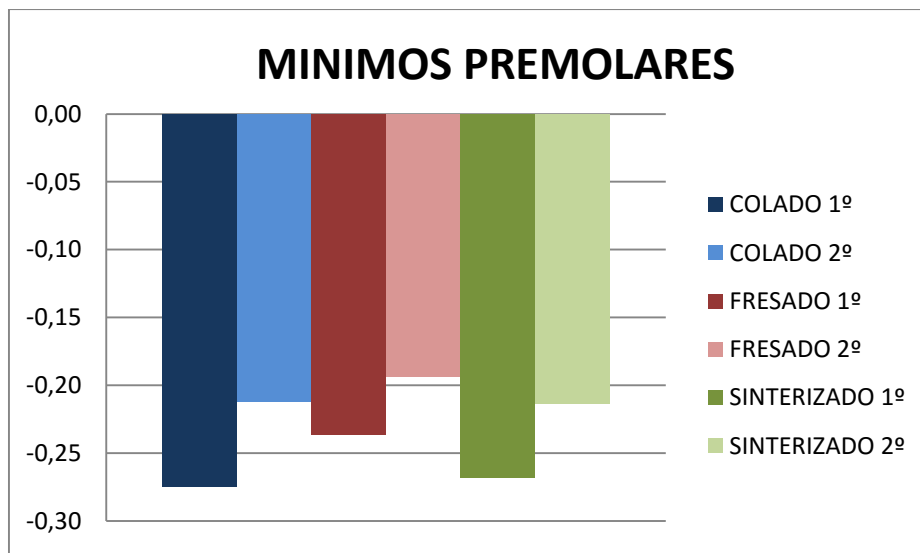


Figura 29. Distribución de las desviaciones lineales medias mínimas (1ª y 2ª) en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.

En la siguiente grafica (Figura 30) se recogen los valores diferenciados en cuadrantes en los que se producen más desviaciones, tanto máximas como mínimas, para cada tipo de proceso de fabricación en los premolares.

Observándola, podemos decir que el cuadrante en el que se producen mas irregularidades es el segundo cuadrante seguidos del tercer y cuarto cuadrante.

Volviendo a coincidir con los molares, en que las desviaciones máximas del proceso de colado se producen en el cuarto cuadrante y que el tercer cuadrante es uno de los más alejados, por lo que si se aplican medidas correctoras deben ser sobre él.

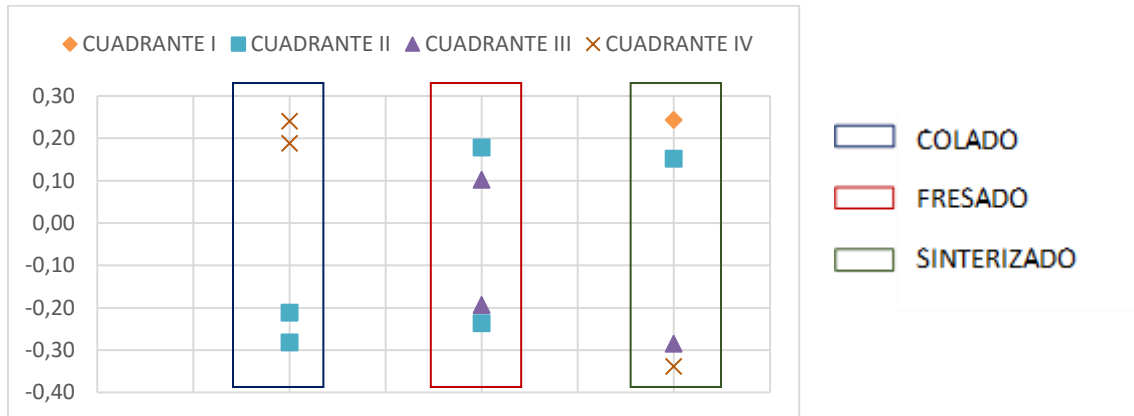


Figura 30. Distribución de los cuadrantes predominantes en cada una de las desviaciones en los premolares para cada tipo de fabricación utilizado.

5.4.3. Comparaciones in-vitro

A continuación, se realizan comparaciones entre los puentes fabricados por cada tipo de proceso, para ello se realizan mediciones sobre las piezas fabricadas y escaneadas, para comparar distancias entre puentes, separaciones, espesores....

En estas comparaciones no se pierde la idea final que es hacerlas de una forma sencilla y rápida para poder valorar las piezas obtenidas. Por supuesto cualquier dato obtenido puede servir para realimentar el proceso de diseño y fabricación y corregir errores.

Las fotografías se realizan con una lupa electrónica de bajo coste (Celestron HDM Pro) con conexión USB a ordenador y software de medida incorporado (ver Figura 31), para poder visualizar distintos aspectos de imperfecciones, rugosidades y variaciones geométricas entre los distintos puentes.



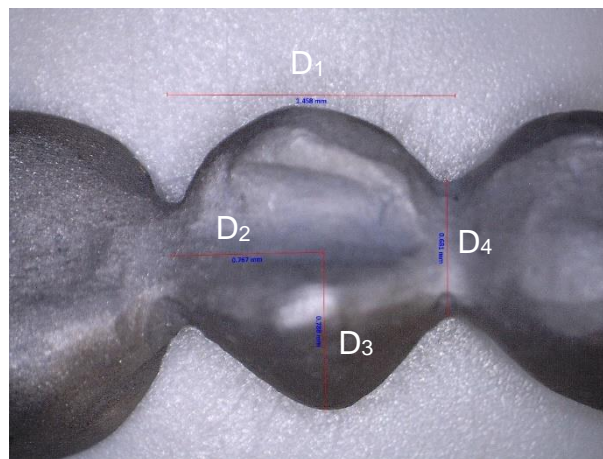
Figura 31. Lupa electrónica Celestron HDM Pro.

Se observan para cada uno de los procesos de fabricación las distancias o medidas más significativas, en el muñón central del puente (Tabla 7, Tabla 10 y Tabla 13), en el molar (Tabla 8, Tabla 11 y Tabla 14) y en el premolar (Tabla 9, Tabla 12 y Tabla 15).

- COLADO

En la siguientes tablas (Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9), se recogen los valores de las distancias o medidas para los puentes fabricados mediante colado.

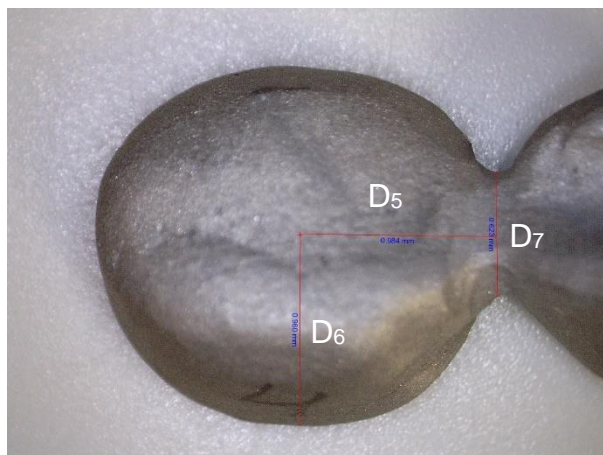
En la primera, Tabla 7, observamos cuatro valores, el radio₁ central D₁, el radio₂ central D₂, el diámetro central D₃ y el ancho del conector derecho D₄.



D ₁	1,458
D ₂	0,767
D ₃	0,788
D ₄	0,681

Tabla 7. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante colado (unidades en mm) (I).

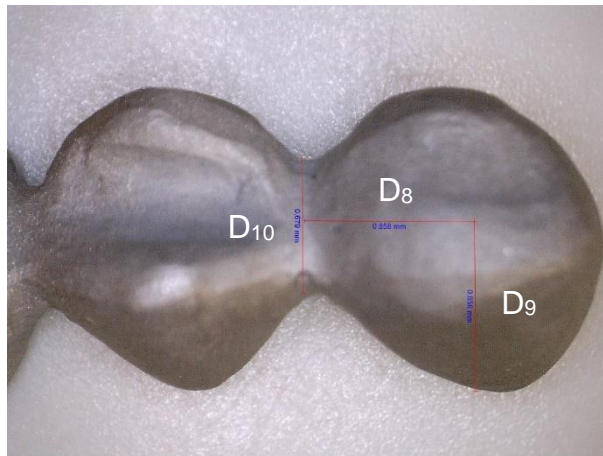
A continuación, Tabla 8, observamos tres valores, el radio₁ molar D₅, el radio₂ molar D₆ y el ancho del conector izquierdo D₇.



D ₅	0,984
D ₆	0,960
D ₇	0,623

Tabla 8. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante colado (unidades en mm) (II).

Y por último, Tabla 9, observamos tres valores, el radio₁ premolar D₈, el radio₂ premolar D₉ y el ancho del conector derecho D₁₀.



D ₈	0.858
D ₉	0.858
D ₁₀	0.679

Tabla 9. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante colado (unidades en mm) (III).

Se realizaron algunas fotografías (Figura 32), aprovechando la lupa electrónica para observar rugosidades, espesores, acabados... de los puentes.

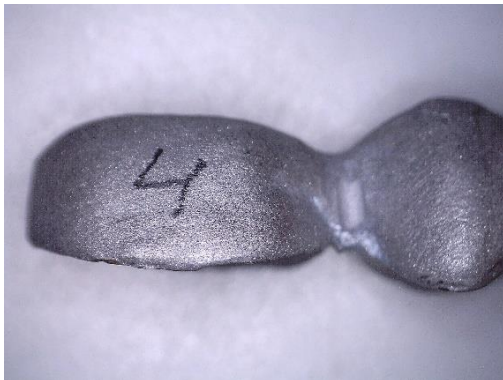


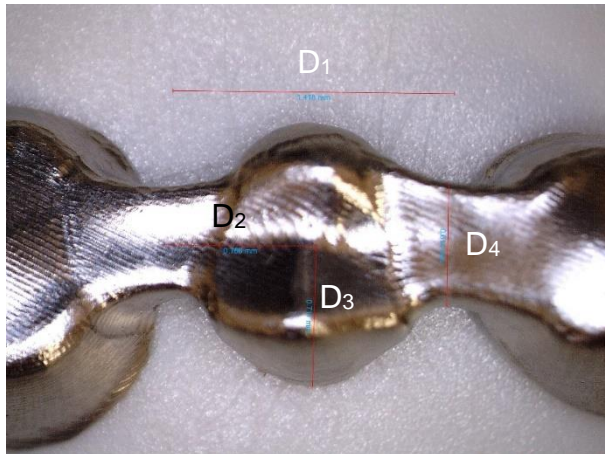
Figura 32. Imágenes en perfil y planta de las piezas fabricadas mediante colado para observar aspectos físicos de las mismas.

Se observa una superficie prácticamente lisa, sin perturbaciones en su cuerpo y por lo tanto, con un buen acabado superficial respecto a las piezas que se fabrican con este proceso.

- FRESADO

En la siguientes tablas (Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12), se recogen los valores de las distancias o medidas para los puentes fabricados mediante fresado.

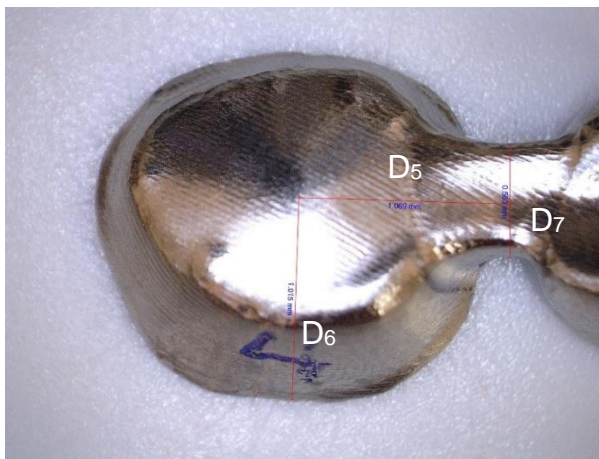
En la primera, Tabla 10, observamos cuatro valores, el radio₁ central D₁, el radio₂ central D₂, el diámetro central D₃ y el ancho del conector derecho D₄.



D ₁	1,418
D ₂	0,766
D ₃	0,711
D ₄	0,614

Tabla 10. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante fresado (unidades en mm) (I).

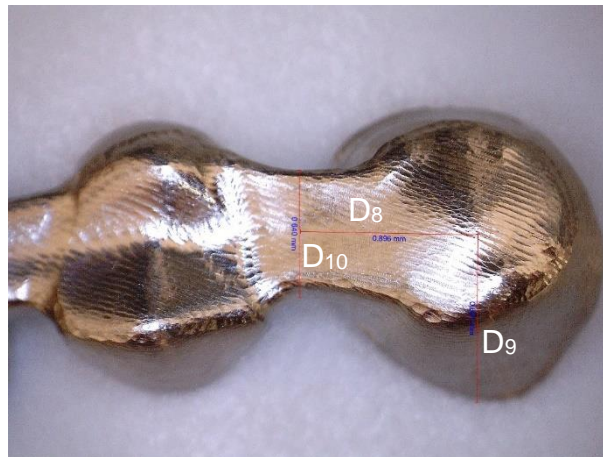
A continuación, Tabla 11, observamos tres valores, el radio₁ molar D₅, el radio₂ molar D₆ y el ancho del conector izquierdo D₇.



D ₅	1,609
D ₆	1,015
D ₇	0,563

Tabla 11. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante fresado (unidades en mm) (II).

Y por último, Tabla 12, observamos tres valores, el radio₁ premolar D₈, el radio₂ premolar D₉ y el ancho del conector derecho₂ D₁₀.



D ₈	0,896
D ₉	0,851
D ₁₀	0,640

Tabla 12. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante fresado (unidades en mm) (III).

Se realizaron algunas fotografías (Figura 33), aprovechando la lupa electrónica para observar rugosidades, espesores, acabados... de los puentes.



Figura 33. Imágenes en perfil y planta de las piezas fabricadas mediante fresado para observar aspectos físicos de las mismas.

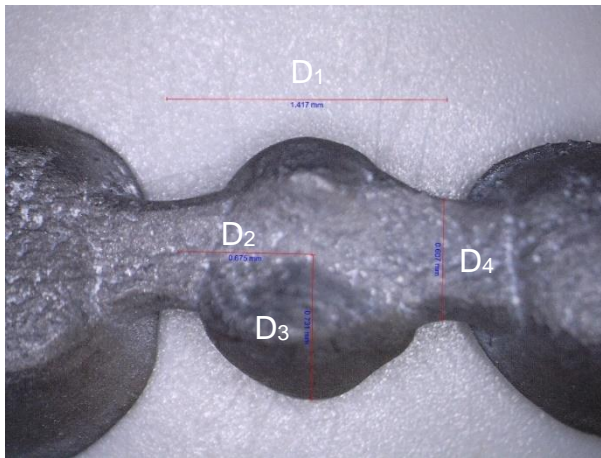
En las que se puede observar un acabado extremadamente liso y brillante si lo comparamos con el resto de puentes fabricados por otro proceso de fabricación, esto se debe a que el mecanizado se trata de un proceso que ofrece unos acabados superficiales muy buenos, por el contrario, es uno de los procesos más costosos de realizar, ya que requiere de herramientas de corte especiales y mano de obra cualificada.

Por lo que podemos decir que no contiene casi ninguna irregularidad y tiene un acabado superficial extremadamente bueno.

- SINTERIZADO

En la siguientes tablas (Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15), se recogen los valores de las distancias o medidas para los puentes fabricados mediante sinterizado.

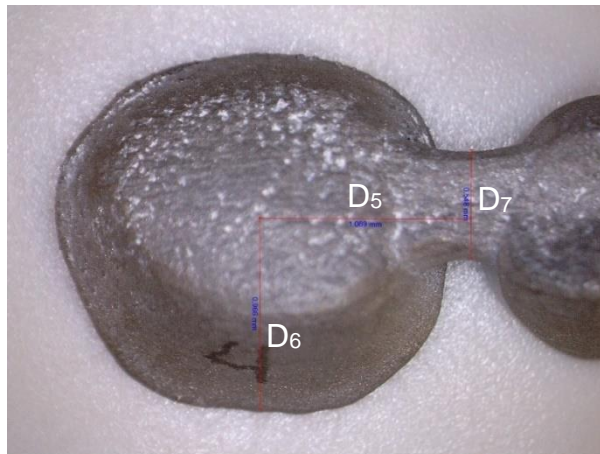
En la primera, Tabla 13, observamos cuatro valores, el radio₁ central D₁, el radio₂ central D₂, el diámetro central D₃ y el ancho del conector derecho D₄.



D ₁	1,417
D ₂	0,675
D ₃	0,731
D ₄	0,607

Tabla 13. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante sinterizado (unidades en mm) (I).

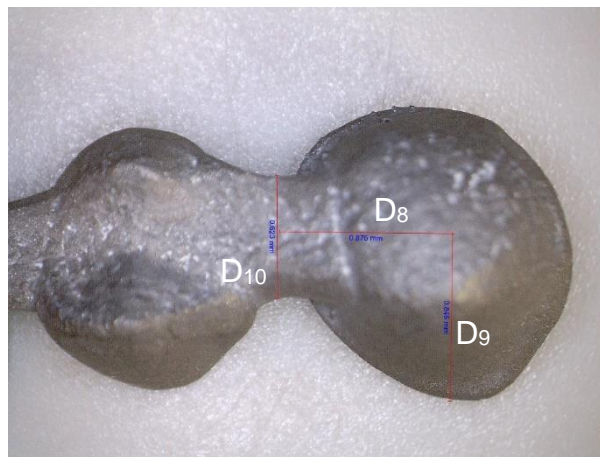
A continuación, Tabla 14, observamos tres valores, el radio₁ molar D₅, el radio₂ molar D₆ y el ancho del conector izquierdo D₇.



D ₅	1,069
D ₆	0,966
D ₇	0,548

Tabla 14. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante sinterizado (unidades en mm) (II).

Y por último, Tabla 15, observamos tres valores, el radio₁ premolar D₈, el radio₂ premolar D₉ y el ancho del conector derecho₂ D₁₀.



D ₈	0,876
D ₉	0,846
D ₁₀	0,623

Tabla 15. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante sinterizado (unidades en mm) (III).

Se realizaron algunas fotografías (Figura 34), aprovechando la lupa electrónica para observar rugosidades, espesores, acabados... de los puentes.



Figura 34. Imágenes en perfil y planta de las piezas fabricadas mediante sinterizado para observar aspectos físicos de las mismas.

Como observamos en los puentes sinterizados se aprecia un acabado superficial con numerosas irregularidades, por lo tanto un acabado basto, esto es debido a que las piezas sinterizadas, siempre requieren de un trabajo de acabado posterior a la fabricación de la pieza.

5.4.3.1. Análisis de resultados de las comparaciones in-vitro

Se agrupan las medidas tomadas anteriormente para realizar un análisis más fácil de las mismas.

Medidas	Colado	Fresado	Sinterizado
D ₁	1,458	1,418	1,417
D ₂	0,767	0,766	0,675
D ₃	0,788	0,711	0,731
D ₄	0,681	0,614	0,607

D ₅	0,984	1,609	1,069
D ₆	0,960	1,015	0,966
D ₇	0,623	0,563	0,548
D ₈	0,858	0,896	0,876
D ₉	0,679	0,640	0,623
D ₁₀	0,858	0,851	0,846

Tabla 16. Distancias agrupadas entre distintos puntos de las piezas fabricadas.

Leyenda. Medidas:

1: radio₁ central, 2: radio₂ central, 3: diámetro central, 4: ancho del conector derecho, 5: radio₁ molar, 6: radio₂ molar, 7: ancho del conector izquierdo, 8: radio₁ premolar, 9: radio₂ premolar, 10: ancho del conector derecho₂.

Observamos que las distancias en el fresado y el sinterizado son más o menos similares (a excepción de la medida 5, radio₁ molar), las del colado varían de manera leve, aunque no de manera significativa.

Esto se puede deber a que el fresado y el sinterizado son procesos muy automatizados (a pesar de tener diferentes propiedades, resultados o características), no como ocurre en el proceso de colado.

Y en las imágenes observamos los distintos acabados, en el que claramente observamos que las piezas con menos imperfecciones son los puentes fresados, seguidos de los colados y por último, se observa claramente que la superficie más rugosa e imperfecta es la de los puentes sinterizados.

Aunque no se puede saber con certeza, posiblemente sean mejor los puentes con peor acabado, ya que sobre ellos se pegan las carillas (depende del tipo de pegamento, aunque los hay que requieren superficies lisas).

5.5. Comparación de los modelos a través de un software de Inspección

Para verificar los resultados anteriormente obtenidos y tener otro punto de partida para saber con certeza que proceso de fabricación da mejores resultados a la hora de fabricar prótesis de Cr-Co, se realizó una comparación con el software de inspección GOM Inspect, se trata de un software extra que no está incluido en un programa CAD, por lo que requiere un pago por licencia. También puede utilizarse para realizar comparaciones geométricas.

El funcionamiento del programa es muy intuitivo consiste en importar los dos modelos, el modelo digital original y el fabricado, en formato *.stl*.

Una vez importados se realiza una prealineación para posteriormente alinearlos y que se cree sobre ellos una superposición que permita la comparación. Ver figura 35.

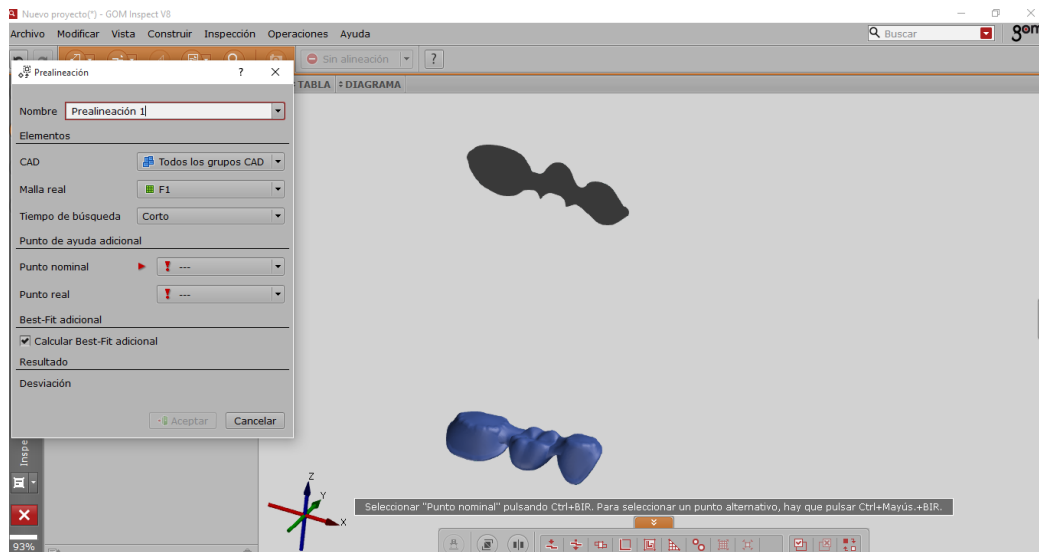


Figura 35. Proceso de prealineación de los modelos digital original y fresado para su comparación con GOM Inspect.

Cuando los cuerpos están prealineados se puede hacer una “comparativa de superficies en CAD” con la que podemos comprobar las desviaciones geométricas existentes en las mismas, esto se puede observar en la figura 36.

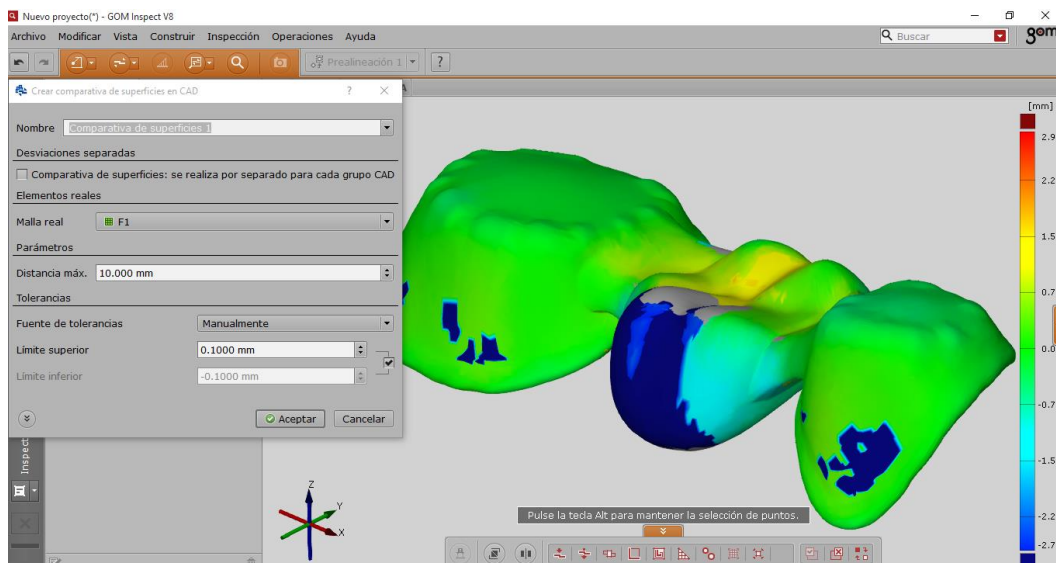


Figura 36. Comparativa de superficies en CAD de los modelos digital original y fresado para su comparación con GOM Inspect.

Tras realizar este sencillo proceso podemos extraer un informe con los resultados obtenidos y poder estudiar cómo se ha desviado el puente fabricado del original y poder determinar de una manera sencilla que proceso es mejor para su fabricación.

Dicho esto, se procede a realizar el procedimiento anteriormente descrito para los tres puentes fabricados: sinterizado, colado y fresado, y así poder comparar los resultados

de la comparación con el software GOM Inspect con los resultados de la comparación con el programa de CAD.

Los resultados de las comparaciones vienen recogidos en las siguientes figuras 37, 38 y 39 correspondientes a los procesos colado, fresado y sinterizado respectivamente.

Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo colado (I).

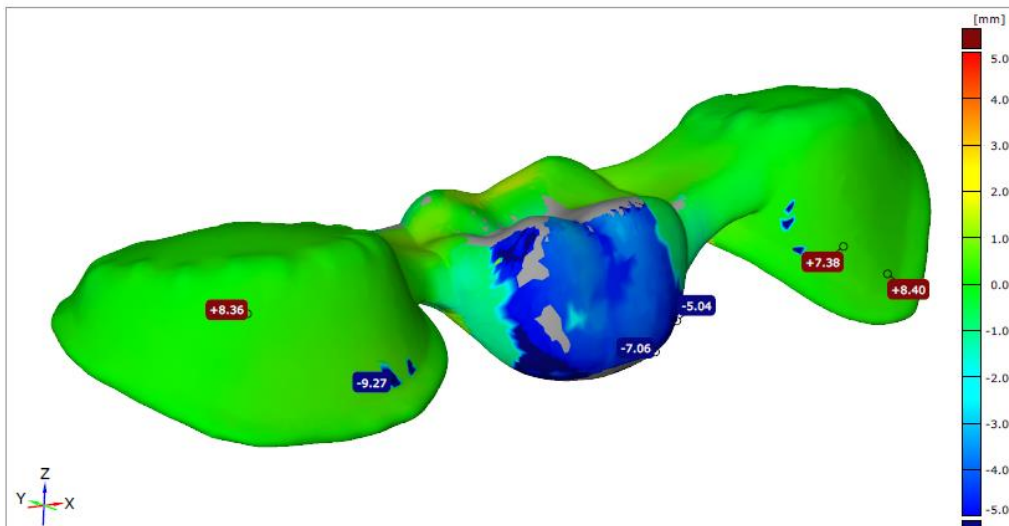


Figura 37. Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo colado.

En la Figura 37 se observa como el valor más crítico se da en la parte exterior de la cavidad del molar (+9,27), es importante decir que las desviaciones en la pieza central o postizo, mostradas en azul, no son importantes.

Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo fresado (I).

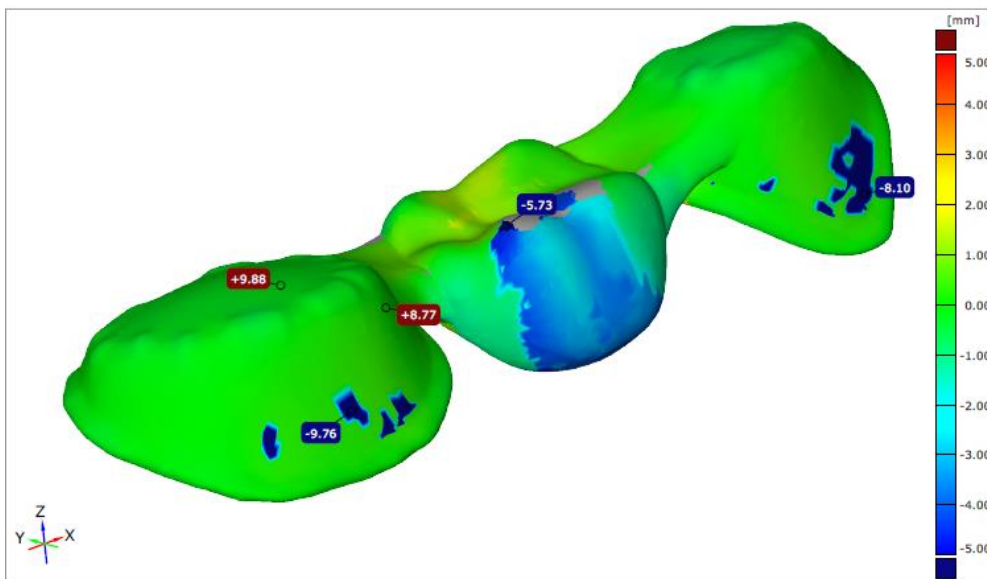


Figura 38. Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo fresado.

En cuanto a la figura anterior (figura 38) podemos observar que los valores más críticos también se dan en el molar, pero en este caso tanto en la parte interna como externa del mismo(+9,88 y -9,76).

Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo sinterizado (I).

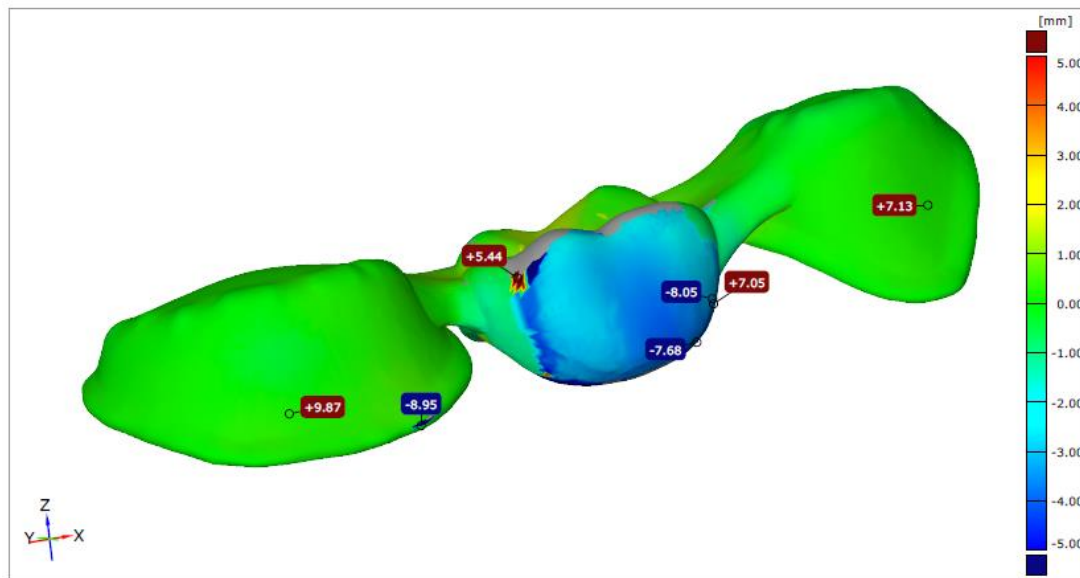


Figura 39. Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo sinterizado.

Y por último en la figura de la comparación con el modelo sinterizado, Figura 39, se observa como la parte más crítica o con más desviación es la parte interna de la cavidad del molar (+9,87), se puede decir que esta parte es una de las zonas más interesantes, ya que apoyarán sobre los muñones y las diferencias afectan al montaje.

5.5.1. Análisis de resultados y balance entre procesos comparativos.

Tras realizar las comparaciones de todos los puentes fabricados con el original, con el software de inspección GOM Inspect.

Podemos observar que los valores de las desviaciones son muy similares entre los distintos procesos, destacando que el puente fresado ofrece menos desviaciones en el muñón del premolar que el de colada o sinterizado, esto coincide con los resultados obtenidos durante el proceso de comparación mediante CAD.

La tendencia de los puentes en general, es exceso, como se puede observar en las imágenes (*en el documento anexo con mayor exactitud*) ya que los valores positivos son más elevados que los negativos, generando los puntos de desviación más elevados en: +9,87 en el modelo sinterizado, +9,88 en el modelo fresado y -9,27 en el modelo colado, este último difiere del resto, la tendencia es por defecto.

Existen numerosas ventajas por utilizar softwares específicos de inspección como, por ejemplo, se pueden hacer comparaciones dejando la referencia en la cavidad que se considere importante, de tal manera que todos los resultados se referencian a ella,

pudiendo elegir el mejor o utilizar el resultado del análisis GOM como plantilla para retirar material (donde se pueda) y ajustarlo al paciente...

Para observar los resultados de la comparativa de GOM Inspect de una manera más completa ver el anexo *“Informe con comparaciones entre el modelo original y el fabricado por cada uno de los procesos, realizado con el programa de inspección y medida GOM Inspect”*.

6. Proceso de ajuste para puentes de tres o más apoyos

Identifica la necesidad de facilitar la implantación de prótesis dentales en pacientes, se ha desarrollado un procedimiento para ayudar al dentista o encargado de realizar dicha implantación. Este algoritmo, basado en pequeños y sencillos pasos que calculará las distancias entre las que se encuentran los centros de los distintos apoyos de los puentes dentales, para que se pueda decidir sobre que dientes apretará el odontólogo durante el proceso de montaje y ajuste en la boca del paciente, facilitando la labor y ganando en precisión y costes (GUIADO EN EL ENSAMBLAJE IN-VIVO). Debe recordarse que el tiempo para realizar el montaje queda definido por la velocidad de curado del pegamento, se manejan valores de segundos o muy pocos minutos.

Para la obtención del procedimiento se ha realizado un estudio manejando distintos puntos de apoyos, distinto número y distinta posición de los mismos.

Para el caso de uno o dos apoyos se presiona directamente sobre las piezas de apoyo, pero cuando existen 3 o más apoyos, como podemos observar en la Figura 40, necesitamos saber cuáles son los apoyos sobre los que se debe presionar para realizar el ajuste de manera más óptima (con menos holguras), evitando que se levante el puente (éste es un elemento rígido).

La utilización del procedimiento sobre los modelos 3D puede servir para evitar operaciones de re-mecanizado, o para realizarlas con el menor impacto y mejor ajuste posible, para validar el ajuste deseado o incluso para minimizar gastos de pegamento, entre otras utilidades.

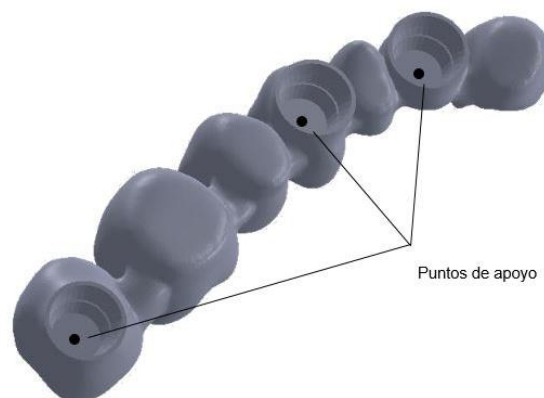


Figura 40. Puntos de apoyo para un puente con tres superficies de apoyo.

Utilizar los centros de mínimos cuadrados de los apoyos es una forma simplificada para manejar el proceso de ensamblado de una manera fácil. Por supuesto, cualquier simplificación aumenta el error si lo comparamos con un ajuste exhaustivo en el que se maneja toda la información disponible, pero recordemos que una de las máximas que se busca es minimizar el tiempo y la facilidad de ejecución.

El ajuste resultante entre el diente y el apoyo determina el “marginal fit” que quedará. La situación ideal sería un “marginal fit” de cero (ajuste completo y total), pero esta situación no es posible, sobre todo si intervienen distintos apoyos ya que al ser estructuras rígidas la mejora del ajuste de uno repercute en los otros. Sin embargo, partiendo de esa situación ideal y simplificando la representación de cada “marginal fit” a su punto más representativo, el centro de mínimos cuadrados, se busca mejorar el ajuste final de la estructura considerando todos los apoyos.

El apoyo de la estructura con los muñones (naturales o implantados) en la boca del paciente debería ser en el marginal fit, ya que la cavidad entre el muñón y la prótesis irá rellena de pegamento. Situación que confirma que el marginal fit sigue representando el mejor estimador del ajuste global. Aunque podamos encontrar casos que, posiblemente por una mala construcción de la prótesis, el ajuste quede limitado por una zonal de contacto diferente a la del marginal fit, por ejemplo que contacte la cúpula del muñón antes del cierre por el marginal fit.

6.1. Ajuste para puentes de tres apoyos

Cuando hay 3 puntos, tiene que haber un apoyo isostático para asegurarnos el correcto ajuste de los puentes.

Un apoyo hiperestático está asegurado cuando los puntos de apoyo se encuentran en el mismo plano o recta, entonces podemos decir que al igual que en el caso de dos apoyos, en el de tres necesitamos apoyarnos en todos los puntos, sino un muñón quedaría separado en el eje “Z”.

Es decir, si nos apoyamos solamente en dos puntos, el tercero quedaría levantado o desviado tal y como se muestra en la imagen. (Figura 41).

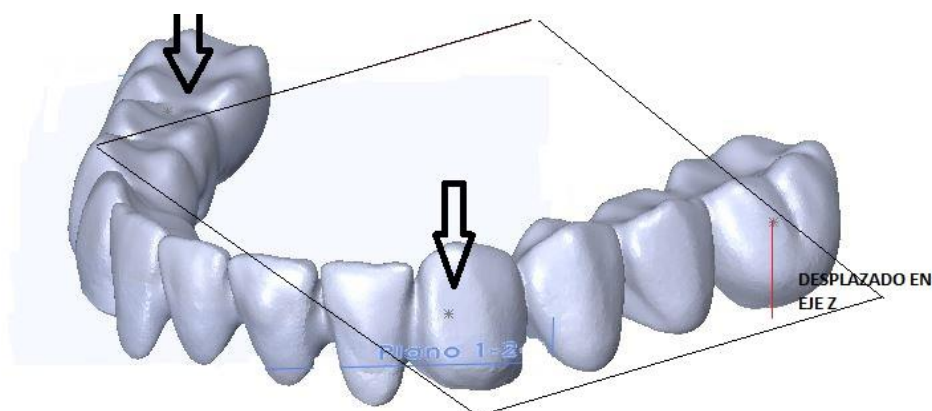


Figura 41. Prótesis dental con tres apoyos apoyada solamente en dos.

En este caso sólo hay una posibilidad que es utilizar los tres puntos de apoyo para el montaje. La estructura es isostática, ofrece sólo una solución.

6.2. Ajuste para puentes con más de tres apoyos

Cuando tenemos más de tres puntos de apoyo no en línea, como por ejemplo un arco dental completo, se procede construyendo un plano de mínimos cuadrados.

Se realizan los siguientes pasos:

- Se calculan los centros de mínimos cuadrados de todos los apoyos, seleccionando un número significativo de puntos del contorno del mismo apoyo.
- De forma iterativa, se seleccionan tres centros de mínimos cuadrados y se construye el plano que pase por ellos, puede llamarse P3. A continuación, se calculan las distancias de los otros centros de mínimos cuadrados al plano P3.
- Las distancias se calcularán creando un sistema de coordenadas que contenga al plano P3 y su eje "z" sea la normal a ese plano, teniendo en cuenta siempre la misma dirección de proyección del eje. Este proceso es para determinar el signo de la distancia.
- Se repite el paso anterior calculando un nuevo P3 tomando una nueva combinación de tres centros de mínimos cuadrados no considerada. Se calculan de nuevo las distancias del resto de centros con el nuevo P3. Esto se hará hasta que no quede una agrupación de tres centros para calcular a P3 que no haya sido usada.
- Se selecciona como puntos de apoyo, para ejercer presión en el ensamblaje a los tres cuyo plano P3 haga mínimas las distancias del resto de centros de mínimos cuadrados con él.

Al ser la prótesis dental una estructura rígida, no es una mala aproximación considerarla como un plano con el número mínimo de apoyos para que sea isostático, tres.

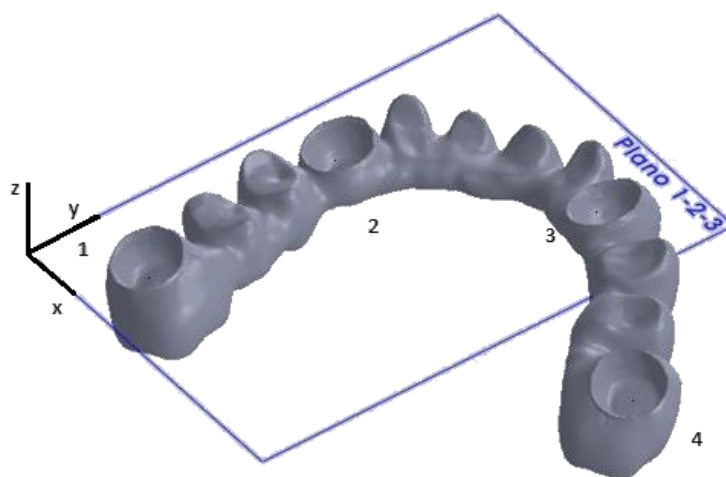


Figura 42. Plano de mínimos cuadrados en un arco dental completo con cuatro apoyos

Finalmente debemos tener muy en cuenta el signo del valor “Z”, distancia, ya que es muy importante a la hora de saber elegir sobre que tres puntos apoyarnos.

A su vez, el proceso de elección es distinto para muñones artificiales (como es el de este caso) o el de muñones naturales, ya que el signo indica si nos desviamos hacia arriba (z-) por lo que la superficie queda holgada o si nos desviamos hacia abajo (z+) por lo que la superficie quedaría apretada.

Un ejemplo de la explicación del párrafo anterior, es que si tenemos un punto o muñón que difiere del plano de mínimos cuadrados (resto de muñones de ajuste) con una z+, para un ajuste óptimo habría que eliminar material del muñón restante, ya sea limando, si es natural o sustituyéndolo por uno artificial con una z más cercana a 0 (valor óptimo).

A la hora de ajustar toda la estructura, se puede distinguir entre dos tipos de muñones.

- **Artificiales:** pueden ser disminuidos y aumentados, es decir, podemos tratar tanto los que tengan valores de distancias positivos (disminuyendo o metiendo una prótesis más pequeña) como valores negativos (aumentando o metiendo una prótesis más grande). Ver figura 43.



Figura 43. Ejemplo de muñones artificiales.

- **Naturales:** solamente pueden ser disminuidos limando los muñones, es decir, sólo se pueden tratar aquellas distancias que tengan valores positivos.

Un ejemplo de ajuste puede ser el siguiente: tenemos cuatro apoyos, con tres muñones naturales y uno artificial y aplicando el algoritmo que hemos desarrollado resulta más óptimo apoyarse en los tres naturales, pero si cambiamos el artificial por otro con diferente altura nos aparece otra solución en la que utilizando el nuevo artificial y dos de los naturales las distancias se ven reducidas.

Por consiguiente, en función de los valores de las distancias y la facilidad de cambio de lo existente se puede lograr un mejor ajuste.

6.3. Comprobación del proceso de ajuste

Para el proceso de ajuste, en primera instancia tenemos que contar con los modelos “.stl” de los puentes que queremos ajustar, estos modelos “.stl” se convierten en sólido de manera similar a los puentes regenerados en el proceso de comparación, es decir, mediante el módulo de regeneración de operaciones o creación de operaciones de Solidworks (ver Figura 44).



Figura 44. Arco dental completo regenerado en Solidworks.

Esta conversión de “.stl” en sólido es necesaria, ya que necesitamos poder manipular la figura del puente desde un CAD para poder seleccionar los puntos de apoyo de cada una de las superficies implicadas.

En ocasiones el módulo de regeneración de Solidworks no puede reconocer el conjunto de superficies o sólidos porque tiene demasiadas superficies, como vemos en la figura 45, y tenemos que abrirlo como conjunto de gráficos, de esa manera no podremos seleccionar directamente los puntos de apoyo sobre la propia superficie del puente.

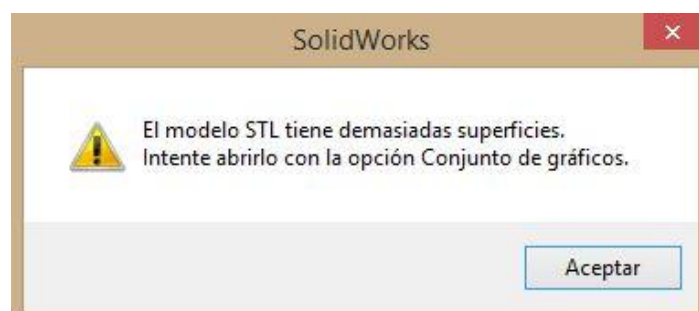


Figura 45. Advertencia de Solidworks para la conversión de “.stl” en sólido o superficie

Esto es debido a que el archivo “.stl” está dañado o que simplemente las superficies extraídas del proceso de impresión necesitan ser “limpiadas” (eliminar los puntos erróneos o superficies extrañas en el archivo escaneado, producidos en el proceso de digitalizado de la pieza) por un programa como MagicCAD o similares que estén diseñados para el tratamiento de superficies.

Si aun así no podemos realizar la importación como conjunto de superficies sino como conjunto de datos, para poder realizar el proceso de ajuste, tenemos que crear unos planos auxiliares (Figura 46) que sean secantes con la superficie del puente en la que se sitúan los diversos puntos de apoyo, para poder proyectar sobre ellos dichos puntos sin ningún problema y calcular las distancias en Z de los puntos.

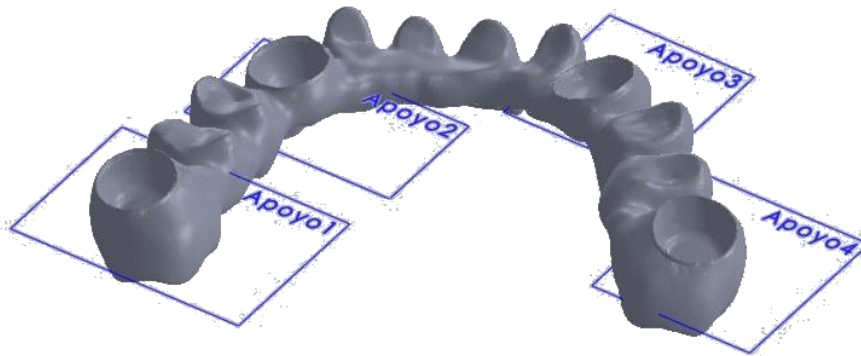


Figura 46. Planos auxiliares para la proyección de los centros de apoyo.

Posteriormente, se realiza una proyección del “marginal fit” de todos los dientes de apoyo sobre un plano creado paralelo a la base del puente, para calcular sobre dichas proyecciones las distancias de los distintos centros de mínimos cuadrados.



Figura 47. Marginal fit proyectado sobre un plano en planta.

Se calcula con la ayuda de Excel el centro de mínimos cuadrados (L_s) para cada uno de los apoyos que dispone el puente dental, para calcular dichos centros se tienen que seleccionar un número significativo de puntos de la superficie de la proyección de cada apoyo (cuantos más puntos se seleccionen más precisa será la comprobación del ajuste).

Una vez creado los centros, con un algoritmo realizado en Excel o incluso con la ayuda del programa de CAD (en este caso, Solidworks) se calculan las distintas distancias entre dichos centros y el plano P3 para comparar resultados.

6.4. Ejemplos de ajustes

6.4.1. Ajuste de un arco completo con cuatro apoyos

Se realiza el proceso definido anteriormente para un puente con un número de más de tres apoyos, en este caso un arco completo con cuatro apoyos, que sería el caso más sencillo (Figura 48). En este caso todos los apoyos son artificiales, con lo cual el procedimiento se ajusta más a la realidad ya que se tienen menos irregularidades en las aristas límite que definen los "marginal fit".

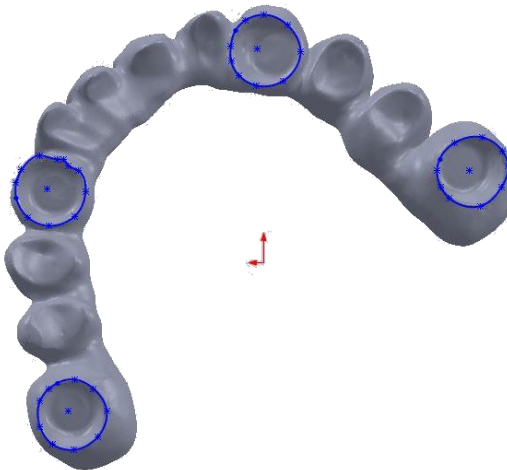


Figura 48. Arco dental completo con cuatro apoyos.

Para realizar el ajuste hemos seleccionado diez puntos de la superficie de cada apoyo para calcular el centro de cada uno de ellos, aunque se podrían seleccionar un número menor de puntos para agilizar y acelerar el proceso, pero el resultado sería menos preciso. En cualquier caso, los puntos deben estar repartidos y ser lo más significativos posibles (que representen todas las variaciones geométricas del contorno).

En la Figura 49 pueden verse los puntos seleccionados en cada apoyo (asteriscos). Se ha dejado indicado el perfil continuo de cada apoyo.

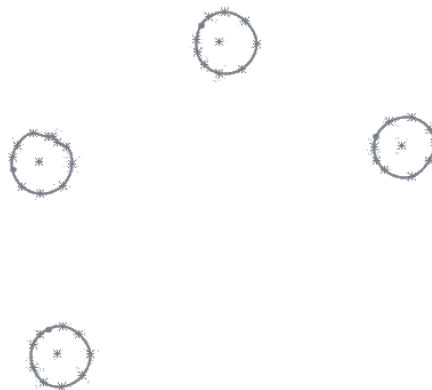


Figura 49. Puntos seleccionados para calcular los centros de mínimos cuadrados (CMC).

Esta operación es necesaria para calcular las coordenadas del centro de mínimos cuadrados o centro de apoyo, si el Solidworks no nos reconoce las superficies y no consigue transformarnos el archivo escaneado en sólido (solo lo transforma en datos) tenemos que crear los planos auxiliares que hemos comentado en el punto anterior y ver la distancia de dichos planos al plano auxiliar del “marginal fit” proyectado, tanto como si SolidWorks nos permite construir el sólido o no, el resultado de este proceso para hallar la altura lo podemos observar en la figura 50.

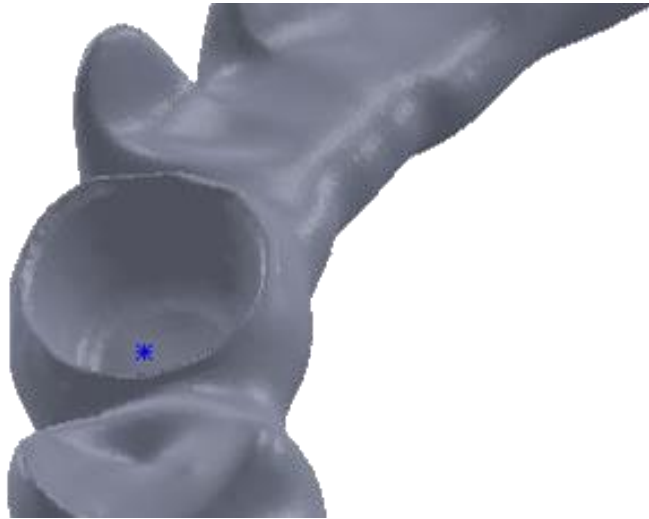


Figura 50. Punto de la coordenada z de un centro de apoyo.

No es importante la localización y orientación del sistema de coordenadas usado, puesto que solo nos servirá como referencia, dicho esto, tomamos el sistema de coordenadas por defecto del CAD.

A partir de estas coordenadas y con ayuda de Excel se calcula la posición del punto medio. (CMC). Estos valores se recogen a continuación en la tabla 17.

	X	Y	Z
Apoyo 1	19,6169	-11,50577	
	17,97725	-11,1471	
	16,18393	-12,0181	
	14,9030	-14,1701	
	15,72279	-16,5783	
	18,07973	-17,8592	
	20,078	-17,34687	
	21,25647	-15,65602	
	21,25647	-13,19661	
	20,40009	-12,03253	
CMC1	18,5475	-14,1511	91,6157
Apoyo 2	23,5263	6,13566	
	23,5263	7,56474	
	23,02208	8,8081	

	21,25647	10,16948	
	19,03867	9,7661	
	17,57641	8,70722	
	16,92092	6,74073	
	17,97725	4,37086	
	20,40009	3,46325	
	22,417	4,27001	
CMC2	20,5661	6,9996	95,8765
Apoyo 3	2,6873	22,03507	
	1,76405	23,00971	
	0	23,5771	
	-2,29443	22,56884	
	-3,53988	20,01864	
	-1,87855	17,26083	
	0,63192	16,8178	
	2,30556	17,75307	
	3,07266	19,149	
	3,09315	20,60811	
CMC3	0,5842	20,2798	98,7213
Apoyo 4	-16,7481	9,7661	
	-18,2295	11,3945	
	-20,7934	11,9073	
	-22,7876	10,5399	
	-23,3004	9,2115	
	-22,6736	7,1782	
	-20,6795	5,3550	
	-17,6597	6,1357	
	-16,8635	7,1782	
	-16,5201	8,7072	
CMC4	-19,6255	8,7374	97,6211

Tabla 17. Coordenadas de los puntos seleccionados y de los centros calculados.

Finalmente y a partir de los centros de mínimos cuadrados calculados, se obtienen los distintos planos de mínimos cuadrados, a partir de tres puntos de los centros.

En la figura 51 podemos observar uno de los planos resultantes de los centros de mínimos cuadrados, en este caso el de los puntos 1, 2 y 3, y su eje de coordenadas con la "z" normal al plano con el que determinaremos la distancia y el signo de la distancia resultante al otro punto.

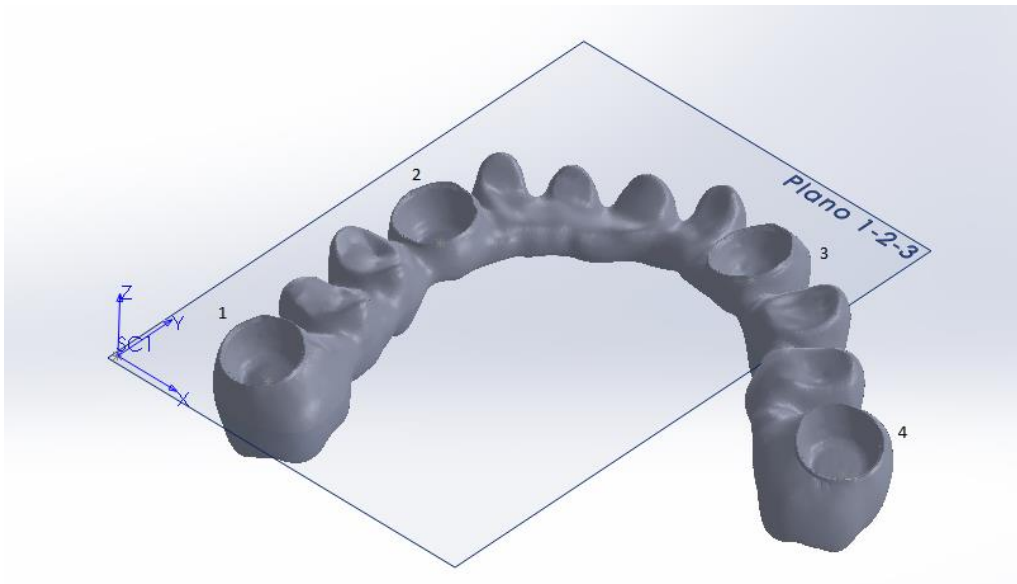


Figura 51. Plano de mínimos cuadrados a partir de los centros de mínimos cuadrados 1,2 y 3.

Las distancias pueden ser calculadas a través de un algoritmo matemático diseñado en Excel, en el que se colocan las distintas coordenadas calculadas anteriormente, con el módulo de mediciones de un programa CAD, en este caso Solidworks.

Solidworks nos permite calcular las distancias normales de un punto respecto a un plano, eligiendo el sistema de coordenadas de referencia que queramos. Siguiendo con el ejemplo, seleccionando el punto "4" sobre el "plano 1-2-3" y el sistema de coordenadas con X e Y perteneciente a dicho plano y Z normal al plano, obtenemos la distancia correspondiente tal y como vemos en la figura 52.

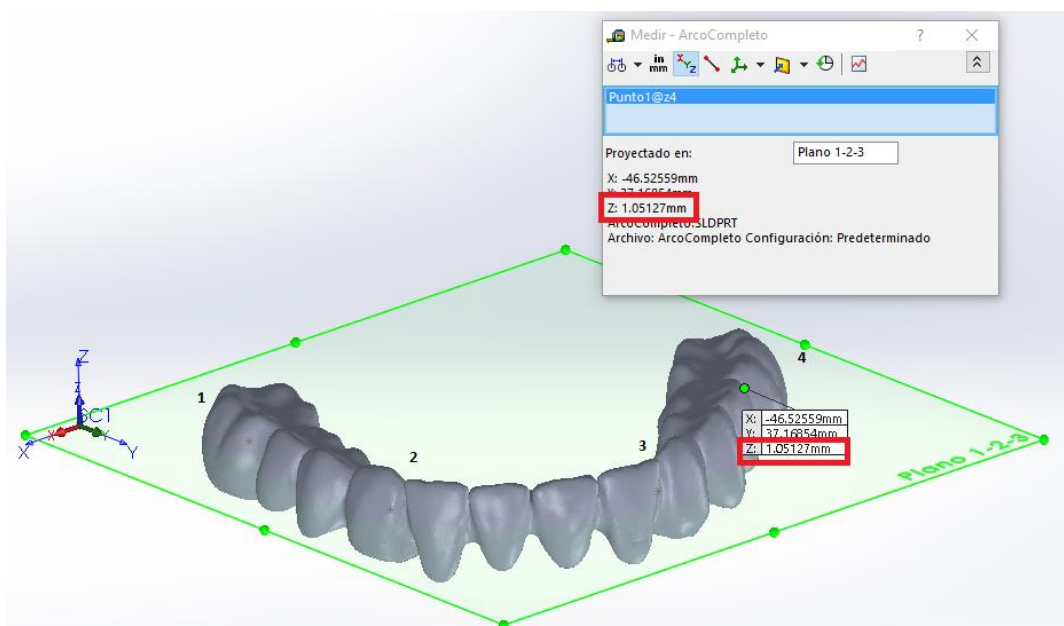


Figura 52. Distancia calculada con el módulo de mediciones de Solidworks

Y repitiendo este proceso sucesivamente, obtenemos los valores de todas las distancias que vienen recogidos en la tabla 18:

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
PLANO 1-2-3				1,05127
PLANO 1-2-4			-0,55295	
PLANO 1-3-4		0,52461		
PLANO 2-3-4	-0,95336			

Tabla 18. Distancias entre los distintos planos y el punto restante.

6.4.1.1. Análisis de resultados

El encargado de realizar el montaje de la prótesis debe apoyarse en los tres dientes cuyo plano tenga la distancia más baja al punto del diente de apoyo resultante.

Para observar de una manera más gráfica los resultados obtenidos anteriormente, y poder concluir de una manera más cómoda, se crea el siguiente gráfico que podemos observar en la figura 53.

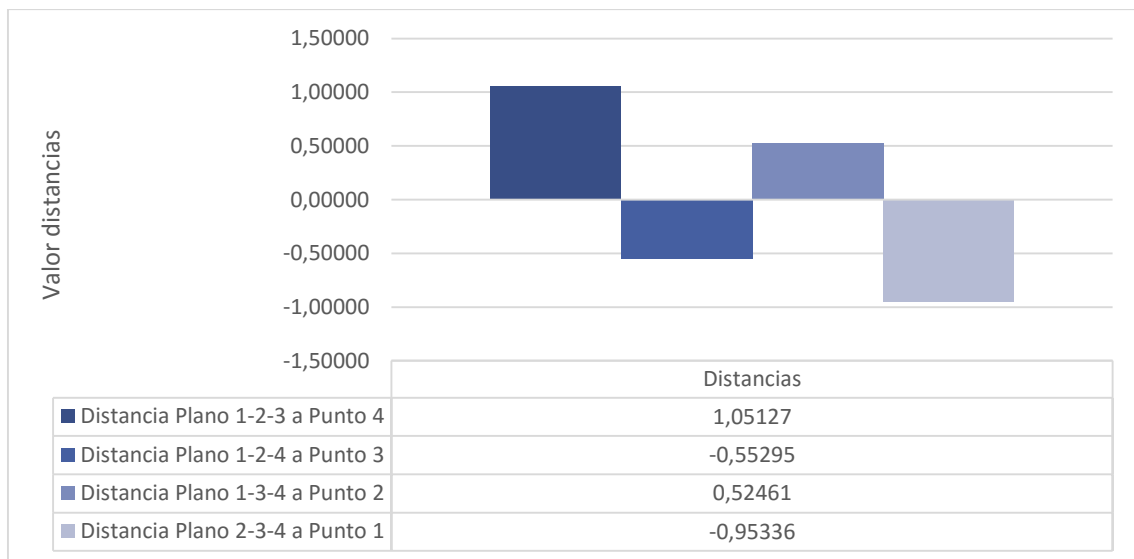


Figura 53. Gráfico de las distancias de los distintos planos a los puntos resultantes.

En este caso, lo primero que hay que tener en cuenta es que se trata de muñones artificiales, por lo que el signo no nos afecta demasiado debido a que, podemos tratar tanto los que tengan valores de distancias positivos (disminuyendo o metiendo una prótesis más pequeña) como valores negativos (aumentando o metiendo una prótesis más grande) (Figura 43), dicho esto podemos señalar que los puntos sobre los que se tiene que apoyar el protésico son los puntos 1, 3 y 4 dejando el punto 2 libre, ya que es el que valor más próximo a cero que nos ofrece (Figura 54).

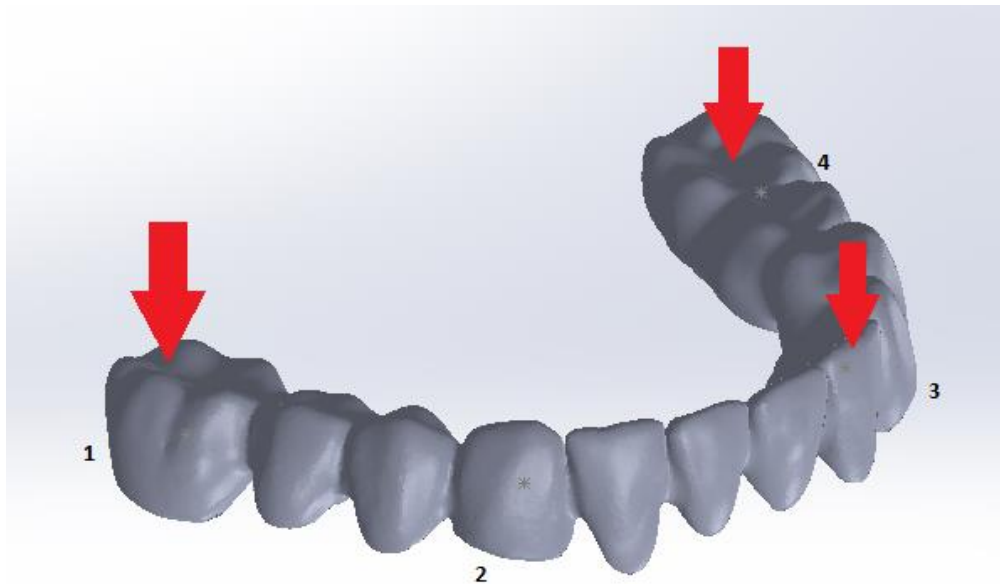


Figura 54. Dientes sobre los que tiene que apretar el protésico.

Este es el caso más sencillo que se puede encontrar, pero tomando esta metodología como proceso de actuación se puede realizar cualquier ajuste, independiente del número de apoyos y realizando el sumatorio de las distintas distancias obtenidas podemos saber cuál es el caso que más favorece al protésico para un ajuste óptimo de los puentes.

6.4.2. Ajuste de un arco completo con seis apoyos.

Como se ha dicho anteriormente, el proceso de ajuste se puede utilizar con cualquier número de apoyos. Para confirmar esta sentencia, en el siguiente ejemplo, vamos a realizar un ajuste para un arco completo con un total de seis apoyos.

El primer paso es seleccionar un número significativo de puntos del contorno en cada uno de los apoyos (seis en este caso) para calcular su centro de mínimos cuadrados. Las coordenadas de estos puntos y el centro de mínimos cuadrados se calculan con la ayuda del soporte CAD y una tabla Excel. El resultado es el mostrado en la tabla 18.

En la figura 55 se pueden ver los centros de mínimos cuadrados, en el programa CAD, calculados y recogidos en la tabla 19 anteriormente citada.

	X	Y
Apoyo 1	63,0607	-13,8015
	57,9471	-15,7201
	54,5593	-18,8470
	54,5593	-21,4043
	55,0432	-22,3719
	55,2517	-24,3007
	58,8446	-24,3072
	65,1342	-19,5381

	64,6296	-17,8842
	64,8194	-15,796
LS 1	59,3849	-19,3971
Apoyo 2	57,9471	-4,9632
	57,6083	-3,1575
	56,4656	-2,0002
	54,5594	-2,2591
	52,555	-4,2634
	50,8962	-4,8163
	49,6521	-7,581
	50,5858	-8,5281
	53,5718	-8,9424
	55,8726	-7,9957
LS 2	53,9714	-5,4507
Apoyo 3	52,0673	4,2498
	50,0668	3,6849
	48,0775	1,1534
	47,5534	0
	47,2987	-1,6298
	48,0775	-2,7611
	49,6521	-3,1575
	52,0673	-2,4991
	54,2695	1,1534
	54,0425	2,598
LS 3	50,3173	0,2792
Apoyo 4	16,8774	2,0114
	14,5535	1,1534
	13,8524	-1,3491
	14,8344	-3,1575
	17,641	-4,8163
	20,5196	-5,35427
	22,0746	-4,8163
	22,29082	-2,7611
	21,464	-1,0331
	19,3282	1,1534
LS 4	18,3436	-1,8969
Apoyo 5	14,7346	-12,8103
	12,566	-12,0562
	9,7107	-12,1259
	8,7552	-13,2756
	8,7015	-14,4469
	10,5937	-16,3643

	14,3336	-17,8102
	16,3764	-17,4666
	17,4812	-16,5662
	16,2954	-13,5387
LS 5	12,9548	-14,6461
Apoyo 6	11,3616	-21,4043
	8,3297	-19,0837
	6,2404	-20,1928
	5,9683	-22,3719
	5,0841	-23,4087
	5,4242	-26,3824
	7,0566	-28,1508
	10,3214	-30,4634
	13,5188	-28,8689
13,8524	-25,4279	
LS 6	8,7158	-24,5755

Tabla 19. Coordenadas de los puntos seleccionados y de los centros calculados.

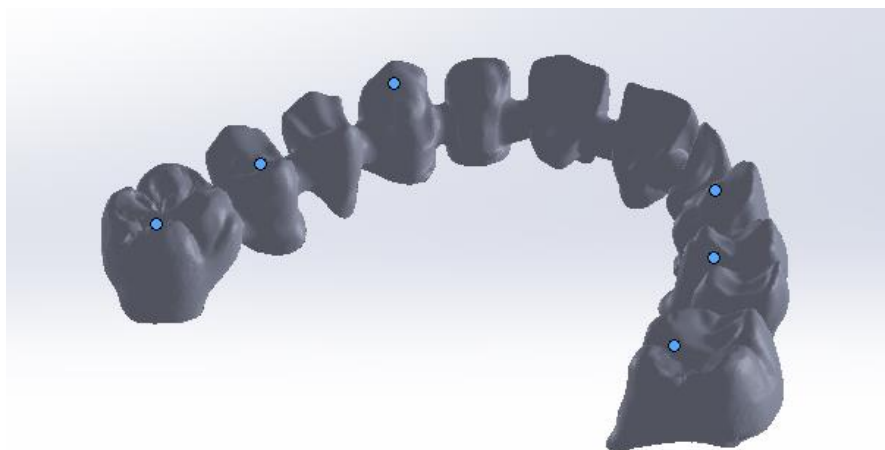


Figura 55. Centros de mínimos cuadrados para el ajuste de un puente con seis apoyos (CMC).

Finalmente y a partir de los centros de mínimos cuadrados obtenidos, se obtienen los distintos planos de mínimos cuadrados y se calculan las diferentes distancias. La Tabla 20 muestra los valores obtenidos (positivos o negativos, dependiendo de la dirección en la que se mide la distancia).

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	Σ	$\Sigma x $
P 1-2-3				-26,811	-37,009	-44,875	-108,695	108,695
P 1-2-4			2,582		-4,859	-8,391	-10,668	15,832
P 1-2-5			2,767	3,772		-2,677	3,862	9,216
P 1-2-6			2,841	5,513	2,266		10,620	10,62
P 1-3-4		-1,917			-2,422	-4,049	-8,388	8,388

P 1-3-5		-1,971		1,804		-1,144	-1,311	4,919
P 1-3-6		-1,991		2,511	0,953		1,473	5,455
P 1-4-5		-3,707	-2,489			0,256	-5,940	6,452
P 1-4-6		-3,604	-2,343		-0,144		-6,091	6,091
P 1-5-6		-3,394	-2,036	0,331			-5,099	5,761
P 2-3-4	6,071				1,445	2,811	10,327	10,327
P 2-3-5	5,989			-1,033		1,045	6,001	8,067
P 2-3-6	5,934			-1,642	-0,854		3,438	8,43
P 2-4-5	4,772		0,603			0,249	5,624	5,624
P 2-4-6	4,643		0,662		-0,141		5,164	5,446
P 2-5-6	4,384		0,791	0,322			5,497	5,497
P 3-4-5	3,844	-0,724				0,251	3,371	4,819
P 3-4-6	3,624	-0,794			-0,141		2,689	4,559
P 3-5-6	3,161	-0,950		0,325			2,536	4,436
P 4-5-6	-43,657	-32,916	-27,621				-104,194	104,194

Tabla 20. Distancias entre los distintos planos y puntos restantes y sumatorios.

6.4.2.1. Análisis de resultados

En este caso, el encargado de colocar la prótesis, al haber más de un punto que queda libre, debe apoyarse en aquellos puntos cuyo plano contenga el valor menor del sumatorio de las distancias al resto de puntos, tomadas en valor absoluto.

Para observar de una manera más gráfica los resultados obtenidos anteriormente y poder concluir de una manera más cómoda, se crean unos minigráficos, en los que podemos observar los valores de las distancias obtenidas de una manera más visual, mostrando los valores de distancias negativos en rojo y los valores positivos en azul (Ver Figura 56).

	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	Σ	$\Sigma x $
P 1-2-3				-26,811	-37,009	-44,875	-108,695	108,695
P 1-2-4			2,582		-4,859	-8,391	-10,668	15,832
P 1-2-5			2,767	3,772		-2,677	3,862	9,216
P 1-2-6			2,841	5,513	2,266		10,620	10,62
P 1-3-4		-1,917			-2,422	-4,049	-8,388	8,388
P 1-3-5		-1,971		1,804		-1,144	-1,311	4,919
P 1-3-6		-1,991		2,511	0,953		1,473	5,455
P 1-4-5		-3,707	-2,489			0,256	-5,940	6,452
P 1-4-6		-3,604	-2,343		-0,144		-6,091	6,091
P 1-5-6		-3,394	-2,036	0,331			-5,099	5,761
P 2-3-4	6,071				1,445	2,811	10,327	10,327
P 2-3-5	5,989			-1,033		1,045	6,001	8,067
P 2-3-6	5,934			-1,642	-0,854		3,438	8,43
P 2-4-5	4,772		0,603			0,249	5,624	5,624

P 2-4-6	4,643		0,662		-0,141		5,164	5,446
P 2-5-6	4,384		0,791	0,322			5,497	5,497
P 3-4-5	3,844	-0,724				0,251	3,371	4,819
P 3-4-6	3,624	-0,794			-0,141		2,689	4,559
P 3-5-6	3,161	-0,950		0,325			2,536	4,436
P 4-5-6	-43,657	-32,916	-27,621				-104,194	104,194

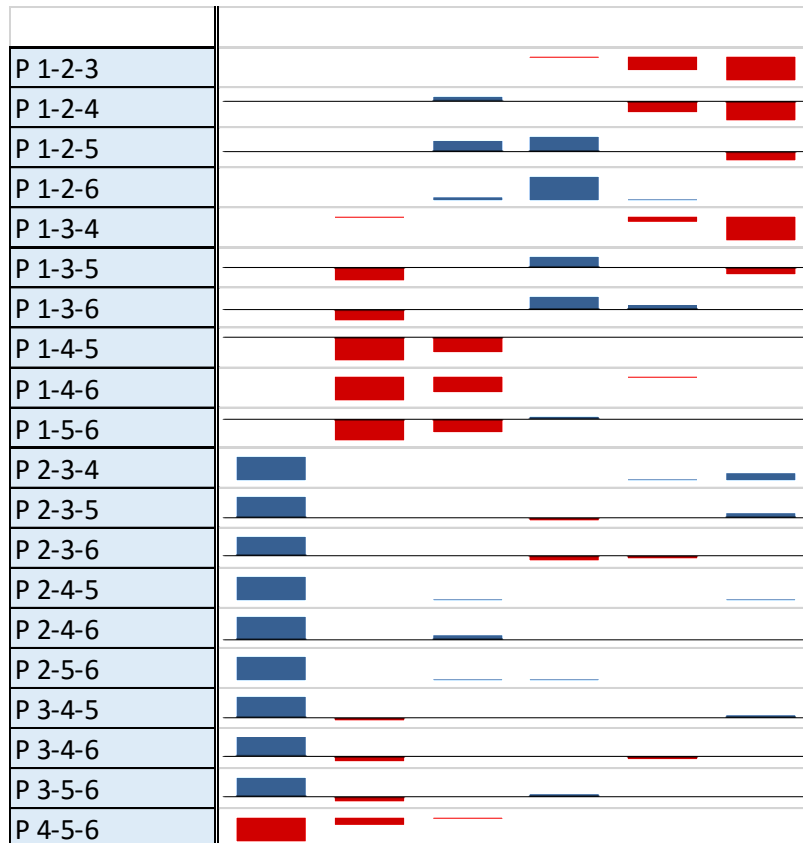


Figura 56. Gráficos de las distancias de los distintos planos a los puntos resultantes.

Para completar el estudio tenemos que contemplar la posibilidad de que se trate de muñones artificiales o naturales.

En el caso de ser muñones artificiales, es decir, no nos importaría el signo de las distancias ya que podemos tratar tanto los que tengan valores de distancias positivos como valores negativos, deberíamos de elegir aquellos puntos en los que su plano tenga el sumatorio de distancias en valor absoluto menor. Observando los sumatorios obtenidos, podemos concluir que el mejor ajuste se realizará si presionamos sobre los puntos que forman el plano 1, 3 y 5 (Ver figura 57).

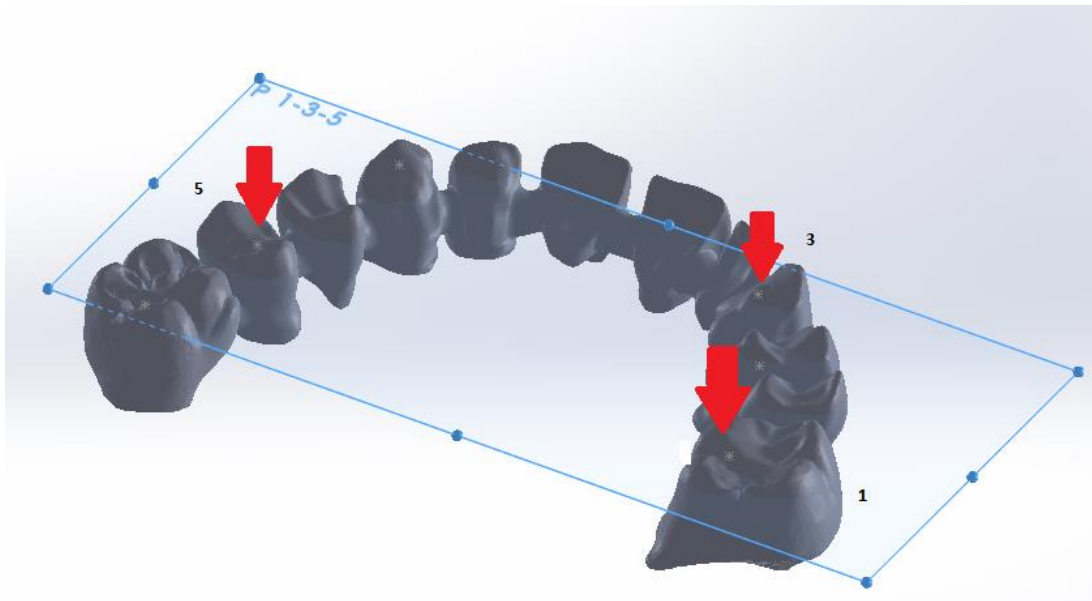


Figura 57. Plano de los tres puntos más favorables para el ajuste en muñones artificiales.

En el caso de que el protésico tuviera que tratar sobre un paciente con muñones naturales, es decir, solo puede tratar sobre valores positivos limando la superficie de los mismos, tenemos que observar las gráficas y los valores resultantes y centrarnos en los planos que tengan distancias resultantes positivas al resto de puntos. Y vemos, tal y como muestra la Figura 58, que el que mejor ajuste en muñones naturales ofrece es aquel en el que se presiona sobre los puntos 2, 5 y 6.

P 2-3-6	5,934			-1,642	-0,854		3,438	8,43
P 2-4-5	4,772		0,603			0,249	5,624	5,624
P 2-4-6	4,643		0,662		-0,141		5,164	5,446
P 2-5-6	4,384		0,791	0,322			5,497	5,497
P 3-4-5	3,844	-0,724				0,251	3,371	4,819
P 3-4-6	3,624	-0,794			-0,141		2,689	4,559

Figura 58. Distancias de los puntos restantes sobre el plano 2-5-6.

Además, podemos observar que el valor más alto se produce sobre el punto 1, es decir, que si el protésico trabaja limando sobre ese punto podemos mejorar mucho más el ajuste.

En modo de conclusión, cabe destacar que este trabajo es el inicio de un proceso de automatización del proceso de selección de puntos de apoyo y de ajuste de las prótesis dentales.

Utilizando como base el procedimiento y los algoritmos desarrollados y ayudándonos de utilidades, como por ejemplo SDK de Solidworks, en el futuro se puede trabajar para que este proceso sea totalmente automatizado.

7. Bibliografía

- Albert Mangas Estany. Impresión 3D en el ámbito de la implantología dental. 2014.
- Anders Örtop, David Jönsson, Alaa Mouhsen y Per Vult von Steyern. The fit of conbal-chromium three-unit fixed dental prostheses fabricated with four different techniques: A comparative in vitro study. Malmö, Suecia. 2010.
- Barbosa. Influence of CAD/CAM on the fit accuracy of implant-supported zirconia and cobalt-chromium fixed dental prostheses. Brasil. 2015.
- Daniel Oltra Cervera. Dos tecnologías a elegir en implantología: aditiva o sustractiva. Maquinser. 2013.
- Danilo Gonzaga B. de Franca, Maria Helena S.T. Morais, Flavio D.das Neves y Gustavo A.S.
- Dimorvan Bordin, Indira M.G. Cavalcanti, Marcele Jardim Pimentel, Carlos A. Fortula, Bruno S. Sotto-Maior, Altair A. Del Bel Cury, Wander José da Silva. Biofilm and saliva affect the biomechanical behavior of dental implants. April 13, 2015 Volume 48, Issue 6, Pages 997–1002.
- Dr. Vojislav Petrović. Fabricación aditiva: presente y futuro de los implantes biomédicos. Aimme. 2013.
- Emre Bayramoglu, Yasemin Kulak Özkan y Coskun Yildiz. Compararision of marginal and internal fit of press-on-metal and conventional ceramic systems for three-and four- unit implant-supported partial fixed dental prostheses: An in vitro study. University of Marmara, Istambul, Turquía. 2015.
- Florian Beuer, Natalie Korczynski, Antonia Rezac, Michael Naumann, Wolfgang Gernet, John A. Sorensen. Marginal and internal fit of zirconia boxed fixed dental prostheses fabricated with different concepts. Oregon, USA. Febrero 2010.
- Heike Rudolph, Ralph G. Luthardt, Michael H. Walter. Computer-aided analysis of the influence of digitilizing and surfacing on the accuracy in dental CAD/CAM technology. Dresden, Alemania. Mayo 2006.
- Istabrak Hasan, Bettina Röger, Friedhelm Heinemann, Ludger Keilig. Influence of abutment design on the success of dental implants. 2012. Volume 45, Supplement 1, Page S175.
- José Antonio Rodríguez Cortés, Luis Ignacio Suárez Ríos. Tecnologías avanzadas de fabricación para el sector dental. 2014.
- Ki-Baek Kim, Woong-Chul Kim, Hae-Young Kim, Ji-Hwan Kim. An evaluation of marginal fit of three-unit fixed dental prostheses fabricated by direct metal laser sintering system. Republica de Korea. Abril 2013.
- Marc Fernández, Luis Delgado, Meritxell Molmeneu, David García y Daniel Rodríguez. Analysis of the misfit of dental implant-supported prstheses made with three manufacturing processes. Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain. 2014.
- Mariano Jiménez Calzado, Adrián Hernández Gutiérrez, David Fraiz Cosano. Mecanizado de estructuras dentales. 2013.

- Markus B. Blatz, Joannis Katsoulis, Regina Mericske-Stern, Philipp Muller. CAD/CAM fabrication accuracy of long- vs. short-span implant-supported FDPs. Berna (Suiza). Octubre 2014.
- Örtorp, D. Jönsson, A. Mouhsen, P. V. Steyern. The fit of cobalt–chromium three-unit fixed dental prostheses fabricated with four different techniques: A comparative in vitro study. *Dental Materials*, 27 (2011), pp. 356-363.
- Pablo G. Cogolludo, María Jesús Suarez, Benjamín Serrano, José F.L. Lozano. Influencia de la técnica de colado en el ajuste marginal de restauraciones en prótesis fija. Universidad Complutense de Madrid. 2012.
- Per Svanborg, Henrik-Skjerven, Pablo Carlsson, Alf Eliasson, Stig Karlsson y Anders Örtorp. Marginal and internal fit of Cobalt-Chromium fixed dental prostheses generated from digital and conventional impressions. Gothenburg, Suecia, Marzo 2014.
- Raquel Castillo de Oyagüe. Ajuste de estructuras coladas para prótesis fija sobre pilares prefabricados de implantes dentales. Madrid 2004; 84-669-2619-4
- S.C. Gutiérrez, M.D. Meseguer, J. Bellera, F. Folguera. Análisis de la variabilidad en la fabricación de puentes de Cr-Co mediante comparación geométrica. Zaragoza 2013.
- Salido MP, Suárez MJ, Pradies GJ, Caruana G. Análisis comparativo del ajuste marginal en coronas cerámicas. *Rev Int Prot Estomatol* 2000; 2: 225-32.
- Yilmaz H, Demirel E, Diçer C, Päßler K, Bek B. Estudio comparativo de técnicas de ensamblaje con titanio colado y dos aleaciones dentales de metales no nobles. *Quintessence técnica (ed. esp.)* 2000; 11: 57-62.

8. Anexos

- Anexo I. Documento Excel con el algoritmo para el cálculo del ajuste óptimo para una prótesis dental con 4 apoyos.
- Anexo II. Documento Excel con el algoritmo para el cálculo del ajuste óptimo para una prótesis dental con 6 apoyos.
- Anexo III. Informe con comparaciones entre el modelo original y el fabricado por cada uno de los procesos, realizado con el programa de comparaciones ingenieriles GOM Inspect.

9. Documentos de síntesis

9.1. Figuras

Figura 1. Vista frontal del “marginal fit” de un puente dental.	2
Figura 2. Modelo de escayola fabricado a partir de la impresión dental.	5
Figura 3. Escáner Ceratomic DS-900, especializado en digitalización dental.	5
Figura 4. Modelo digital de la base, donde se aprecian los dos muñones naturales ya preparados por el especialista.	5
Figura 5. Modelo digital original, utilizado para fabricar los puentes.	6
Figura 6. (a) Puente de Cr-Co obtenido por colada, (b) por fresado y (c) por sinterizado selectivo por láser.	6

Figura 7. Luz blanca estructurada utilizada por el escáner para hacer la recolección de datos.....	7
Figura 8. Modelo digital del puente original.	8
Figura 9. Plano de corte utilizado para lograr el posicionamiento del modelo digital original.....	8
Figura 10. Modelo digital del puente fabricado.	9
Figura 11. Ensamblaje final del modelo digital original, modelo digital fabricado y modelo digital de la base.	9
Figura 12. Plano molar y premolar.....	10
Figura 13. Planos de trabajo paralelos a los planos molar y premolar.....	11
Figura 14. Perfil del marginal fit del modelo digital original.	11
Figura 15. Perfil proyectado perteneciente al modelo digital original.	12
Figura 16. Desviaciones, área negativa y positiva.....	12
Figura 17. Distribución en el sistema coordenado.....	13
Figura 18. Área Positiva.....	14
Figura 19. Área negativa.....	14
Figura 20. Algunas desviaciones máximas y mínimas en la comparación entre el modelo digital original y el modelo #1 fabricado por mecanizado CNC.	16
Figura 21. Distribución de las desviaciones lineales máximas en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.	18
Figura 22. Distribución de las desviaciones lineales mínimas en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.	19
Figura 23. Distribución de las desviaciones lineales maximas en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.	19
Figura 24. Distribución de las desviaciones lineales minimas en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.	20
Figura 25. Distribución de las desviaciones lineales medias maximas (1ª y 2ª) en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.	22
Figura 26. Distribución de las desviaciones lineales medias minimas (1ª y 2ª) en los molares según el proceso utilizado en su fabricación.	23
Figura 27. Distribución de los cuadrantes predominantes en cada una de las desviaciones en los molares para cada tipo de fabricación utilizado.	23
Figura 28. Distribución de las desviaciones lineales medias maximas (1ª y 2ª) en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.	25
Figura 29. Distribución de las desviaciones lineales medias minimas (1ª y 2ª) en los premolares según el proceso utilizado en su fabricación.	25
Figura 30. Distribución de los cuadrantes predominantes en cada una de las desviaciones en los premolares para cada tipo de fabricación utilizado.....	26
Figura 31. Lupa electrónica Celestron HDM Pro.	26
Figura 32. Imágenes en perfil y planta de las piezas fabricadas mediante colado para observar aspectos fisicos de las mismas.....	28
Figura 33. Imágenes en perfil y planta de las piezas fabricadas mediante fresado para observar aspectos fisicos de las mismas.....	30
Figura 34. Imágenes en perfil y planta de las piezas fabricadas mediante sinterizado para observar aspectos fisicos de las mismas.	32
Figura 35. Proceso de prealineación de los modelos digital original y fresado para su comparación con GOM Inspect.....	34
Figura 36. Comparativa de superficies en CAD de los modelos digital original y fresado para su comparación con GOM Inspect.	34
Figura 37. Desviaciones criticas entre el modelo original y el modelo colado.	35

Figura 38. Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo fresado.	35
Figura 39. Desviaciones críticas entre el modelo original y el modelo sinterizado.....	36
Figura 40. Puntos de apoyo para un puente con tres superficies de apoyo.	37
Figura 41. Prótesis dental con tres apoyos apoyada solamente en dos.	38
Figura 42. Plano de mínimos cuadrados en un arco dental completo con cuatro apoyos	39
Figura 43. Ejemplo de muñones artificiales.	40
Figura 44. Arco dental completo regenerado en Solidworks.	41
Figura 45. Advertencia de Solidworks para la conversión de “.stl” en solido o superficie	41
Figura 46. Planos auxiliares para la proyección de los centros de apoyo.....	42
Figura 47. Marginal fit proyectado sobre un plano en planta.....	42
Figura 48. Arco dental completo con cuatro apoyos.	43
Figura 49. Puntos seleccionados para calcular los centros de mínimos cuadrados (CMC).....	43
Figura 50. Punto de la coordenada z de un centro de apoyo.	44
Figura 51. Plano de mínimos cuadrados a partir de los centros de mínimos cuadrados 1,2 y 3.....	46
Figura 52. Distancia calculada con el módulo de mediciones de Solidworks	46
Figura 53. Gráfico de las distancias de los distintos planos a los puntos resultantes.	47
Figura 54. Dientes sobre los que tiene que apretar el protésico.	48
Figura 55. Centros de mínimos cuadrados para el ajuste de un puente con seis apoyos (CMC).....	50
Figura 56. Gráficos de las distancias de los distintos planos a los puntos resultantes.	52
Figura 57. Plano de los tres puntos más favorables para el ajuste en muñones artificiales.	53
Figura 58. Distancias de los puntos restantes sobre el plano 2-5-6.....	53

9.2. Tablas

Tabla 1. Áreas de las desviaciones entre el modelo digital original y los modelos fabricados (Unidades en mm ²).....	15
Tabla 2. Valor medio de las desviaciones calculadas por medio de áreas para cada proceso de fabricación (unidades en mm ²).	15
Tabla 3. Desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano molar entre el modelo digital original y los modelos fabricados (unidades en mm).	17
Tabla 4. Desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano premolar entre el modelo digital original y los modelos fabricados (unidades en mm).	17
Tabla 5. Valor medio de las desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano molar y cuadrantes predominantes de las mismas (unidades en mm).	22
Tabla 6. Valor medio de las desviaciones lineales máximas y mínimas en el plano premolar y cuadrantes predominantes de las mismas (unidades en mm).	24
Tabla 7. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante colado (unidades en mm) (I).....	27
Tabla 8. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante colado (unidades en mm) (II).....	27
Tabla 9. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante colado (unidades en mm) (III).....	28

Tabla 10. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante fresado (unidades en mm) (I).....	29
Tabla 11. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante fresado (unidades en mm) (II).....	29
Tabla 12. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante fresado (unidades en mm) (III).....	30
Tabla 13. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante sinterizado (unidades en mm) (I).....	31
Tabla 14. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante sinterizado (unidades en mm) (II).....	31
Tabla 15. Distancias entre distintos puntos de la pieza fabricada mediante sinterizado (unidades en mm) (III).....	32
Tabla 16. Distancias agrupadas entre distintos puntos de las piezas fabricadas.	33
Tabla 17. Coordenadas de los puntos seleccionados y de los centros calculados.....	45
Tabla 18. Distancias entre los distintos planos y el punto restante.	47
Tabla 19. Coordenadas de los puntos seleccionados y de los centros calculados.....	50
Tabla 20. Distancias entre los distintos planos y puntos restantes y sumatorios.....	51