

**DESARROLLO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO DE LA
RECICLABILIDAD DE LOS BRACKETS METÁLICOS USADOS EN
ORTODONCIA**

INGRIT CAROLINA CASTELLANOS CORDERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

**DESARROLLO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO DE LA
RECICLABILIDAD DE LOS BRACKETS METÁLICOS USADOS EN
ORTODONCIA**

INGRIT CAROLINA CASTELLANOS CORDERO

Proyecto de Grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera
Química

Director

Ph.D DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS

Codirector:

M. Sc HUGO ARMANDO ESTUPIÑAN DURÁN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2009

A Dios por ser mi creador y mi guía en todo lo que hago, mil bendiciones.

*A mis padres Faber y Esperanza quienes con toda su dedicación hicieron lo posible
para que hoy en día fuese una mejor persona.*

*A mi nonita Oliva por ser como una segunda madre para mí y ante todo porque sus
buenos consejos han hecho de mí alguien con aspiraciones.*

*A Emel por quien me arriesgue dar el todo por el todo y ha estado ahí siempre firme
en todo y para todo... Je t'aime.*

*A mi Hermano, Tíos, primos y demás familiares porque fueron un apoyo a lo largo
de este proyecto de vida.*

*A todas aquellas personas que conozco, porque en ellas encuentro algo nuevo más para
conocer.*

Muchas Gracias...

Xiki

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER y a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, por ser los entes que financiaron mi proyecto.

Al GRUPO DE INVESTIGACIONES EN CORROSIÓN por permitir que fuese un miembro más de esta familia.

A mi Director DARIO YESID PEÑA, por su gran personalidad, sensatez, sencillez y ejemplo a seguir.

A mi Codirector HUGO ARMANDO ESTUPIÑAN, por brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto y ser un apoyo en lo que necesitaba.

Al Laboratorio de Óptica en Guatiguará y a su Director Arturo Plata.

A las estudiantes de maestría que me extendieron su mano cuando lo necesitaba, en especial, a Nerly Montañez.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1 BRACKETS METÁLICOS.....	2
1.2 PRINCIPALES TÉCNICAS DE RECICLADO DE BRACKETS METÁLICOS	3
1.2.1 Arenado	3
1.2.2 Flameado.....	3
1.3 TÉCNICA EXPERIMENTAL DEL MÉTODO PROPUESTO	4
1.3.1 Decapado	4
1.3.2 Electropulido.....	4
1.3.3 Pasivación	5
1.4 CORROSIÓN EN LOS BRACKETS METÁLICOS.....	6
1.5 ESTUDIO DE LA RECICLABILIDAD DE LOS BRACKETS METÁLICOS	6
2. DISEÑO METODOLÓGICO.....	9
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
2.2 MATERIALES Y EQUIPOS.....	9
2.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	9
2.3.1 Envejecimiento de los brackets	10
2.3.2 Arenado	10
2.3.3 Flameado.....	10
2.3.4 Modelo Experimental Propuesto.....	11
2.3.5 Pruebas de Caracterización	12
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	13
3.1 MICROSCOPIA OPTICA.....	13
3.2 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA	15
3.3 EXTRAPOLACIÓN TAFEL	19
3.4 POLARIZACIÓN CÍCLICA.....	22

4. CONCLUSIONES	25
5. RECOMENDACIONES	26
BIBLIOGRAFÍA.....	27
ANEXOS.....	31
ANEXO A. TÉCNICAS ELECTRÓQUÍMICAS	31
A.1 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA.....	31
A.2 EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL.....	32
A.3 POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA CÍCLICA	33
ANEXO B. FOTOGRAFÍAS Y MICROGRAÍAS DE LOS BRACKETS	35
ANEXO C. DIAGRAMAS DE BODE Y NYQUIST JUNTO CON LA SIMULACIÓN EN Z VIEW.....	39

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Bracket <i>SmartClip</i> ; Compañía: Lancer Praxis Glide 2006. a) Cuerpo; b) Base y c) Límites de grano con Carburos de Cromo en la base.....	2
Figura 2. Proceso de Electropulido	4
Figura 3. Mecanismo del Pulido Electrofítico	5
Figura 4. Diagrama de Flujo del Desarrollo Experimental.....	9
Figura 5. Diseño del montaje realizado para las pruebas electroquímicas.	12
Figura 6. Microfotografías a 20X, Bracket y Probeta a) Nuevo, b) Arenado	15
Figura 7. Diagrama de a) Bode y b) Nyquist para los brackets nuevos junto con la simulación en Zview.....	16
Figura 8. Curvas de Nivel del Bracket Nuevo por medio del Microscopio Interferométrico.....	17
Figura 9. Circuito Equivalente a) I y b) II	18
Figura 10. Curvas de Extrapolación Tafel para: a) Brackets y b) Probetas.....	20
Figura 11. Curvas de Polarización Cíclica de las técnicas de reciclado de brackets metálicos	22
Figura 12. Curvas de Polarización Cíclica de las técnicas de reciclado de las probetas.....	23

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Saliva Afnor	10
Tabla 2. Valores de los parámetros utilizados en el proceso de Electropulido.	11
Tabla 3. Variables de las pruebas electroquímicas	12
Tabla 4. Valores de los elementos usados para los brackets en los Circuitos Equivalentes de la Figura 9	19
Tabla 5. Parámetros calculados a partir de la Extrapolación Tafel.....	21

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. TÉCNICAS ELECTRÓQUÍMICAS	31
ANEXO B. FOTOGRAFIAS Y MICROGRAÍAS DE LOS BRACKETS	35
ANEXO C. DIAGRAMAS DE BODE Y NYQUIST JUNTO CON LA SIMLACIÓN EN Z VIEW	39

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO CONCEPTUAL Y METOLÓGICO DE LA RECICLABILIDAD DE BRACKETS METÁLICOS USADOS EN ORTODONCIA*

AUTOR: Castellanos, Ingrit C.**

PALABRAS CLAVES: Brackets, Reciclo, Técnicas Electroquímicas, Corrosión.

En este trabajo se compararon las propiedades superficiales de brackets ortodóncicos de acero austenítico inoxidable, modificadas por medio de las técnicas comúnmente usadas en su reciclado, específicamente, las técnicas de arenado y flameado. Estas técnicas se compararon con una nueva técnica de modificación superficial conocida como *pulido electrolítico con pasivado*. Por medio de ensayos electroquímicos, tales como, la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), la extrapolación de Tafel y la polarización potenciodinámica cíclica, se evaluaron los procesos de corrosión a los cuales están expuestos estos materiales en la cavidad bucal, que fue simulada en un montaje electrolítico con tres electrodos y un medio fisiológico experimental compuesto por saliva artificial Afnor a una temperatura de 37 °C.

Los resultados obtenidos mostraron que el arenado presentó las mejores características de protección a la corrosión, en comparación con la técnica de pulido electrolítico y pasivado, la cual presentó mejores propiedades, respecto a los brackets flameados, pero no mejores que las que presentó la técnica de arenado en las probetas ensayadas.

Es por eso que el reciclado de brackets metálicos es de interés actual en la ortodoncia a nivel superficial, debido a que existen variables importantes que influyen en la fuerza de adhesión a la dentadura y la liberación de iones hacia el organismo.

* Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniera Química. Modalidad Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Ph.D Darío Yesid Peña Ballesteros

Codirector: M. Sc Hugo Armando Estupiñán Durán

SUMMARY

TITLE: CONCEPTUAL AND METHODOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE RECYCLABILITY OF METALLICS BRACKETS USED IN ORTHODONTICS*

AUTHOR: Castellanos, Ingrid C.**

In the present study the surface qualities of the orthodontic stainless austenitic steel brackets, modified through techniques commonly used in its recycling, specifically, the techniques of sandblasting and direct flaming were compared. These techniques were compared with a new technique of surface modification known as *electropolishing with passivation*. Through electrochemical tests such Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), the extrapolation Tafel and cyclic potentiodynamic polarization, the corrosion processes to which the materials are exposed in the mouth cavity were evaluated. The mouth cavity was simulated through an electrolytic assembly with three electrodes and one experimental physiological medium composed by artificial saliva Afnor at 37 °C.

The results gathered evidenced that the sandblasting produced the best protection qualities towards corrosion in the simulated mouth environment. The electropolishing technique and passivation showed good characteristics in regards to the direct flaming brackets. However, the sandblasting technique showed the best results in the specimen tested.

Based on the facts above mentioned, the recycling of metallic brackets at the surface level is an issue of great importance in the current orthodonty. It is due to the fact that the recycling presents important variables that influence the strength of adhesion to the teeth and the liberation of ions into the body.

* Project Grade to choose for the title of Chemical Engineering. Mode Investigation.

** Faculty of Engineering Physicist-Chemistries. Chemical Engineering's School.

Director: Ph.D Darío Yesid Peña Ballesteros

Codirector: M. Sc Hugo Armando Estupiñán Durán

INTRODUCCIÓN

Los primeros tipos de brackets aparecieron en la década de los 30's, más específicamente en 1935 denominados *Rusell Lock*; sin embargo, sólo hasta los años 70's se empezaron a patentar las diferentes configuraciones existentes con respecto a éstos; haciendo énfasis en la base del bracket, sus aletas y el tipo de ligación. Junto con estas características, el tipo de material utilizado en la fabricación también fue un factor determinante, debido al tipo de ambiente intra-oral a los que son expuestos, es decir, la cavidad oral de los pacientes, por lo que su corrosión y desgaste son inevitables [25].

De otro lado, la caída del bracket durante el tratamiento es un problema eminente para los ortodoncistas, requiriendo un tiempo adicional, un costo por reemplazar los brackets desprendidos, y en algunos casos, la extensión del tiempo del tratamiento. El proceso del reciclado de los brackets nació esencialmente por la necesidad de los pacientes de reducir el costo del tratamiento, ante esto, los especialistas se vieron obligados a buscar métodos por los cuales se mantuviera la misma funcionalidad como si fueran brackets nuevos.

El principal objetivo de su reciclaje, consiste básicamente, en eliminar totalmente la resina del bracket sin debilitar o dañar la base del enmallado, y sin distorsionar las dimensiones de la ranura [17]. Este procedimiento tiene varios efectos entre los cuales se encuentran, la aceleración del proceso de corrosión, la tendencia a la emisión de iones del metal que pueden manchar los dientes, la disminución de la fuerza de adhesión y la capacidad de reciclarse una vez más.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 BRACKETS METÁLICOS

La mayoría de los brackets son fabricados de acero inoxidable austenítico, que forman compuestos de carburo de cromo (Cr_{23}C_6) que precipitan a temperaturas entre los 500°C y los 800°C en los límites de grano según la figura 1. c), esto se debe a que su elaboración se basa en la unión por soldadura de la base y el cuerpo (aletas), que previamente se hacen por fundición.

Los tipos de acero inoxidable comúnmente usados son los AISI SAE 303, 304, 304L, 316, 316L y 317 [2] (American Iron and Steel Institute), basándose en su dureza y su habilidad de resistir las cargas durante el tratamiento sin la deformación, sin embargo, muchos esfuerzos se han realizado en la fabricación para mejorar su apariencia estética, como por ejemplo, hacerlos más pequeños o hacerlos de cerámica y plástico. No obstante, los brackets metálicos realizan su objetivo más cerca de lo ideal que sus colegas los no metálicos. Por consiguiente, el material que parece ser más utilizado es el tipo 316L que tiene una composición nominal de (%wt): 0.017 C, 1,73 Mn, 0.023 P, 0.027 S, 0,065 Si, 17,33 Cr, 13,69 Ni, 2,34 Mo, con el resto que es Fe [3].



Figura 1. Bracket *SmartClip*; Compañía: Lancer Praxis Glide 2006. **a)** Cuerpo; **b)** Base y **c)** Límites de grano con Carburos de Cromo en la base

1.2 PRINCIPALES TÉCNICAS DE RECICLADO DE BRACKETS METÁLICOS

Existen varios factores que pueden contribuir a la posibilidad del desprendimiento de la resina que hay entre el bracket y el diente, entre los cuales se incluye la habilidad del profesional durante el proceso de adhesión, el cuidado del paciente, la calidad del esmalte, la saliva, las características químicas de la resina y el tipo de fabricación (metálica o cerámica) del bracket [1].

A través de la historia se ha visto que los métodos para reciclar brackets metálicos son cada vez más sencillos, menos costosos pero en muchas ocasiones no se obtiene las características deseadas. Los métodos utilizados deben eliminar completamente el material de agente adhesivo sin distorsionar ninguna parte de los componentes del bracket, para lograrlo, se han desarrollado diversos métodos, entre los que se incluye una variedad de métodos mecánicos (Fresas rotatorias o Arenador) y una variedad de métodos térmicos (Flameado o Calentamiento en horno) [21]. A continuación se especifican los más utilizados:

1.2.1 Arenado

El arenado es un procedimiento que consiste en proyectar un fuerte chorro de aire abrasivo (partículas de óxido de aluminio de diferentes tamaños) sobre la superficie que se intenta adherir. El arenado altera la superficie con el objeto de producir efectos favorables para la adhesión como una limpieza profunda, un aumento de la energía superficial y un aumento en el área de adhesión.

1.2.2 Flameado

Consiste en sujetar el bracket cerca a la flama de un mechero de Bunsen o un Soplete (aprox. 1200°C) por 5 segundos con el fin de que el agente adhesivo sea incinerado y quemado en su totalidad. Los restos del material que quedan son prácticamente desprendidos y removidos fácilmente [7].

1.3 TÉCNICA EXPERIMENTAL DEL MÉTODO PROPUESTO

1.3.1 Decapado

El decapado es una práctica clínica de ortodoncia contemporánea, que consta de una solución acuosa (comúnmente ácido fosfórico al 37%), generalmente utilizada como agente para el acondicionamiento del esmalte antes de adherir el bracket [8] y para eliminar los restos de resina después de haberlo unido. Si bien cumple con las anteriores funciones, puede además ser un disolvente de la resina adhesiva del bracket cuando se desprenda.

1.3.2 Electropulido

El electropulido fue desarrollado por Pierre Jacquet en Francia en el año de 1929, y sólo 6 años más tarde, se hicieron las primeras aplicaciones satisfactorias. El Pulido Electrolítico, o Electropulido no ha sido un mecanismo universalmente aplicable, debido a sus múltiples variables a controlar. Este consiste en un tratamiento superficial, mediante el cual la pieza de trabajo actúa como ánodo en una celda electrolítica, de acuerdo a la figura 2, formándose una capa viscosa, producida por la reacción entre el metal y el electrolito (fluido ácido viscoso, con uno o más iones de radicales largos, como PO^{3-} , SO^{4-} o ClO^{1-}).

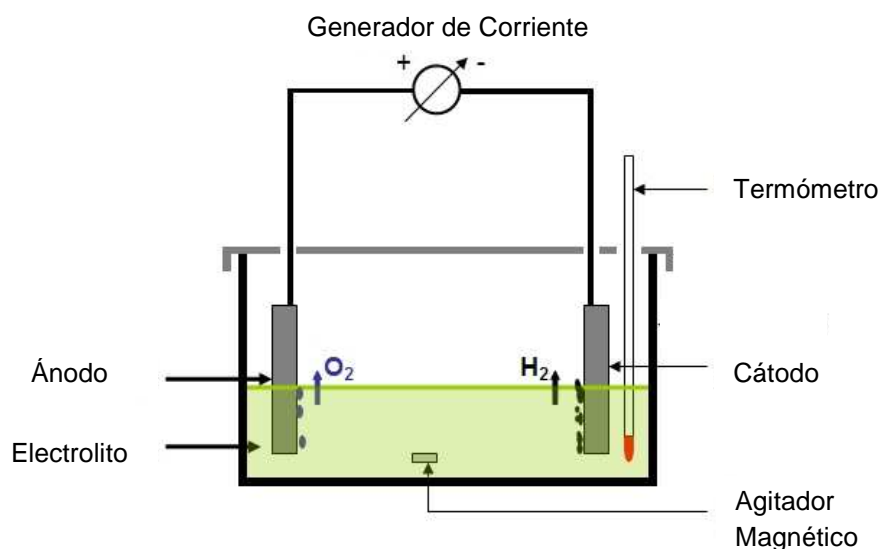


Figura 2. Proceso de Electropulido

Este proceso en general se considera que incluye una acción de pulido y brillo en la superficie, de acuerdo a las siguientes variables: superficie del área a pulir, material del cátodo y el ánodo, temperatura del baño, densidad de corriente y voltaje, el tiempo, entre otras [9]. En una aleación de dos fases, el potencial es más alto en una fase, es decir, ésta es anódica con respecto a la otra fase (catódica) y durante el electropulido la fase anódica es atacada mientras que la otra fase no.

En la figura 3 se muestra que la película formada es más delgada en A-B, por lo cual la corriente en A será mucho mayor que en C, produciendo una disolución rápida en A que en el punto C; logrando una nivelación de la superficie, eliminando asperezas de tamaño de 1 μm o más. Posteriormente bajo condiciones controladas de intensidad de corriente y temperatura, se logra el brillo con la eliminación de irregularidades tan pequeñas como unas 0,01 micras [3].

El espesor de material disuelto varía entre 10 y 25 micrones, de acuerdo con la intensidad de corriente utilizada y el tiempo de exposición. En la norma estándar ASTM E1558-99 [9] se encuentra una lista de los problemas encontrados en el electropulido y recomendaciones para su eliminación.

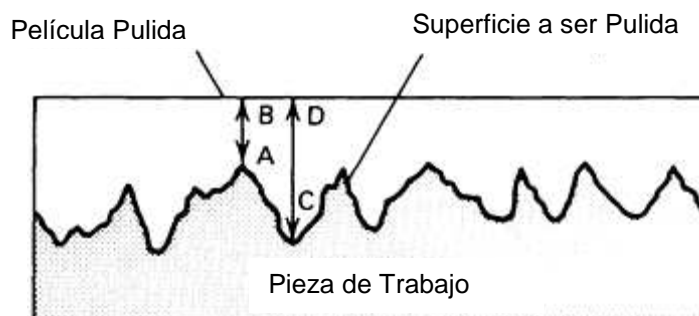


Figura 3. Mecanismo del Pulido Electrolítico

1.3.3 Pasivación

Los aceros inoxidable se autopasivan debido a que una película protectora pasiva se forma espontáneamente debido a la exposición al aire o a la humedad. La presencia de contaminantes en la superficie, incluyendo polvo, grasa, hierro libre de contacto con el acero mecanizado, puede interferir con la formación de dicha película. La limpieza de estos contaminantes sobre la

superficie de los aceros facilita la pasivación espontánea permitiendo el acceso de oxígeno a la superficie. Es por esto que se utilizan disoluciones químicas ácidas para esta limpieza, con el propósito de mejorar la formación de la película protectora sin afectarla [11].

1.4 CORROSIÓN EN LOS BRACKETS METÁLICOS

El proceso de corrosión en un metal, ocurre por la pérdida de cualquiera de los iones metálicos directamente dentro de una solución o por la disolución progresiva de la película de la superficie. Esencialmente las reacciones químicas simultáneas involucradas en este proceso, son la oxidación y la reducción. Sin embargo existen métodos que evitan o al menos disminuyen, la velocidad de corrosión. Uno de estos métodos son las aleaciones, que le confieren químicamente al metal una resistencia a la corrosión formando una capa protectora sobre la superficie (pasivación). En los brackets metálicos la corrosión es un proceso ineludible, y más cuando el acero inoxidable del que están fabricados, es particularmente susceptible a la corrosión intergranular durante la soldadura, debido a las altas temperaturas. El calentamiento conduce a la reacción entre el carbono y el cromo en el acero, formando carburos de cromo. Luego de la precipitación de estos carburos en los límites de grano se tiene dos efectos: (1) la aleación empieza a ser más frágil y (2) la aleación es menos resistente a la corrosión, porque el cromo fue usado en la reacción para formar los carburos, por lo que disminuye su disponibilidad para formar el óxido; en cambio, la corrosión por desgaste es algo posible y normal. En la interface entre el alambre y el bracket, durante la aplicación de una carga, los metales sufren un proceso de soldadura en frío por la presión en la interface. Si se continúa con estas cargas eventualmente causará una ruptura brusca de las capas de óxido protectoras de la superficie dejando a los brackets susceptibles a la corrosión [10].

1.5 ESTUDIO DE LA RECICLABILIDAD DE LOS BRACKETS METÁLICOS

Para los ortodoncistas un bracket desprendido durante el tratamiento ortodóncico, implica en muchas ocasiones una pérdida, no sólo por el hecho de

caerse, sino porque el procedimiento que se lleva a cabo con el paciente es una ardua tarea.

Por cuestiones de tiempo y practicidad se desarrolló su reciclaje. Sin embargo, se cuestiona sobre la efectividad del método, es decir, que el bracket al final siga manteniendo la misma funcionalidad retentiva. Para lo cual, varios investigadores han desarrollado mejorar cada vez más estos métodos que, modificando algunas variables, logran obtener buenos resultados pero también algunas veces no. Los adhesivos utilizados para acoplar los brackets a los dientes pueden ser removidos ya sea por pirolisis, por arenado o por disolución.

Varios estudios han reportado que el arenado incrementa significativamente la fuerza retentiva produciendo una significativa reducción en la probabilidad de falla [17]-[18]. Los factores, como la presión utilizada durante el arenado, la distancia de aplicación, el tamaño de las partículas de óxido de aluminio y el tiempo utilizado, tienen efectos sobre los resultados y deben ser estrictamente controlados durante este procedimiento.

Arici y colaboradores, encontraron que al arenar el bracket durante 3 segundos con óxido de aluminio de 25 μm , incrementó en un 12 % la fuerza de adhesión, debido a que el arenado ofrece un incremento en el área de la superficie y en la capa de óxido del acero inoxidable sobre la base del bracket [6]. Sin embargo, Sonis encontró una ligera disminución en la resistencia a la tracción de los brackets arenados con respecto a nuevos brackets, pero enfatiza que la diferencia no es estadísticamente significativa, por lo tanto, recomienda que se puede reutilizar un bracket usado que se haya caído accidentalmente sin riesgo de que se desprenda más fácilmente que uno nuevo [19].

Por otra parte, la aplicación de calor, es uno de los métodos que se pueden llevar a cabo ya sea dentro del consultorio del especialista o bien, como proceso industrial. El primero denominado flameado directo, consiste en llevar la base del bracket a una flama entre los 900°C-1200°C por unos segundos, y el segundo con la ayuda de un horno a cierta temperatura durante un determinado tiempo, se logra desprender el material de adhesión.

La Compañía Esmadent (Highland Park, Illinois, USA) utiliza éste último. En este sistema los brackets son calentados a 454 °C por 45 minutos, luego se limpian por ultrasonido de 10 a 15 minutos, se secan y posteriormente son electropulidos de 30-45 segundos; finalmente se neutralizan con una solución de Bicarbonato de Sodio y se enjuagan con agua caliente [20].

Las investigaciones de Buchman, determinaron que con el uso de este método para el reciclado de brackets, se logra una cantidad de cambios dimensionales, que son de mínima importancia clínica, aunque los cambios en la microestructura metalúrgica le hizo pensar en la susceptibilidad a la corrosión intergranular metálica, debido a la precipitación del Cr como carburos de cromo en los bordes de grano, disminuyendo así, el Cr disponible para formar la película pasiva para la resistencia a la corrosión [2].

Finalmente, en el proceso de disolución cabe destacar que por medio de un agente químico se logra remover el agente adhesivo. La compañía de Ortho-Cycle (Hollywood, Florida, USA), emplea dicho método. Un disolvente para la remoción junto con las vibraciones de alta frecuencia se realiza a temperaturas inferiores a los 100°C para eliminar el compuesto. Esto es seguido por un calentamiento a 250°C para la esterilización y una etapa de electropulido muy breve (45 segundos), además la empresa señala que el metal eliminado está entre los 5 y 10 µm [20]. En sí el uso del electropulido es con el propósito de eliminar el oscurecimiento por la acción de aplicar calor. Matasa concluyó que una vez se electropule un bracket además de perder rugosidad y ganar brillantez, existen algunas deformaciones que se acumulan después de varios ciclos debido al material que se elimina, como es la abertura de la ranura, adelgazamiento del cuerpo del bracket y la disminución de la rugosidad para el factor de adherencia de la resina [22].

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó la consulta bibliográfica del tema por medio de artículos publicados v en Internet, también de la búsqueda en libros, además de recopilación de la información referida a las personas que están involucradas en el tema.

2.2 MATERIALES Y EQUIPOS

- 20 brackets nuevos de *OrthoClassic* y 5 probetas de acero 316L
- 2 alambres de acero Inoxidable 316L, L= 1 ft y d= 0,014 in
- Resina Polimérica + Metil-Metacrilato
- Balanza Mettler AE 240 y Microméetro Digital de Exteriores Powler
- Microscopio Óptico Olympus BX-51
- Potenciostato/Galvanostato GAMRY
- Electrodo de Ref.: Ag/AgCl y Electrodo Auxiliar: Grafito
- Soplete, Arenador, Fuente de Voltaje Regulada
- Plancha de Calentamiento Mott Schott y Termocupla Schott D-550H
- Celda de Vidrio Pyrex Tipo Balón, Equipo Ultrasónico LC 30H

2.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

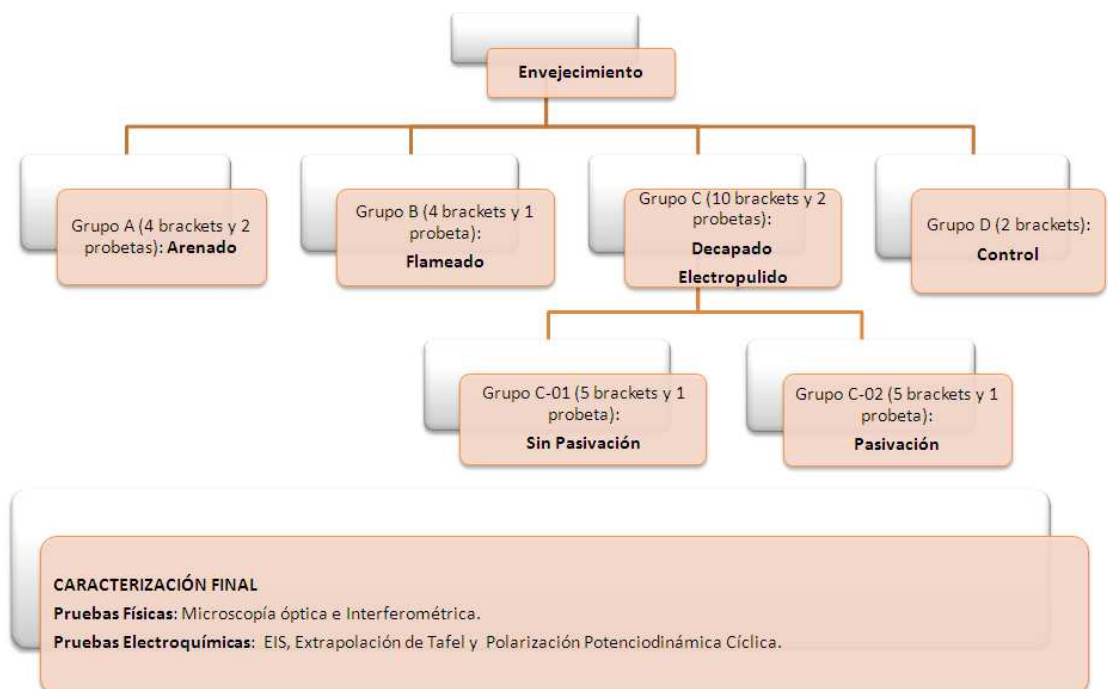


Figura 4. Diagrama de Flujo del Desarrollo Experimental

2.3.1 Envejecimiento de los brackets

Se utilizó el Kit de *OrthoClassic* modelo Roth [5] compuesto por 20 brackets con una superficie de la base aprox. de 12 mm², que fueron limpiados inicialmente con aire seco y 5 probetas de acero 316L para control, con un área de 3,14 cm² preparadas de acuerdo a la NORMA ASTM G1-90 [29], luego se aplicó una mezcla de resina con Metil-Metacrilato, el cual se usa normalmente como adhesivo entre el bracket y el diente a los 18 brackets y las 5 probetas, dispuestos para el procedimiento del reciclado. Posterior a esto, se almacenaron en la solución de Saliva Artificial Afnor [6], cuya composición se muestra en la tabla 1, durante una semana. Anterior a esto, se realizó el mismo procedimiento sin la resina durante un lapso de 15 días, solamente para los 18 brackets.

Sustancia	Cantidad
NaCl: Cloruro de Sodio	0,175 g/250 mL
KCl: Cloruro de Potasio	0,3 g/250 mL
NaHCO ₃ : Bicarbonato de Sodio	0,375 g/250 mL
KSCN: Tiocianato de Potasio	0,0825 g/250 mL
Na ₂ HPO ₄ ·2H ₂ O: Fosfato Disódico Dihidrato	0,065 g/250 mL
Urea	0,325 g/250 mL
pH	6,55
T (°C)	20,8

Tabla 1. Saliva Afnor

2.3.2 Arenado

El chorro de arenado se realizó horizontalmente a unos 10 mm con óxido de aluminio (Al₂O₃) con un tamaño de grano de 50 μm [4], a una presión de 250 kPa con un dispositivo de arenado, durante 30 segundos. Posteriormente los residuos se limpiaron con un chorro de aire seco durante 10 segundos.

2.3.3 Flameado

Por medio de un soplete a 10 mm de distancia con una temperatura de 950 °C, se realizó el flameado a 4 brackets durante un lapso de 5 segundos al primero, 4 segundos al segundo, 3 segundos a los dos últimos y para la probeta fue de 3 segundos. Posteriormente los residuos se limpiaron con un chorro de aire seco durante 10 segundos.

2.3.4 Modelo Experimental Propuesto

2.3.4.1. Decapado

Se utilizó una solución acuosa de ácido fosfórico al 37% a una temperatura de 60 °C, para remover la resina. Luego se lavaron en agua destilada y por último se secaron con aire seco durante 30 segundos.

2.3.4.1 Electropulido

La solución encontrada en la literatura que hace referencia al electropulido de los aceros inoxidables tiene la siguiente composición: 55% ácido ortofosfórico (H_3PO_4), 12% ácido sulfúrico (H_2SO_4) y 33% agua. La temperatura a la cual se llevó el proceso fue a temperatura ambiente, la densidad de corriente y tiempo utilizado para los 10 brackets y las 2 probetas, se describe en la tabla 2.

Brackets	Denominación	Corriente (A)	Tiempo (min)
C-01 Sin Pasivación	01	1	1
	02	2	2
	03	1	2
	04	0,8	1
	05	0,8	2
	Probeta-20	0,8	2
C-02 Pasivación	01	1	1
	02	2	2
	03	1	2
	04	0,8	1
	05	0,8	2
	Probeta-21	0,8	2

Tabla 2. Valores de los parámetros utilizados en el proceso de Electropulido

2.3.4.1 Pasivación

De acuerdo con la norma ASTM A380-99 [23], la solución al 20% de ácido nítrico (HNO_3), es la adecuada para llevar a cabo la pasivación de un acero inoxidable 316L. Se sumergieron los 5 brackets y una de las dos probetas electropulidas en este baño a una temperatura de 47°C por 10 minutos, y finalmente se realizó un baño ultrasónico en etanol por 5 minutos.

2.3.5 Pruebas de Caracterización

2.3.5.1 Microscopia Óptica

Por medio del microscopio *Olympus BX-51* a los aumentos de 10X, 20X y 50X, se tomaron las respectivas micrografías de los brackets y de las probetas después de cada técnica de reciclado realizada.

2.3.5.2 Pruebas Electroquímicas

En el esquema presentado en la tabla 3 y en la figura 5, se muestra las variables utilizadas para cada tipo de prueba, además del montaje realizado para la caracterización electroquímica, con una temperatura de 37,5°C y como electrolito, saliva artificial Afnor.

Potencial de Corrosión	<ul style="list-style-type: none">•Tiempo: 300 s•Velocidad: 1 mV/s
Espectroscopia de Impedancia	<ul style="list-style-type: none">•F_{Inicial}: 100.000 Hz•F_{Final}: 0,01 Hz•Amplitud: 10 mV
Extrapolación de Tafel	<ul style="list-style-type: none">•E_{Inicial}: -1,5 V•E_{Final}: 1,5 V•Velocidad: 1mV/s
Polarización Potenciodinámica Cíclica	<ul style="list-style-type: none">•E_{Inicial}: -0,2 V•Exploración de Reversa: 5V•Velocidad: 5 mV/s

Tabla 3. Variables de las pruebas electroquímicas

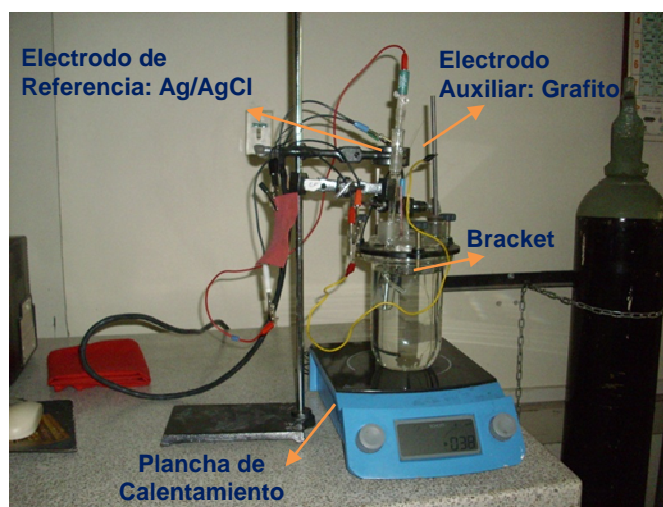


Figura 5. Diseño del montaje realizado para las pruebas electroquímicas

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

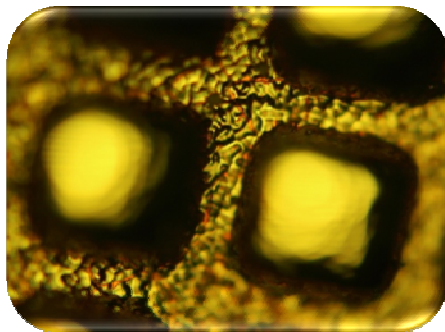
En la figura 6 y en el anexo B se muestran las fotografías y micrografías de los respectivos brackets y probetas con las diferentes técnicas aplicadas. En el bracket nuevo se observó que el enmallado de la base tiene una superficie rugosa, además de los carburos de cromo (líneas naranjas) precipitados en los límites de grano, en comparación con la preparación de la probeta que fue lijada con las lijas N° 380, 400 y 600, limpiada después en un baño ultrasónico por 5 minutos con etanol. El bracket arenado obtuvo una apariencia opaca después de la técnica aplicada, aumentó su rugosidad y los carburos de cromo no se evidenciaron después de la técnica y en la probeta respectiva, se observó una mejor homogeneidad del arenado en toda la superficie.

La fase primaria de formación del acero 316L es la austenita, γ , (cuyos elementos estabilizadores son Ni, Mn, C y N), seguido por el enfriamiento, donde el líquido se enriquece en ferrita, δ , (cuyos elementos estabilizadores son Cr, Si, Mo, Ti, Nb) [27]; cuando se elabora el bracket, donde el cuerpo se une con la base, el acero se sensibiliza (formación de $C_{23}C_6$, ver Anexo B, bracket nuevo **g**) 50X). Luego al estar expuesto nuevamente a una temperatura $> 800^{\circ}C$ (técnica de flameado directo) se generan puntos activos en la base del bracket, logrando aumentar la energía de activación de la ferrita que influye en la disminución de la solubilidad del carbono en el acero, obteniéndose así, una microestructura como se observa en la figura 6.0 c). Cabe resaltar que la aplicación de calor no supera los 5 segundos, por lo que el incremento de la energía de activación no es tan considerable, pero sí lo suficiente como para lograr cambios en la microestructura. Con respecto a la probeta no existen cambios significativos en el material, ya que previamente no se había expuesto a calor.

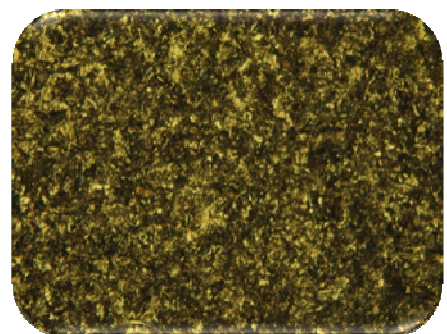
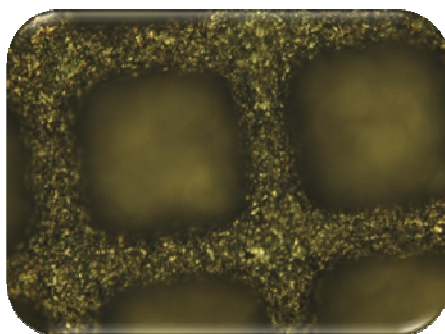
En cuanto a los brackets electropulidos se observó que hubo un abrillantamiento de la base del bracket, además que conservó aproximadamente la misma superficie rugosa que los brackets nuevos, y junto

con los brackets arenados, los precipitados fueron disueltos, sólo que en estos dejan observar los límites de grano. En esta técnica las probetas se opacaron, además que no se eliminó el proceso de lijado que tiene sobre la superficie, esto debido a que, de acuerdo con la literatura, el electropulido [30] es un método que está influenciado principalmente en la densidad de corriente utilizada y el área del ánodo, características que no son iguales tanto en los brackets como en las probetas.

En las microfotografías a 50X del anexo B, se muestran las diferencias de los brackets con y sin pasivación. Los brackets pasivados mostraron una superficie predominante dominada por la capa de óxido formada forzosamente, debido a que se observan unas pequeñas irregularidades en el enmallado, posiblemente por capas delgadas de óxido; en contraste con los brackets no pasivados donde la formación de la película protectora es homogénea y se da espontáneamente con el medio. Estos hechos se complementan con las probetas, ya que se muestra apreciablemente una estructura más uniforme en la probeta no pasivada que en la pasivada.



a)



b)

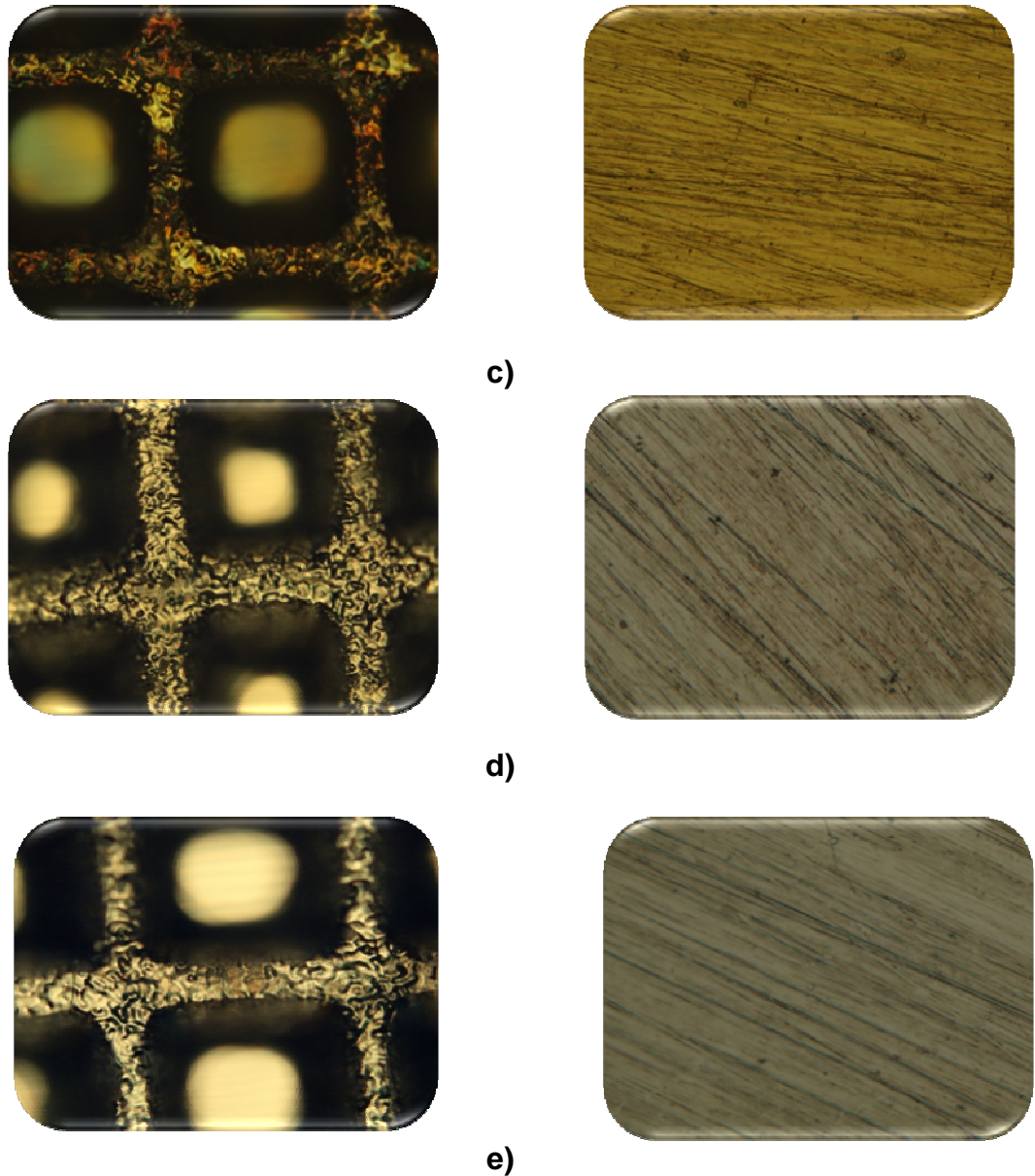
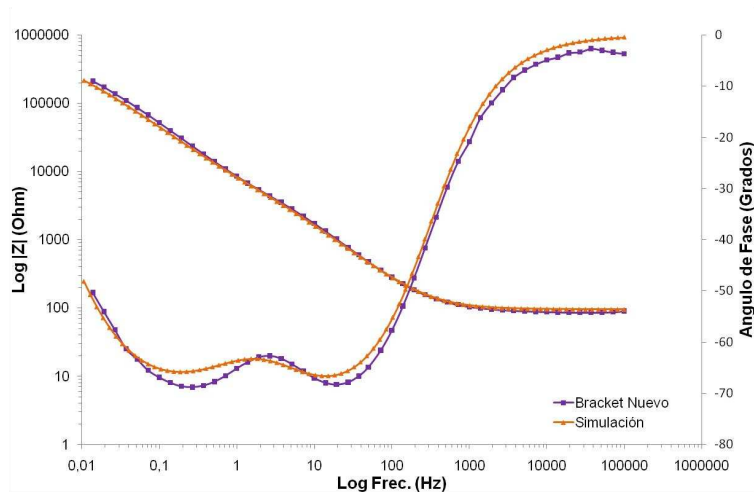


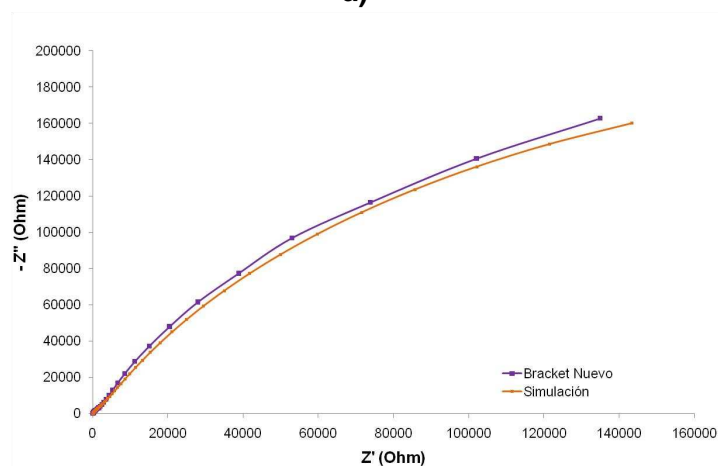
Figura 6. Microfotografías a 20X, Bracket y Probeta **a)** Nuevo, **b)** Arenado, **c)** Flameado, **d)** Elec. + Sin Pasivación y **e)** Elec.+ Pasivación

3.2 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

En la figura 7 se observan los diagramas de Bode y Nyquist obtenidos para cada técnica aplicada para los brackets nuevos, y en el Anexo C, para el resto de técnicas junto con las probetas, donde se identifican los fenómenos superficiales asociados a los procesos corrosivos y de doble capa que se llevan a cabo en la interface saliva artificial/bracket y saliva artificial/probeta.



a)



b)

Figura 7. Diagrama de **a)** Bode y **b)** Nyquist para los brackets nuevos junto con la simulación en Zview

En general todas las técnicas de reciclaje presentaron comportamientos resistivos relacionados con la caída óhmica, y comportamientos atribuidos a la resistencia a la transferencia de carga (R_t). Las pendientes de logaritmo de la frecuencia versus el logaritmo del módulo de la impedancia, se caracterizaron los comportamientos capacitivos, los cuales están representados por elementos de fase constante (CPE) en el rango de frecuencias medias, con pendientes inferiores a 0,9. Esta naturaleza de la fase constante es una consecuencia del defecto de transporte de carga en la película de óxido formado, debido principalmente a la migración de las cargas bajo la influencia netamente electroquímica (transporte a través de la migración y no por difusión) [24]. Existen varias explicaciones físicas para este comportamiento, la

principal y la que se aplica en este caso, es que el CPE se compensa con la rugosidad de la base del bracket y la falta de homogeneidad en la superficie de la probeta, ya que modifica la distribución de carga de la doble capa, y por lo tanto su impedancia.

En la figura 8 se muestran las curvas de nivel del microscopio interferométrico, donde la flecha demarca una rugosidad de $1,8 \mu\text{m}$, en una longitud inferior a 1 mm, sólo para el bracket nuevo. En el resto de brackets y probetas no se lograron obtener estas curvas, debido a la alta heterogeneidad de la superficie, que se lograron después de las técnicas aplicadas. De manera que se confirma con este comportamiento por el cual los brackets y las probetas no son capacitores netamente puros, ya que después del reciclaje, éstos obtienen una superficie rugosa.

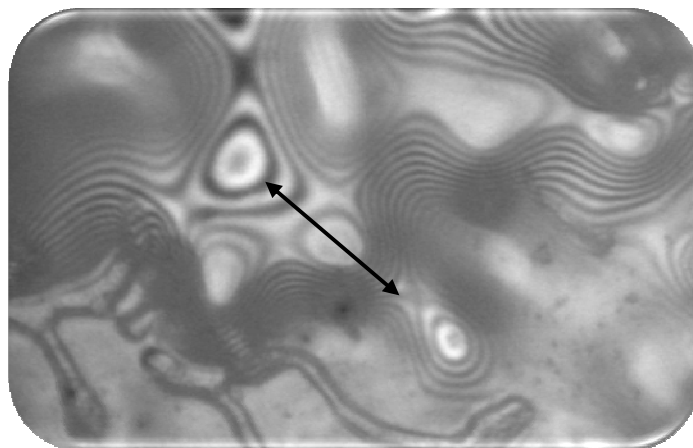


Figura 8. Curvas de Nivel del Bracket Nuevo por medio del Microscopio Interferométrico.

Con respecto a los brackets, en todos los casos a excepción de la técnica de flameado, se presentan dos constantes de tiempos, una de ellas a una frecuencia aproximada de 1 Hz. En los brackets expuestos al arenado y electropulido con pasivación, estas constantes se traslapan debido a las similitudes dieléctricas o de transferencia de carga que existe en las interfaces óxido/metal y óxido/electrolito, representándose así por medio del circuito equivalente I de la figura 9. En comparación con el bracket nuevo y el electropulido sin pasivación, estas constantes no presentan el mismo comportamiento, esto supone que, el enriquecimiento del óxido de Cr se realiza

en las regiones más internas, agregándose un sub-modelo de Randles, identificado con el circuito II de la figura 9 [31].

La técnica del flameado, es un caso particular, ya que se representa por el circuito equivalente de Randles, simbolizado en la figura 9 a), la diferencia se encuentra, en que la película de óxido no se forma homogéneamente sobre el metal, lográndose así que la película superficial sea porosa, esto está soportado por los valores más bajos que se obtuvieron para el comportamiento resistivo.

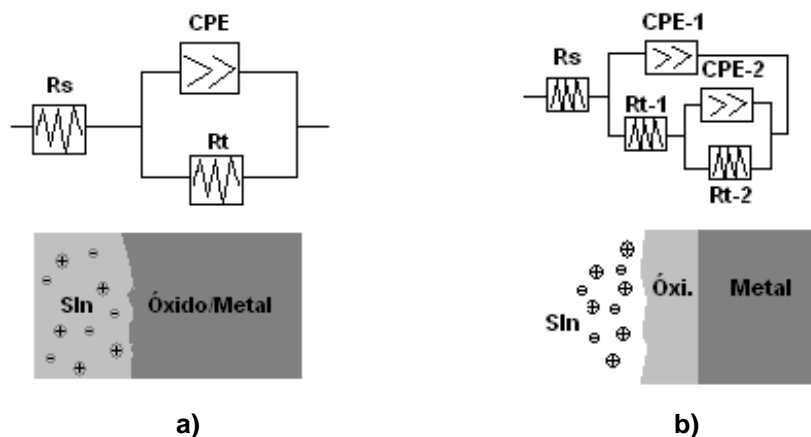


Figura 9. Circuito Equivalente a) I y b) II

En cuanto a los diagramas de Bode obtenidos, todos representan semicírculos depresados que no se interceptan con el eje real a bajas frecuencias, debido al comportamiento pasivo que presenta la base del bracket, y la estabilidad de la película pasiva obtenida por las técnicas de reciclado a las que fueron expuestos, esto se complementa con los valores relativamente bajos para los CPE.

Finalmente, el valor más alto de R_{tc} , que se observa en la tabla 4, fue para el bracket arenado; lo cual implica la buena resistencia a la corrosión en comparación con los demás brackets debido a la estabilidad mostrada por la capa de óxido.

Estas mismas técnicas de reciclado aplicadas sobre las probetas, presentan sólo una constante de tiempo a bajas frecuencias y un ángulo de fase menor que 90° en todo el rango de frecuencias, luego el circuito equivalente que mejor representa este comportamiento lo describe la figura 9 a), con valores de

resistencia a la solución (R_s) y CPE de igual magnitud, a los que presentaron los brackets, lo que confirma la igual naturaleza del material, del cual están fabricados.

Sin embargo la R_t , que está asociada con el tipo de superficie, difiere ampliamente debido que a que la apariencia física entre el bracket y la probeta son diferentes; mientras que el bracket es de un menor tamaño, tiene un enmallado en la base, además de la sensibilización ocasionada por la elaboración, la probeta es 3 veces el tamaño del bracket, no había sido expuesta a un tratamiento térmico y se lijó con el fin de prepararla para las pruebas electroquímicas. En resumen, durante el tiempo transcurrido para las mediciones electroquímicas de los brackets y las probetas, el proceso de transferencia de carga se encuentra activo en la interface óxido/solución, indicando así que la película protectora se va formando ante un eventual proceso de corrosión.

	<i>Nuevo</i>	<i>Arenado</i>	<i>Flameado</i>	<i>Elec. + Sin Pasivación</i>	<i>Elec. + Pasivación</i>
R_s (Ω)	90,098	73,622	107,484	118,610	126,786
R_t -1 ($k\Omega$)	13,3	2280	258	120	660
CPE-1 (μF)	16,92	13,67	39,76	15,13	25,39
R_t -2 ($k\Omega$)	540	-----	-----	1110	-----
CPE-2 (μF)	15,17	-----	-----	21,55	-----

Tabla 4. Valores de los elementos usados para los brackets en los Circuitos Equivalentes de la **Figura 9**

El ajuste de todos los datos se obtuvo de acuerdo a la simulación por medio del Software Zview 3.1, con porcentajes de error inferiores al 10%.

3.3 EXTRAPOLACIÓN TAFEL

La figura 10 muestra la gráfica obtenida de la extrapolación Tafel para los tratamientos superficiales llevados a cabo. Con los brackets electropulidos con

y sin pasivación se obtuvieron comportamientos similares, de acuerdo a las curvas de polarización obtenidas.

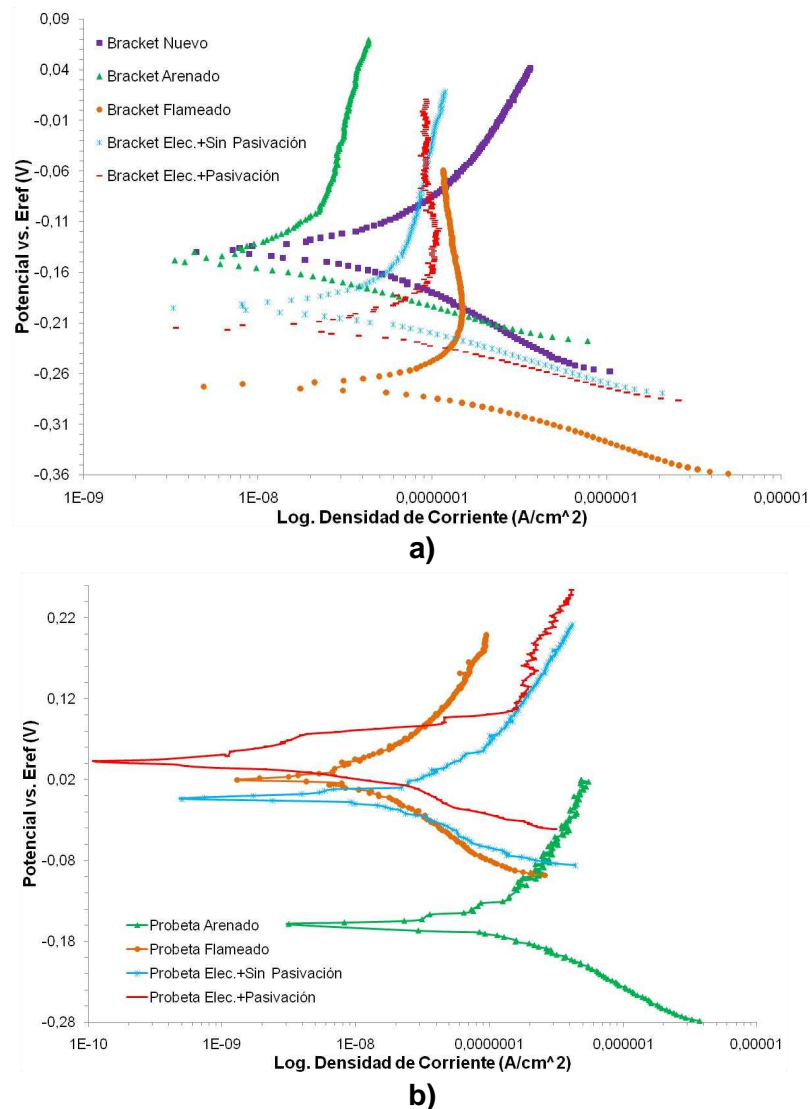


Figura 10. Curvas de Extrapolación Tafel para: **a)** Brackets y **b)** Probetas

Los valores más bajos de la densidad de corriente (i_{corr}) se obtuvieron para los brackets nuevo y arenado, respectivamente, seguido de los electropulidos y finalmente del flameado, indicando así que el bracket arenado presenta las mejores propiedades de resistencia a la corrosión, por encima del bracket nuevo; esto puede ser posible, a que el tamaño de partícula utilizado durante el arenado, le proporciona a la base del bracket una homogeneidad a la superficie favoreciendo principalmente el estado catódico, es decir, formación de la cromita. Un resumen de estos resultados se encuentra en la tabla 5.

Tipo de Brackets	E_{corr} (V)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Coef. de Stern-Geary: (mV/Década)	R_p ($K\Omega\text{-}cm^2$)	CR (mm/año)
Nuevo	-0,1399	0,0175	35,9	2053,7	$1,829 \times 10^{-4}$
Arenado	-0,1480	0,0135	49,1	3633,7	$1,411 \times 10^{-4}$
Flameado	-0,2726	0,1150	34,4	298,87	$1,202 \times 10^{-3}$
Elec + Sin Pasivación	-0,1954	0,0490	39,3	802,21	$5,120 \times 10^{-4}$
Elec. + Pasivación	-0,2148	0,0600	32,1	534,57	$6,269 \times 10^{-4}$

Tabla 5. Parámetros calculados a partir de la Extrapolación Tafel

El bracket flameado, fue el que presentó el menor E_{corr} , con un valor de -0,2726 V indicando que esta técnica hace al bracket termodinámicamente más susceptible a la corrosión, incluso presentó la mayor i_{corr} , $0,1150 \mu A/cm^2$, donde el proceso de corrosión se favorece con la reacción anódica, es decir, la migración de iones del metal ($Cr \rightarrow Cr^{3+} + 3e^-$), perdiendo la capacidad de formar la película de óxido y haciéndolo más vulnerable a la corrosión.

En cuanto a los resultados obtenidos para las probetas, sólo fueron similares para la técnica del arenado, para el resto de técnicas difieren por las razones antes expuestas en el análisis de impedancia.

Un requisito esencial para cualquier metal que se emplee en la cavidad intra-oral es que no genere productos de corrosión que sean dañinos para el organismo, sin embargo, es un ambiente ideal para la biodegradación de los metales, en especial, para aquellos que deben permanecer por un período de tiempo muy prolongado, debido a que la saliva contiene agua, oxígeno e iones cloruros que contribuyen al ataque corrosivo.

La velocidad de corrosión (CR) determinada en los brackets no supera el orden de magnitud de 10^{-3} mm/año, demostrando así que en el tiempo que se utilizan, no representan efectos perjudiciales para quienes les dan uso en un tratamiento de ortodoncia. Finalmente la i_{corr} , presentada por los brackets en cualquiera de los tratamientos aplicados, son inferiores a $1 \text{ mA}/m^2$, esto representa que no existen efectos dañinos significativos en los pacientes por liberación de iones perjudiciales [28].

3.4 POLARIZACIÓN CÍCLICA

De acuerdo a los resultados obtenidos, mostrados en la figura 11, el bracket nuevo y el bracket con electropulido sin pasivación presentaron corrosión uniforme, sin presentar una zona definida de pasivación, es decir, que dichos brackets expuestos en un ambiente compuesto por cloruros, como lo es la cavidad bucal, pueden corroerse continuamente desde el primer momento de colocación, liberando iones metálicos al organismo, ocasionando varios problemas relacionados con ello. Principalmente, este tipo de corrosión es la más perjudicial desde el punto de vista médico, debido a que no se forma el óxido de cromo, el cual es un óxido estable, que podría bloquear la liberación de iones perjudiciales, como el níquel, el hierro y el mismo cromo.

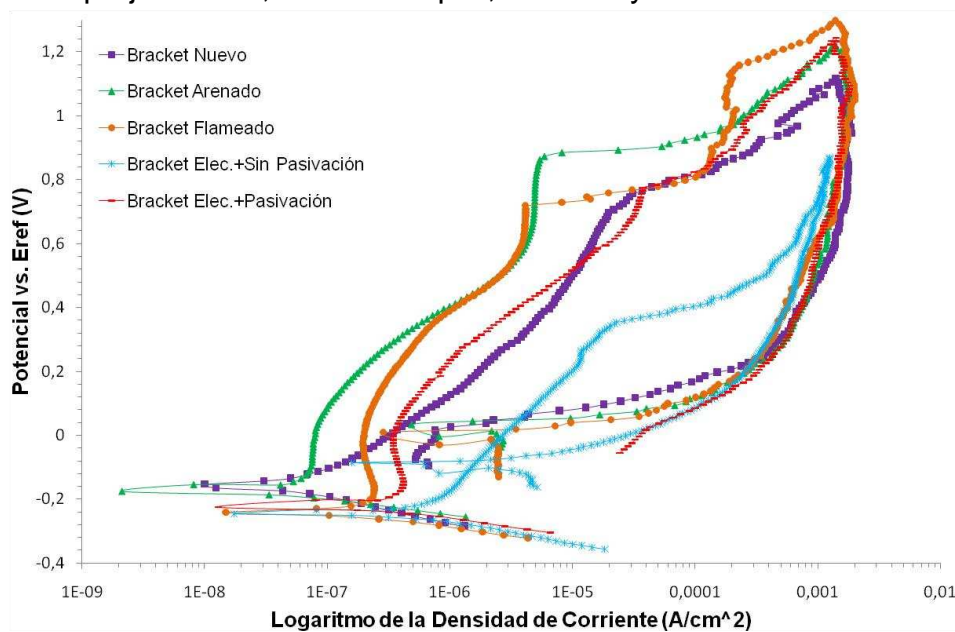


Figura 11. Curvas de Polarización Cíclica de las técnicas de reciclado de brackets metálicos

En cuantos a los brackets con el proceso de flameado, arenado y electropulido con pasivación, presentaron una zona de pasivación de aproximadamente 200 mV, mostrando que este tipo de técnicas de tratamiento superficial hacen más resistente al bracket ante un eventual proceso de corrosión activa o uniforme. Desde el punto de vista de resistencia a la picadura por cloruros, la técnica de reciclo por arenado presentó una mayor susceptibilidad a presentar este tipo de corrosión, por la presencia de un mayor loop formado entre la curva del sentido positivo del potencial y el sentido contrario de la curva obtenida en este barrido.

El estado de daño por picadura del material, se puede alcanzar, bajo condiciones que generen ambientes altamente corrosivos, caso que sólo ocurriría en el cavidad oral, si el pH disminuyera considerablemente, sumado a la presencia de posibles zonas anódicas, generadas por rozamiento o abrasión, lo cual ocasionaría la pérdida de estabilidad o de protección del óxido contra la corrosión; en este orden de ideas, todos los brackets no se encuentran exentos a lo largo de su uso, de tener una corrosión localizada, en especial, cuando se encuentran en un ambiente con cloruros, insistiendo que la forma de corrosión más perjudicial en este tipo de materiales, es la corrosión uniforme, por la tasa de liberación de iones casi inmediata, al ser colocado en la cavidad bucal.

De acuerdo a la figura 12, se corrobora con la probeta arenada lo mencionado anteriormente. Las probetas electropulidas con y sin pasivación presentaron el mismo comportamiento, pasivo ante una corrosión uniforme y un alto potencial de picado, sin embargo estos comportamientos no se asemejan a los presentados por los brackets, debido a la presencia de otras formas de corrosión en los brackets, que por su geometría, generan diferencias en áreas, corrosión por intergranular, presencia de zonas anódicas dispersas, etc.

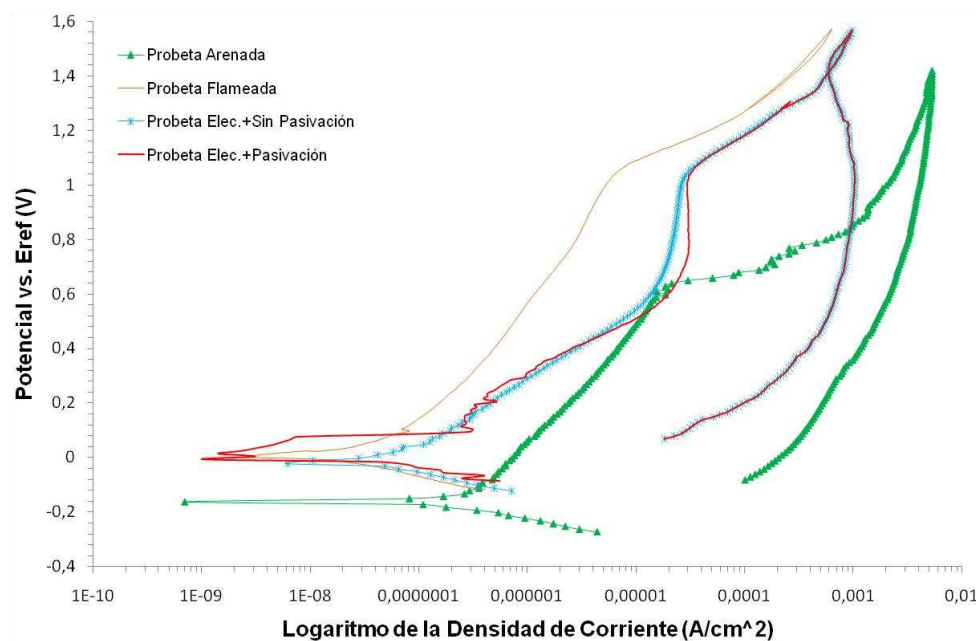


Figura 12. Curvas de Polarización Cíclica de las técnicas de reciclado de las probetas

Lo más destacable en el análisis de las probetas es el E_{rp} que presenta la probeta flameada, un loop muy pequeño en comparación con las otras probetas y los otros brackets; esta condición se debe a que la probeta presenta más tendencia a la formación del óxido, ya que el Cr se encuentra disponible en la superficie, y a diferencia del bracket flameado, que se precipitó como $Cr_{23}C_6$.

4. CONCLUSIONES

- ★ De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, los brackets metálicos, en un ambiente simulado de la cavidad oral (con saliva artificial Afnor), presentó susceptibilidad a la corrosión del tipo uniforme. Los brackets después del reciclado presentan reacciones electroquímicas de transferencia de masa en el ambiente intra-oral, que pueden por un lado dar a la formación de la película pasiva, retardando el proceso de corrosión y por otro lado influir en el posterior deterioro de la base del bracket, según sea la estabilidad de esta película ante la corrosión.
- ★ A partir de los comportamientos obtenidos sobre los brackets reciclados, el bracket arenado presentó las mejores características contra la corrosión, ya que por medio de esta técnica de reciclado, se logró obtener una mayor homogeneidad y estabilidad de la película de óxido, frente a un posible proceso de corrosión, lo cual, no ocurre con las demás técnicas de reciclado.
- ★ La técnica del flameado presentó ser el procedimiento por el cual el bracket es más susceptible a la corrosión uniforme, debido a la formación de sitios activos que se presentan después del calentamiento, además de lograr un cambio en la apariencia del mismo. El bracket electropulido con pasivación presentó mejores características superficiales que las obtenidas por la técnica del flameado, pero no mejores que las propiedades de corrosión alcanzadas por el arenado.
- ★ Las comparaciones realizadas entre las técnicas de reciclado aplicadas a los brackets y a las probetas planas, permitieron mostrar la formación de zonas anódicas y catódicas que conllevan a procesos de corrosión o liberación de iones, ocasionando posibles complicaciones en los tratamientos ortodóncicos.

5. RECOMENDACIONES

- ✓ Simular ambientes intra-orales más corrosivos, como el aumento de pH y temperatura, para analizar si se existe o no aumento en el proceso de corrosión después de las técnicas de reciclado, con el fin de corroborar si la técnica propuesta mejora las propiedades del flameado.
- ✓ Realizar evaluaciones de resistencia de tracción para verificar la fuerza de adherencia que se obtiene después de los métodos de reciclado convencionales en comparación con el método propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ORTIZ, Alexandra; ZAPATA, Rolando; VELÁZQUEZ, Carlos; DELGADO, Linda y SÁNCHEZ, Freddy. "Comparación de las fuerzas adhesivas de cizallamiento de brackets convencionales y brackets microarenados con partículas de óxido de titanio", Revista CES Odontología, Vol. 21, Universidad CES, Medellín, Noviembre 2008, p.1-6
- [2] HUANG, Tsui-Hsien; YEN, Chen-Chien y KAO, Chia-Tze. "Comparison of ion release from new and recycled orthodontics brackets", American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Vol.120, Number 1, American Association of Orthodontists, USA, Julio 2000, p.68-75
- [3] PURBAIX, Marcel. "Electrochemical corrosion of metallic biomaterials". Biomaterials, Vol. 5, Butterworth & Co. Londres, January 1984, p. 122-133
- [4] NERGIZ, Ibrahim; SCHMAGE, Petra; HERRMANN, Wolfram y ÖZCAN, Mutlu. "Effect of alloy type and surface conditioning on roughness and bond strength of metal brackets". American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. Vol. 125, Number 1, American Association of Orthodontist, USA, January 2003, p. 42-48
- [5] ORTHO CLASSIC, "Ultimim Roth", edición de internet, Sección Bracket System, <http://www.orthoclassic.com/PDF/09%20Roth.pdf>, consultada 5 de julio de 2009
- [6] ALDEA, E; MEGHEA, A y DEMCTRESCI, I. "Comparison of the antioxidant activity of various simulated artificial saliva". University Politehnica of Bucharest, Romania 2003, p. 331-334
- [7] GARCIDUEÑAS, Salvador y VARGAS, María de la Luz. "Comparación de dos técnicas de reacondicionado de brackets metálicos mediante el índice de resina modificado". Revista Latinoamericana de Ortodoncia y Odontopediatría, Venezuela, 2008, p. 1-9
- [8] MACCOLL, G; ROSSOUW, P; TITLEY, K; YAMIN, C. "The relationship between bond strength and orthodontic bracket base surface area with conventional and microetched foil-mesh bases". American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Volume 113, No. 3, American Association of Orthodontist, Canada 1998, p. 276-281

[9] Norma ASTM E1558-99: “Standard Guide for Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens”. Annual Book of ASTM Standards, Volume 3.01, United States 1999, p.10

[10] HOUSE, Kate; SERNETZ, Friedrich; DYMOCK, David; SANDY, Jonathan y IRELAND, Anthony. “Corrosion of orthodontic appliances—should we care?”. Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Volume 133, Number 4, American Association of Orthodontist, March 2007, p.584-590

[11] Norma ASTM A967-01: “Standard Specification for Chemical Passivation Treatments for Stainless Steel Parts”. Annual Book of ASTM Standards, Volume 1.03, United States 2001, p.1

[12] COTTIS, Robert y TRURGOOSE, Stephen. Electrochemical Impedance and Noise. Manchester: NACE, 1999, p. 1-49

[13] Norma ASTM G59-97: “Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements”. Annual Book of ASTM Standards, Volume 3.02, United States, p.1

[14] Norma ASTM G102-89: “Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements”. Annual Book of ASTM Standards, Volume 3.02, United States, p.1-6

[15] Norma ASTM G61-86: “Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys”. Annual Book of ASTM Standards, Volume 3.02, United States, p.1-5

[16] ARICI, S; OZER, M; ARICI, N y GENCER, Y. “Effects of sandblasting metal bracket base on the bond strength of a resin-modified glass ionomer cement: an *in vitro* study”. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Volume 17, Number 3, Marzo 2006, p. 253-258

[17] TAVARES, Stenyo; CONSANI, Simonides; NOUER, Darcy; MAGNANI, Maria Beatriz; NOUER, Paulo y MARTINS, Laura. “Shear Bond Strength of New and Recycled Brackets to Enamel”. Journal Dental of Brazil, Volumen 17, Universidad de Campinas (UNICAMP), Brazil 2006, p. 44-48.

- [18] NEWMAN, George; NEWMAN, Richard; SUN, Benedict; JACK, JACK, Jih-Lian y OZSOYLU, Suat. "Adhesion promoters, their effect on the bond strength of metal brackets". American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Volume 104, No. 3, American Association of Orthodontists, Nueva York 1995, p.237-241
- [19] SONIS, Andrew. "Air abrasion of failed bonded metal brackets: A study of shear bond strength and surface characteristics as determined by scanning electron microscopy". American Journal of Orthodontics and Dent facial Orthopedics, Volume 110, 1996, p.96-98
- [20] CACCIAFESTA, Vittorio; SFONDRINI, Maria; MELSEN, Birte y SCRIBANTE, Andrea. "A 12 month clinical study of bond failures of recycled versus new stainless steel orthodontic brackets". European Journal of Orthodontics, Volume 26, No. 24, 2004, p.449-454
- [21] BASUDAM, Aisha y AL-EMRAN, Suliman. "The effects of in-office reconditioning on the morphology of slots and bases of stainless steel brackets and on the shear/pell bond strength". Journal of Orthodontics, Volume 28, British Orthodontics Society, 2001, p.231-236
- [22] MATASA, Claude. "Effect of electro-polishing on direct bonding orthodontic brackets". University of Medicine and Pharmacy, Bucarest, Romania. Poster 1
- [23] Norma ASTM A380-99: "Standard Practice for Cleaning, Decaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems". Annual Book of ASTM Standards, Volume 1.03, United States 1999, p.1-12
- [24] NICIC, Igno y MACDONALD, Digby. "The passivity of Type 316L stainless steel in borate buffer solution". Journal of Nuclear Materials. Volume 379, ELSEIVER, United States 2008, p.54-58
- [25] HARRADINE, Nigel. "The History and Development of Self-Ligating Brackets. Seminar Orthodontic". Seminary Orthodontic, ELSEIVER, United King 2008, p. 5-18
- [26] KELLY, Robert; SCULLY, Jhon; SHOESMITH, David y BUCHHEIT, Rudolph. Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering, New York, 2003, p.104-111

[27] ARES, A.; CARAM, R.; JAIME, M.; FERRANDINI, P.; DUTRA, A.; GUEIJMAN, S. y SCHVEZOV, C. Solidificación y microestructura de un acero inoxidable austenítico, ANALES AFA, Vol. 17, 2005, p. 240-248

[28] DEC.MEDIDA, edición de internet, sección: Segurança em Campos Eléctricos, Magnéticos e Electromagnéticos, consultada 28 Julio del 2009, <http://www.decmed.pt/index.html?downloads/nevoeiro/nevoeiro4.htm>

[29] Norma ASTM G1-90: "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens" Annual Book of ASTM Standards, Volume 3.02, United States 1999, p.1-7

[30] VANDER VORT, George. Metallography, Principles and Practice, McGraw-Hill, USA, 1984, p. 119-126

[31] GONZALEZ, J; SANTANA, F y MIRZA-ROSCA, J. "Effect of bacterial biofilm on 316 SS corrosion in natural seawater by eis, Corrosion Science". Volume 40, No. 12, Published by Elsevier Science, p. 2141-2154

ANEXOS

ANEXO A. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

Las evaluaciones que caracterizan a un metal se llevan a cabo por medio de mediciones electroquímicas, las cuales proporcionan las posibles respuestas del comportamiento de corrosión del metal ante un determinado medio, entre las que están la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, sus siglas en inglés), la Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y la Polarización Potenciodinámica Cíclica.

A.1 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

La espectroscopia de impedancia es un método electroquímico en el que una señal de corriente alterna se aplica a un electrodo, en este caso al metal de prueba, este se corroe, y su respuesta es medida también en corriente. En los cálculos realizados, los equipos las procesan en unidades de corriente-tiempo y voltaje-tiempo, proporcionando la impedancia a diferentes frecuencias [12]. Para la corriente directa la relación entre el voltaje y la corriente se obtiene de la ley de Ohm:

$$V = I \times R \quad \text{Ecu.1.0}$$

Donde V , en voltios, es el voltaje, R , en ohmios, y I , en amperios, que es la corriente. Para señales de corriente alterna,

$$V = I \times Z \quad \text{Ecu. 2.0}$$

Donde Z es la impedancia del circuito. Son la misma ecuación pero a diferencia de la resistencia, la impedancia del circuito depende de la frecuencia de la señal aplicada. Los valores de impedancia obtenidos experimentalmente se suelen representar principalmente de dos formas, mediante los llamados diagramas de Nyquist ó Bode.

El tratamiento de estos datos se puede realizarse de dos formas, ya sea obteniendo la ecuación de la función de transferencia a partir de la información

de los procesos involucrados o mediante la elaboración de un circuito equivalente que reproduzca el espectro de impedancia obtenido. Estos circuitos están formados por elementos eléctricos como resistencias y condensadores que reproducen el comportamiento de los procesos reales como la resistencia del electrolito (R_s) entre los electrodos de referencia y trabajo, la doble capa que se forma en la interfase electrodo/disolución (C_{dl}) o la transferencia de carga que ocurre durante un proceso faradaico (R_{tc}) [12].

A.2 EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL

Con este método se determinan las pendientes Tafel anódica (β_a) y catódica (β_c) de una simple curva de polarización. Esta curva conocida como diagrama de Stern, proporciona además de la tasa general de corrosión (i_{corr}), el potencial de corrosión (E_{corr}) por medio de la extrapolación lineal de las pendientes de Tafel anódica y catódica, hasta que se interceptan. Esta prueba consiste básicamente en aplicar una cierta cantidad de corriente directa (E) al metal de prueba, registrándose luego un cambio de potencial (ΔE) con respecto a un electrodo de referencia. Entonces la resistencia a la polarización (R_p), del metal corroído está relacionada con la densidad de corrosión (i_{corr}), por medio del Coeficiente de Stern-Geary (B), según la **Ecu. 3.0**:

$$i_{corr} = 10^6 B / R_p \quad \text{Ecu. 3.0}$$

Donde R_p está en unidades de $\text{Ohm}\cdot\text{cm}^2$, i_{corr} en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y B en voltios. Además el Coeficiente de Stern-Geary está relacionado con las pendientes anódica (β_a) y catódica (β_c) de la Extrapolación Tafel, respectivamente:

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad \text{Ecu. 5.0}$$

Las unidades de las pendientes de Tafel están en unidades de voltios. Para determinar la velocidad de corrosión (Corrosion Rate, CR) en mm/año se determina por medio de la **Ecu. 6.0**, donde EW es el peso equivalente de las especies corroídas en gramos, y ρ es la densidad del material corroído en g/cm^3 [14]:

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \frac{i_{corr} EW}{\rho} \quad \text{Ecu. 6.0}$$

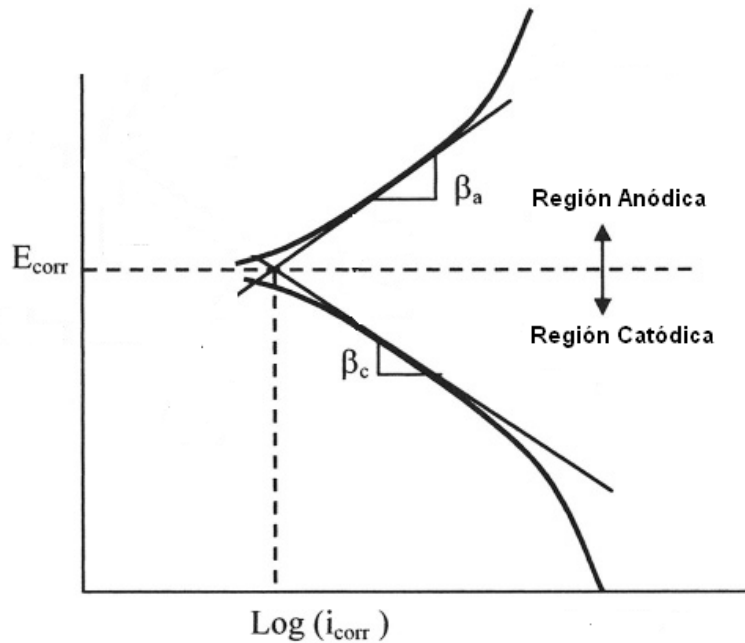


Figura A.1 Curva esquemática de la polarización mostrando la Extrapolación Tafel

A.3 POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA CÍCLICA

Es un método por el cual se evalúa esencialmente la corrosión localizada (corrosión por picaduras y grietas) en un material de prueba, sin embargo, está diseñada específicamente para las aleaciones de hierro y níquel en ambientes conformados por cloruros [15]. Consiste en aplicar un barrido de potencial al espécimen a evaluar iniciando en el E_{corr} , continuando en la dirección positiva (anódica) de la curva de polarización hasta que ocurre un incremento significativo en la corriente. Finalmente cuando el barrido alcanza un valor de densidad de corriente específico, se invierte y se inicia el barrido en dirección negativa (catódica).

Para precisar si hay o no picaduras, se determinan dos potenciales específicos:
 1) el Potencial de Picadura (E_p) que indica el límite por encima del cual se inicia

la formación de picaduras, y 2) el Potencial de Repasivación (E_{rp}) que se refiere al límite por debajo del cual el metal permanece pasivo en cualquier circunstancia, los cuales se observan en la siguiente gráfica.

Dichos potenciales tienen las siguientes orientaciones sobre la probabilidad de la aparición de las picaduras:

- ✓ Cuanto menor sea la diferencia $E_p - E_{rp}$ mayor es la resistencia a la corrosión por picaduras y su aparición y es menos probable.
- ✓ Si E_{rp} es cercano al E_{corr} , se provee un rango muy pequeño de protección.
- ✓ Si $E_{rp} < E_{corr}$, el metal permanecerá en estado activo, incrementándose la corrosión por picaduras [26].

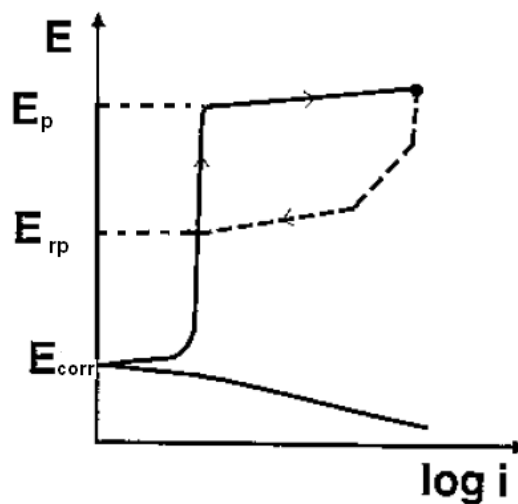


Figura A.2 Curva Esquemática de la Polarización Cíclica

ANEXO B. FOTOGRAFÍAS Y MICROGRAFÍAS DE LOS BRACKETS

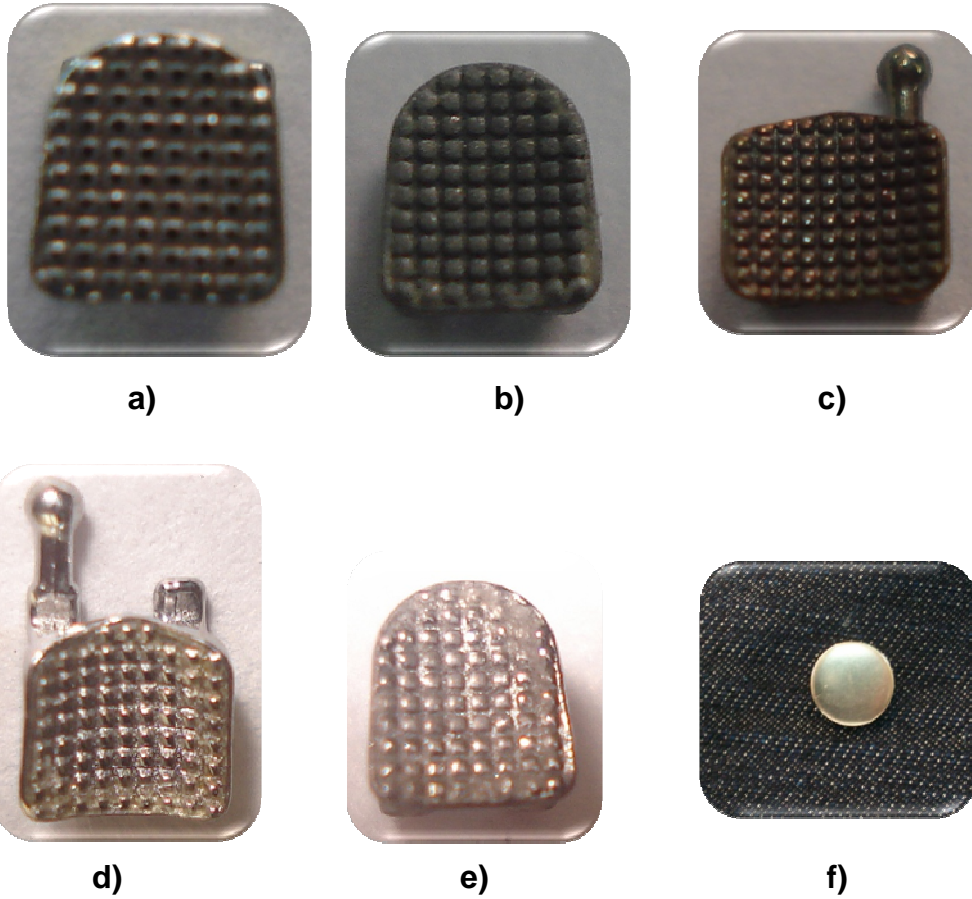
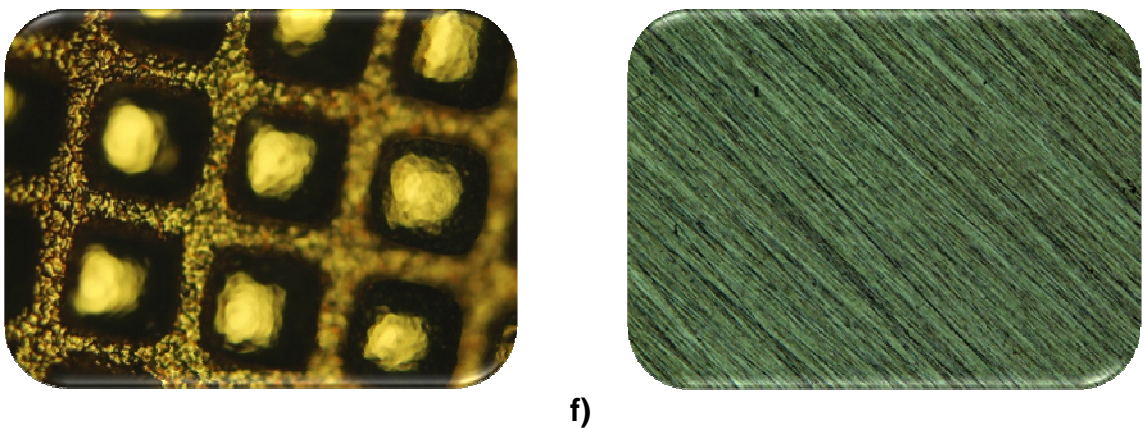
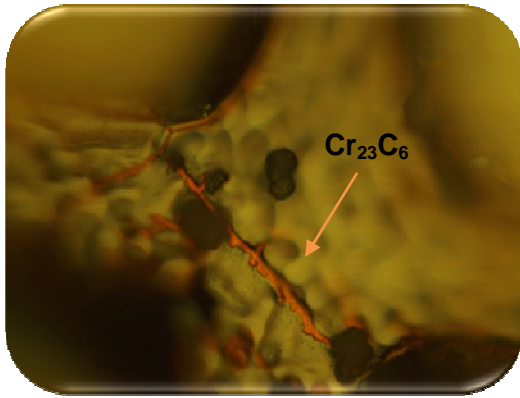


Figura B.1 Fotografías con Cámara Sony 8 MPX, a los Brackets: **a)** Nuevo, **b)** Arenado, **c)** Flameado, **d)** Electropulido + Sin Pasivación, **e)** Electropulido + Pasivación y **f)** Probeta en estado de entrega

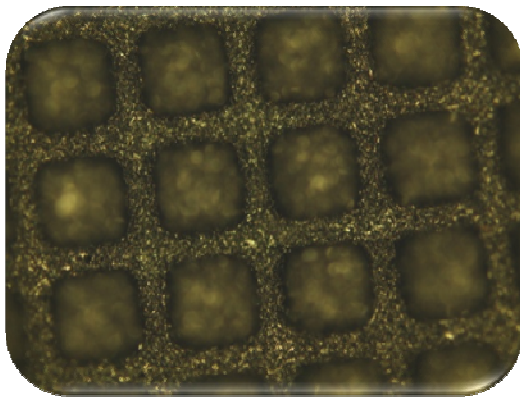




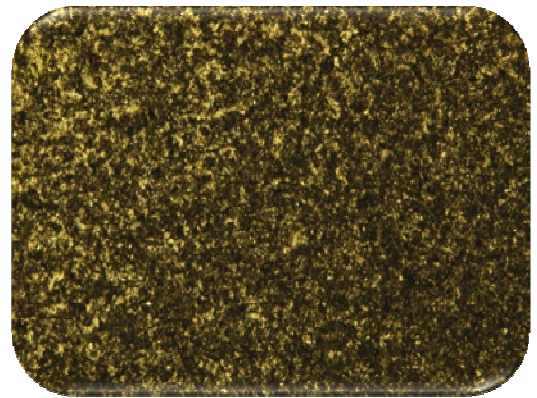
g)



Figura B.2 Bracket y Probeta, Nuevo: f) 10X y g) 50X



h)



i)

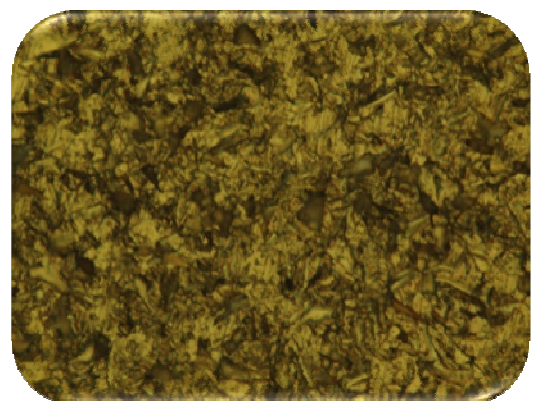
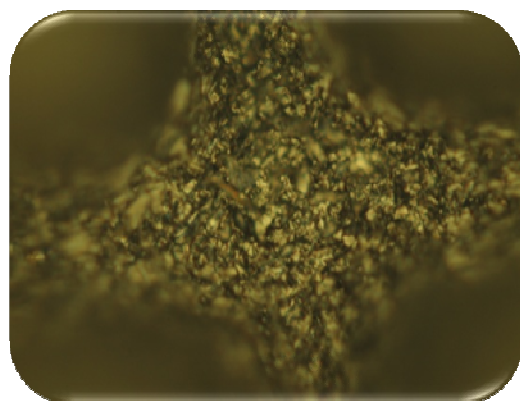
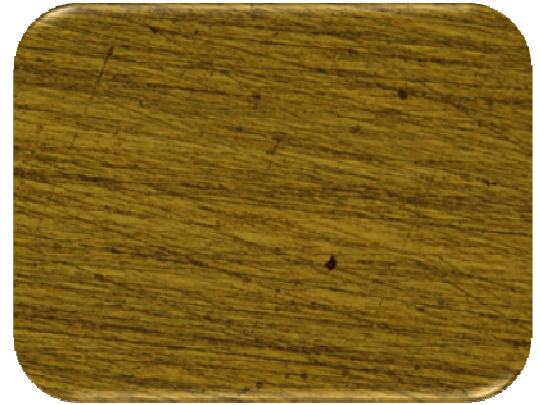
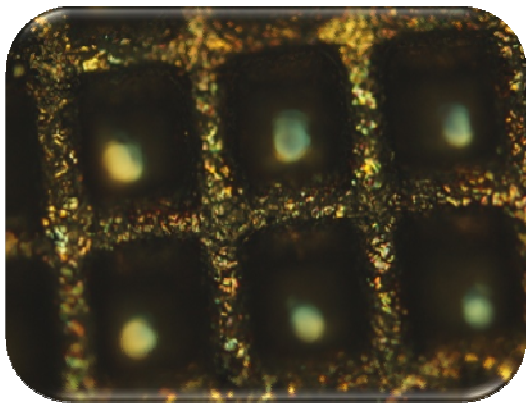
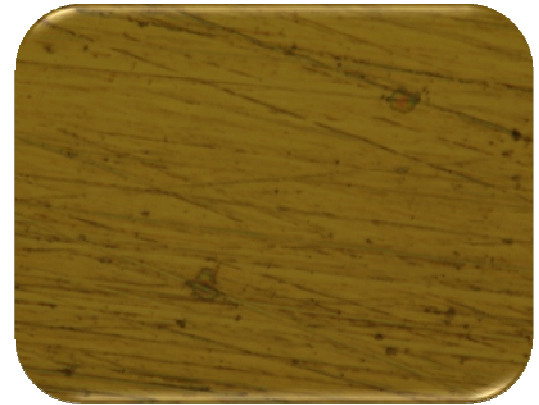
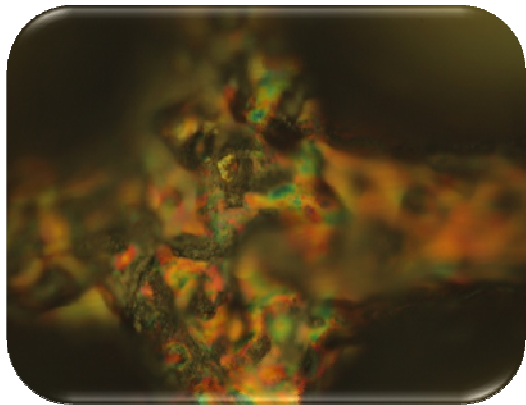


Figura B.3 Bracket y Probeta, Arenado: h) 10X y i) 50X

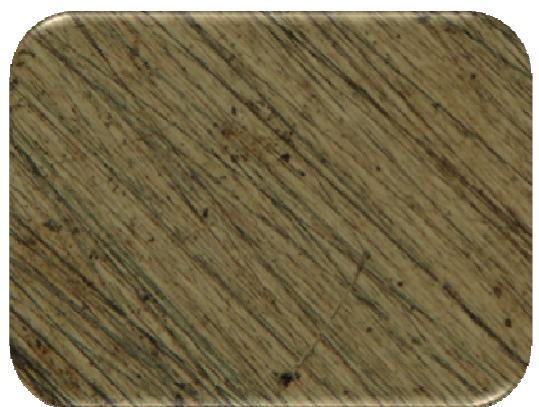
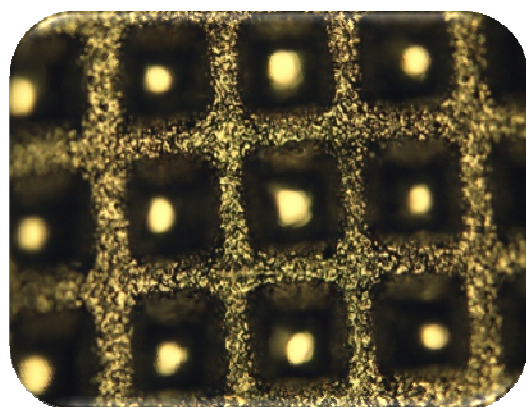


j)

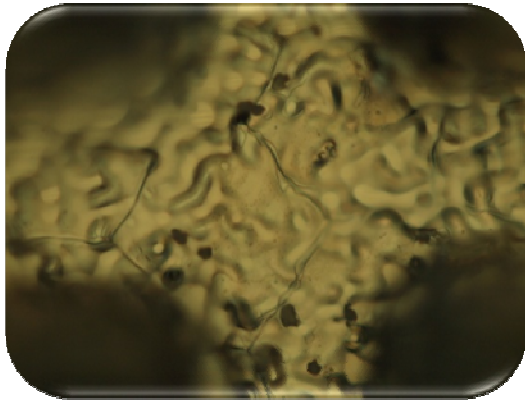


k)

Figura B.4 Bracket y Probeta, Flameado: **j)** 10X y **k)** 50X

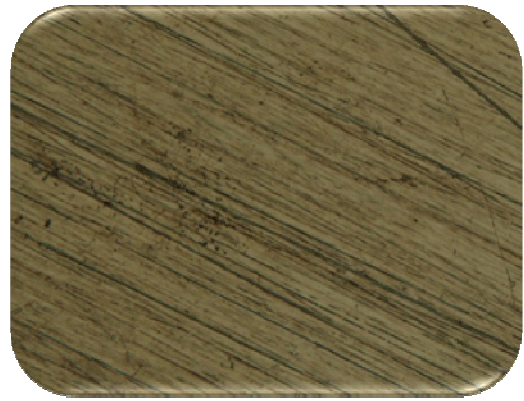
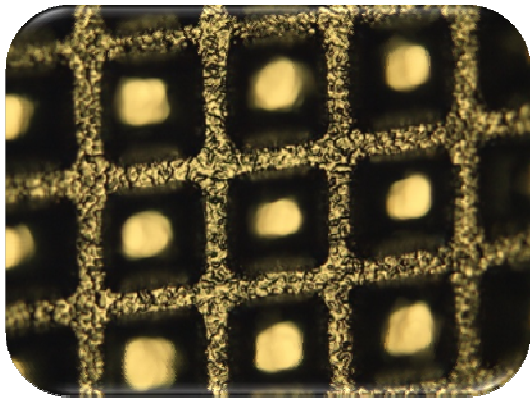


k)

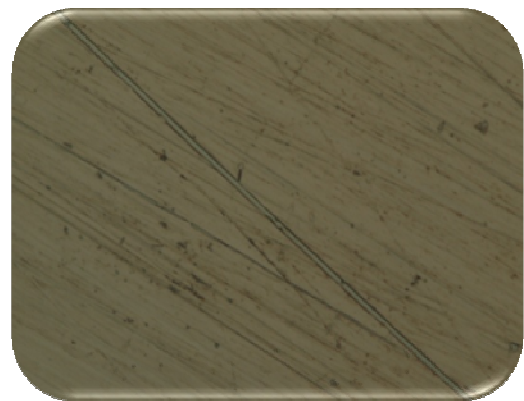
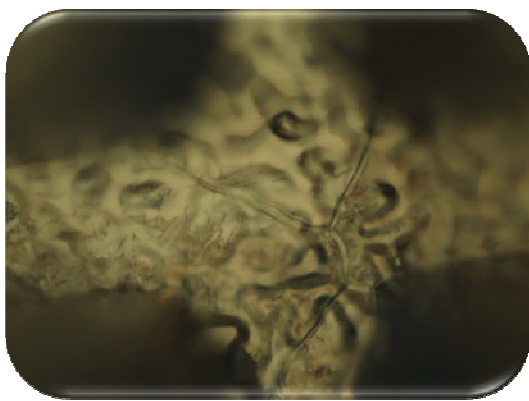


l)

Figura B.5 Bracket y Probeta, Electropulido + Sin Pasivación: k) 10X y l) 50X



i)



j)

Figura B.6 Bracket y Probeta, Electropulido + Pasivación i) 10X y j) 50X

ANEXO C. DIAGRAMAS DE BODE Y NYQUIST JUNTO CON LA SIMULACIÓN EN Z VIEW

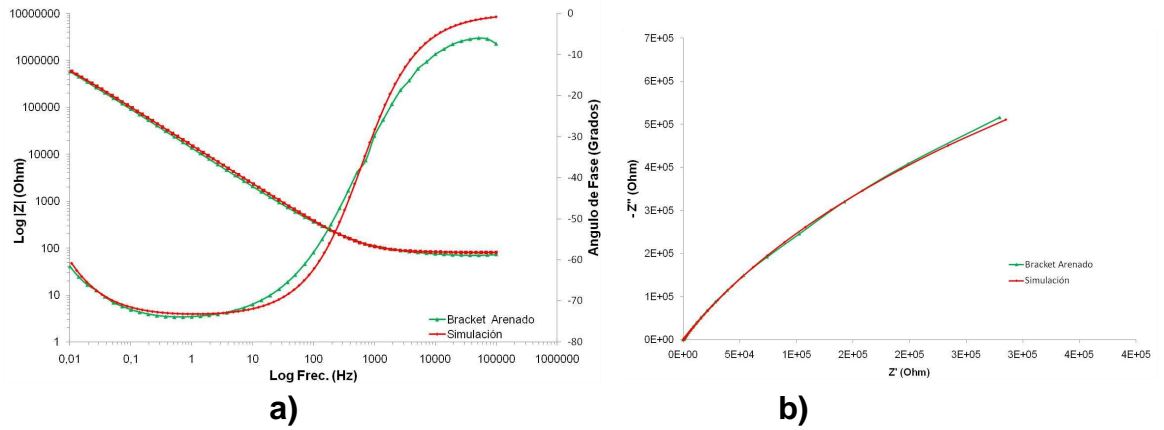


Figura C.1 Diagrama de a) Bode y b) Nyquist del Bracket Arenado

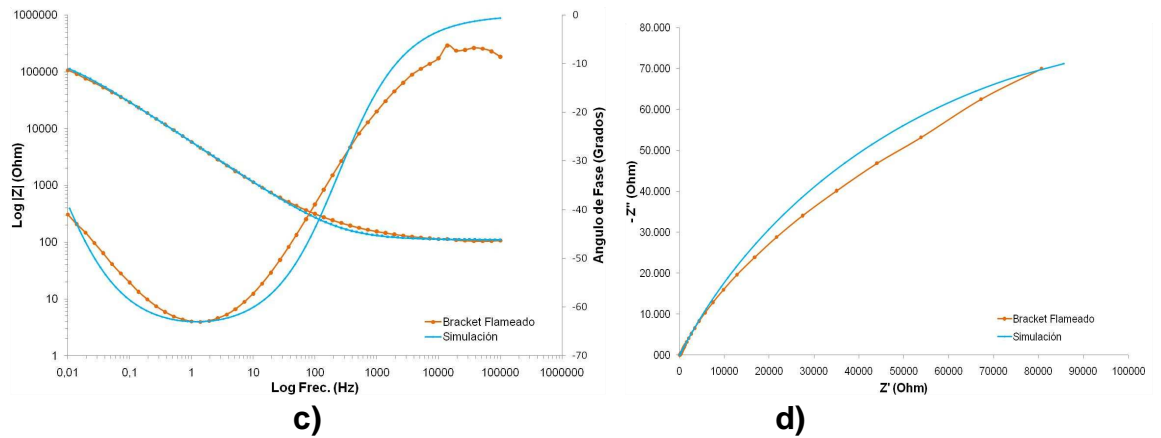


Figura C.2 Diagrama de c) Bode y d) Nyquist del Bracket Flameado

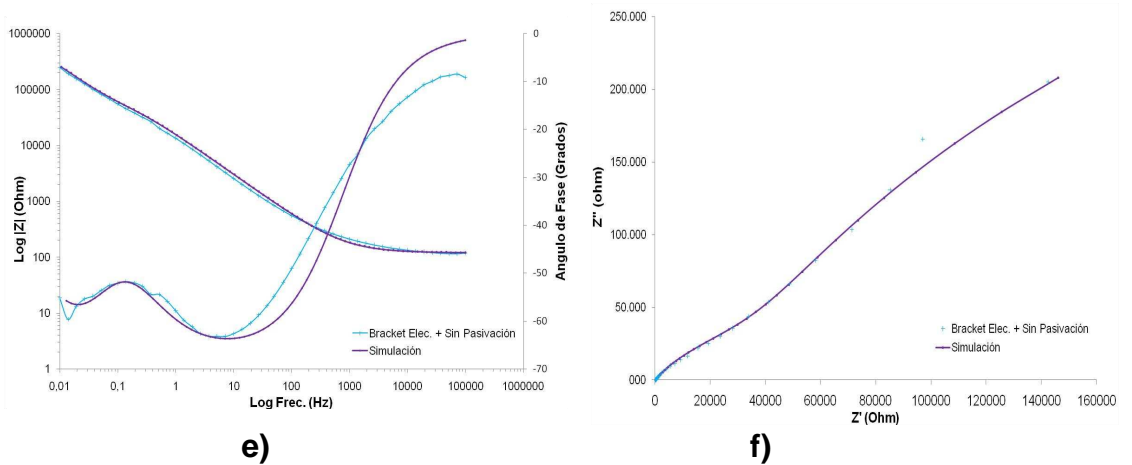


Figura C.3 Diagrama de e) Bode y f) Nyquist del Bracket Electropulido + Sin Pasivación

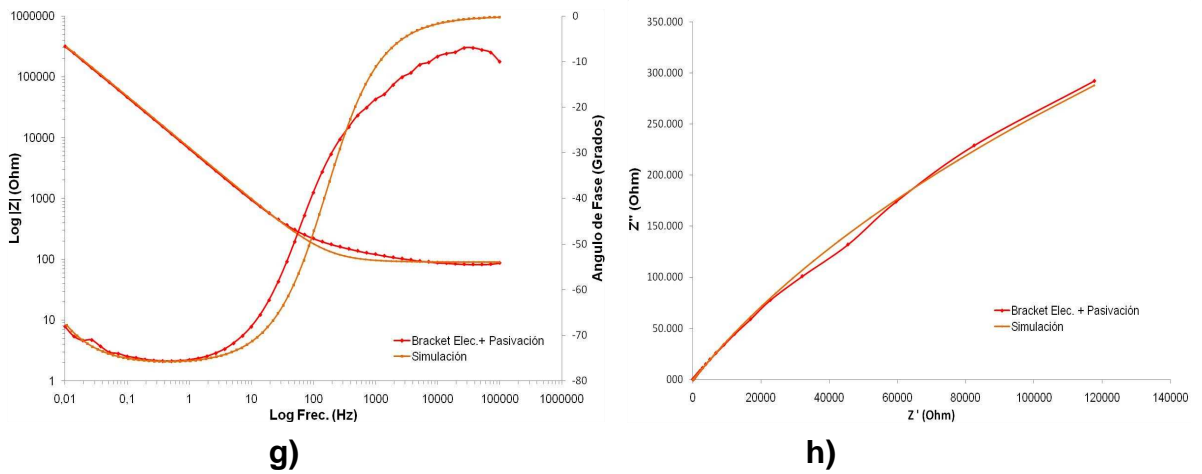


Figura C.4 Diagrama de **g)** Bode y **h)** Nyquist del Bracket Electropolido + Pasivación

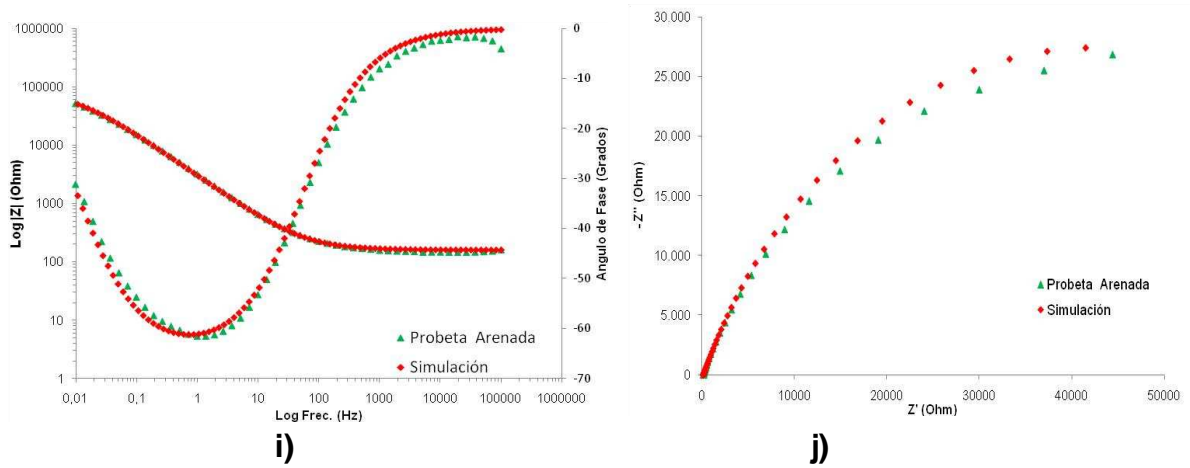


Figura C.5 Diagrama de **i)** Bode y **j)** Nyquist de la Probeta Arenada

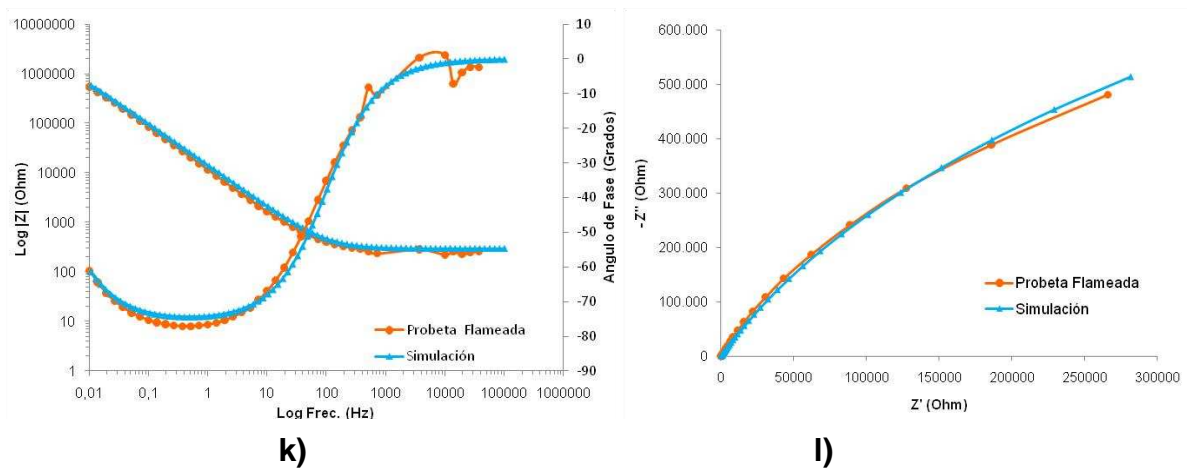


Figura C.6 Diagrama de **k)** Bode y **l)** Nyquist de la probeta Flameada

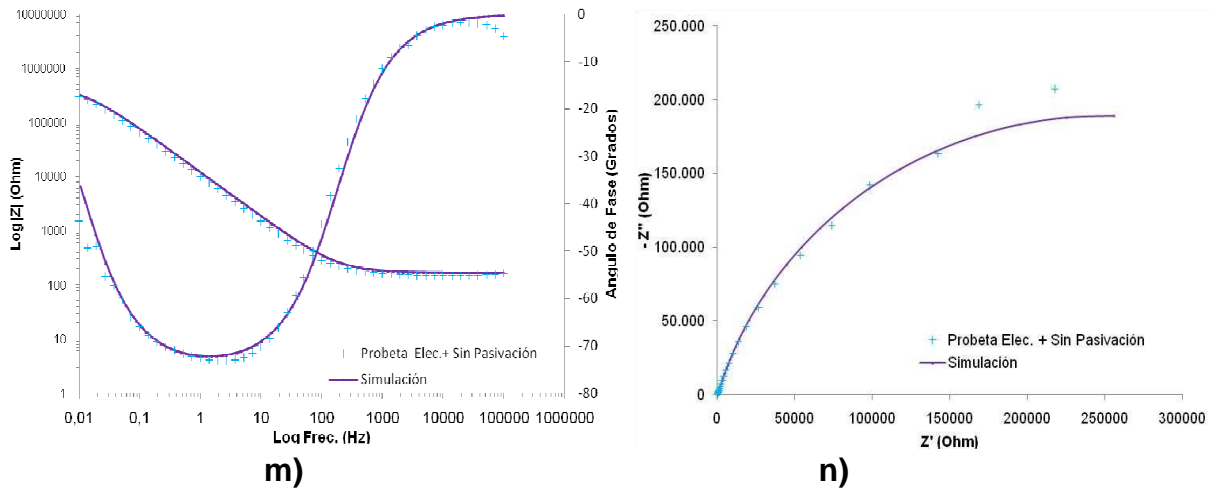


Figura C.7 Diagrama de m) Bode y n) Nyquist de la probeta Elec. + Sin Pasivación

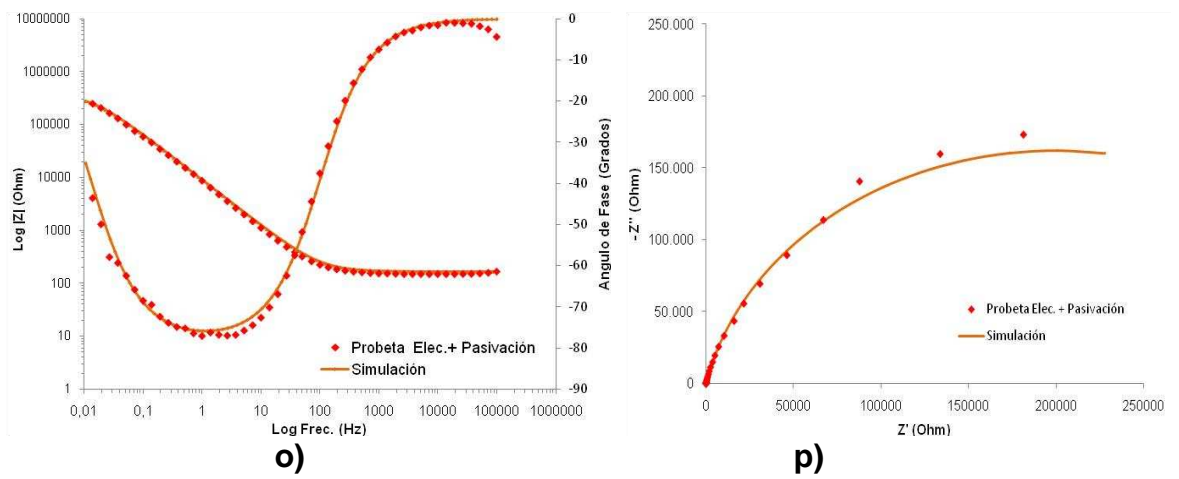


Figura C.8 Diagrama de o) Bode y p) Nyquist de la probeta Elec. + Pasivación