

Agradecimientos

Al Profesor Juan Carlos López, por su inmenso interés en enseñarme y orientarme. Gracias por brindarme su entera disposición y entusiasmo durante la realización de este proyecto.

A la Profesora Marlyn Berríos, por su gran aporte desde el punto de vista metodológico, académico y humano.

A Julio Hernández, Manuel Unda, César Izaguirre, Carlos Bonilla y Francis Vejar, quienes muy amablemente me permitieron realizar las experiencias de laboratorio sin las cuales hubiese podido lograr terminar mi trabajo de grado.

Al Profesor Luis Betancourt por su valiosa colaboración.

A los Laboratorios: QUEXA, de Membranas, de Química General, de Alimentos, de Petróleo, FIRP, de Histología y de Fisiología de la ULA.

Al Ing. Alirio y a todo el Centro de Microscopía Electrónica “Ernesto Palacios Pru” de la Universidad de los Andes, por todo el apoyo prestado a este proyecto de investigación.

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve *Índices*

Índice de Contenido

Agradecimientos	1
Índices	2
Índice de Contenido	3
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras	6
Resumen	10
I. Introducción	12
II. Objetivos	16
Generales:	16
Específicos:	16
III. Marco Teórico.....	18
III.1. Fenómenos Eléctricos Interfaciales	18
III.1.1. Generalidades.....	18
III.2. Fenómenos Interfaciales de Equilibrio	32
III.2.1. Energía Superficial	33
III.2.2. Tensión Superficial	33
III.2.3. Cohesión y Adhesión	35
III.2.4. Capilaridad	36
III.2.5. Mojabilidad	38
III.2.7. Adsorción	39
III.2.8. Detergencia.....	42
III.2.9. Permeabilidad.....	48
III.2.10. Flotación.....	49
III.3. Dispersiones.....	51
III.4. Generalidades Dentales.....	53
III.4.1. El Diente	53
III.4.2. Tejidos dentales.....	54
III.5. Generalidades sobre la Adhesión Dental:	57
III.5.1. Principios de la Adhesión como Fenómeno Interfacial.....	57
III.5.2. Fundamentos de la Adhesión Dental	59
III.5.3. Mecanismos de Adhesión Odontológica	60
III.5.4. Sistemas de Adhesión Dental	62
III.5.5. Adhesión Dentinaria como Problema Odontológico	65

IV. Antecedentes	69
V. Metodología Experimental	74
V.1. Resumen.....	74
V.2. Reactivos y Productos Empleados	74
V.2.1. Electrolitos	74
V.2.2. Surfactantes.....	75
V.2.3. Aceites y Alcoholes.....	76
V.2.4. Sustrato (Dentina).....	77
V.3. Materiales, Instrumentos, Dispositivos y Equipos.....	78
V.3.1. Materiales e Instrumentos de Laboratorio.....	78
V.3.2. Balanzas Analíticas.....	78
V.3.3. Dispositivos y Equipos Odontológicos.....	79
V.3.4. Molino de Bola.....	81
V.3.4. Microscopio Electrónico de Barrido	82
V.3.5. Microscopio Óptico.....	82
V.3.6. Zetámetro.....	83
V.3.7. Turbidímetro	84
V.3.8. pHmetro	84
V.4. Metodología Experimental.....	84
V.4.1. Fase de Preparación de Agentes de Limpieza y del Sustrato (Dentina)	84
V.4.2. Preparación de la Dentina	89
V.4.3. Fase Experimental	90
VI. Resultados y Discusión de Resultados.....	96
VI.1. Evaluación del poder de remoción del barrillo dentinario mediante la observación en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).....	96
VI.1.1. Diseño Experimental 1:.....	97
VI.1.2. Diseño Experimental 2:.....	104
VI.1.3. Diseño Experimental 3:.....	106
VI.1.4. Diseño Experimental 4:.....	107
VI.1.5. Diseño Experimental 5:.....	113
VII. Conclusiones.....	117
VI. Referencias Bibliográficas.....	119
Fuentes Electrónicas.....	123
Anexos	127

Índice de Tablas

Tabla III. 1: Estabilidad de las dispersiones coloidales en función del potencial zeta (“Zeta potencial”, s.f.)	29
Tabla III. 2: Clasificación de las dispersiones según las fases combinadas (Krestonosich et al., 1992).	52
Tabla III. 3: Condiciones de las superficies dentales sujetas a adhesión (Esmalte y dentina), (Adhesivos, s.f.)	60
Tabla III. 4: Diferentes deneraciones de adhesivos dentales (Adhesivos, s.f.).	65
Tabla VI. 1: Escala de medición del poder de remoción de las distintas sustancias limpiadoras propuestas.....	97
Tabla VI. 2: Evaluación del efecto de la carga de los iones sobre el poder de remoción del barrillo dentinario	98
Tabla VI. 3: Evaluación del efecto de la concentración de los iones (Na ⁺) sobre el grado de limpieza del barrillo dentinario	99
Tabla VI. 4: Efecto del pH sobre la remoción del barrillo dentinario.....	101
Tabla VI. 5: Evaluación del efecto de la detergencia sobre el grado de limpieza promedio del barrillo dentinario.	103
Tabla VI. 6: Efecto de los sistemas oleosos y emulsionados sobre el grado de limpieza del barrillo dentinario..	105
Tabla VI. 7: Efecto de los tratamientos Buffer – DTAB sobre la remoción de la capa de barrillo dentinario	106
Tabla VI. 8: Evaluación del efecto de la carga y concentración de electrolitos en la remoción del barrillo	108
Tabla VI. 9: Efecto de la adición de los tratamientos correspondientes al diseño factorial 2 ⁴⁻¹ sobre la remoción de barrillo dentinario	114

Índice de Figuras

Figura III. 1: Fuerzas de Keesom (Steenbecker, 2003).....	19
Figura III. 2: Fuerzas de Debye (Steenbecker, 2003)	19
Figura III. 3: Fuerzas de London (Steenbecker, 2003).....	20
Figura III. 4: Puentes de Hidrógeno (Steenbecker, 2003).....	21
Figura III. 5: Modelo de Helmholtz de la doble capa eléctrica. a) Distribución de contraiones en la vecindad de la superficie cargada; b) Variación del potencial eléctrico con la distancia desde la superficie cargada (Rosen, 2004)	22
Figura III. 6: Modelo de Gouy – Chapman de la doble capa eléctrica. a) Distribución de contraiones en la vecindad de la superficie cargada; b) Variación del potencial eléctrico con la distancia desde la superficie cargada (Rosen, 2004)	23
Figura III. 7: Modelo de Stern de la doble capa eléctrica. a) Distribución de contraiones en la vecindad de la superficie cargada; b) Variación del potencial eléctrico con la distancia desde la superficie cargada (Rosen, 2004)	23
Figura III. 8: Modelo de Stern de la doble capa eléctrica que muestra la inversión del signo de la superficie cargada como consecuencia de la adsorción de los contraiones en la capa de Stern (Rosen, 2004).	24
Figura III. 9: Curvas de Energía Potencial en función de la distancia entre partículas (Rosen, 2004).....	26
Figuras III. 10: Curvas de Energía Potencial en función de la distancia entre partículas y la relación tamaño de partícula – espesor de la doble capa eléctrica $a/(1/\kappa) = \kappa a$. a) $\kappa a \ll 1$; b) $\kappa a \gg 1$ (Rosen, 2004).....	27
Figura III. 11: Representación esquemática de la doble capa eléctrica según Stern (Torral, 1973)	28
Figura III. 12: Representación del Potencial Zeta en la doble capa eléctrica.....	29
Figura III. 13: Curva de Potencial Zeta vs. pH del medio dispersante	32
Figura III. 14: Fuerzas atractivas que actúan sobre las moléculas en el seno del líquido y en la superficie libre	34
(Antón, 2005)	
Figura III. 15: Fuerzas atractivas que actúan sobre las moléculas en el seno del líquido y en la interfase (Antón, 2005)	35
Figura III. 16: Cohesión y Adhesión (Salager, 2002).....	35
Figura III. 17: Forma de la interfase fluido-fluido en tubos verticales de distintos diámetros al equilibrio mecánico en ausencia de movimiento (Salager, 2002).....	37
Figura III. 18: Forma de la interfase fluido-fluido en tubos verticales de distintos diámetros al equilibrio mecánico en ausencia de movimiento (Salager, 2002).....	37
Figura III. 19: Mojabilidad y ángulo de contacto (Salager, 2002).	38
Figura III. 20: Fenómeno de adsorción con sus distintos elementos (Hemming, D. y Degel, J., s.f.).....	41
Figura III. 21: Formación de la Doble Capa Eléctrica entre las superficies Sustrato - Sucio	45
Figura III. 22: Desestabilización de la adhesión del sucio – sustrato (Salager, 2002).....	48

Figura III. 23: Hidrofilicidad o hidrofobicidad de una superficie (Salager y Forgiarini, 2007)	49
Figura III. 24: Flotabilidad de burbujas o gotas de aceite cuando estas son más pequeñas que las partículas (Salager y Forgiarini, 2007).	49
Figura III. 25: Flotabilidad de burbujas o gotas de aceite cuando estas son más grandes que las partículas (Salager y Forgiarini, 2007).	50
Figura III. 26: Captura de una partícula por una burbuja o gota (Salager y Forgiarini, 2007).	51
Figura III. 27: Tipos de emulsiones (Salager, 1993).	53
Figura III. 28: Estructura del diente ("Caries",s.f.)	54
Figura III. 29: Dentina Intertubular y Dentina Peritubular (Schwartz, 1996).	56
Figura III. 30: Ángulo de contacto entre adhesivo y adherente ("Capacidad",s.f.)	58
Figura III. 31: Adhesión macromecánica ("Provisionales", s.f.)	61
Figura III. 32: Adhesión micromecánica ("Profilaxis", s.f.)	61
Figura III. 33: Representación esquemática del proceso de grabado ácido del esmalte. A) Las barras verticales representan una superficie limpia compuesta de varillas de esmalte. B) El grabado disuelve algunas de las varillas de esmalte, creando espacios entre ellas en la superficie. C) El adhesivo fluye en los espacios entre las varillas, se endurece y cubre la superficie con una capa de resina. El adhesivo se cierra de manera micromecánica en los espacios existentes entre las varillas de esmalte (Gladwin y Bagby, 2001).	62
Figura III. 34: Dentina cubierta con capa de barrillo dentinario y dentina sin la capa de barrillo (Jovel, J. y Sabillón, I., s.f.)	67
Figura V. 1: Algunas soluciones electrolíticas preparadas	74
Figura V. 2: Balanza Denver Instrument	79
Figura V. 3: Turbina	79
Figura V. 4: Micromotor	79
Figura V. 5: Piedras de diamante de grano grueso	80
Figura V. 6: Scaler	80
Figura V. 7: Jeringa triple	80
Figura V. 8: Silla odontológica	81
Figura V. 9: Molino de Bola	81
Figura V. 10: Recipientes de Acero	82
Figura V. 11: Microscopio de Barrido Electrónico	82
Figura V. 12: Microscopio Óptico	83
Figura V. 13: Zetámetro Delsa 440SX	83
Figura V. 14: a) Turbidímetro; b) pHmetro	84
Figura VI. 1: Efecto de la carga sobre la remoción de la capa residual dentinaria	98

Figura VI. 2: Efecto de la concentración de electrolito en la remoción de la capa residual dentinaria (Diseño experimental 1).....	100
Figura VI. 3: Efecto del pH en la remoción del barrillo dentinario (Diseño Experimental 1).....	101
Figura VI. 4: Potencial zeta vs. pH del medio (Diseño Experimental 1).....	102
Figura VI. 5: Grado de limpieza de los distintos surfactantes empleados (Diseño Experimental 1).....	103
Figura VI. 6: Microfotografía de la superficie dentinaria tras la limpieza con la Microemulsión (Diseño Experimental 1).....	104
Figura VI. 7: Grado de limpieza de los distintos agentes empleados en el diseno experimental 3.....	105
Figura VI. 8: Grado de limpieza de los distintos agentes empleados en el diseno experimental 3.....	106
Figura VI. 9: Representación gráfica propia de un diseño experimental factorial.....	107
Figura VI. 10: Variación del grado de limpieza con respecto a la concentración de las sales empleadas.....	109
Figura VI. 11: Variación del pH con la concentración del electrolito.....	110
Figura VI. 12: Bosquejo del mecanismo microscópico molecular que explica el por qué los electrolitos limpian el barrillo dentinario mejor que lo que lo hace el agua.....	111
Figura VI. 13: Bosquejo del mecanismo microscópico molecular mediante el cual se explica el cómo los ácidos remueven el barrillo dentinario con suma facilidad.....	112
Figura VI. 14: Evaluación de la estabilidad de la dispersión con respecto a la concentración de las sales empleadas para un tiempo de 5 minutos.....	113
Figura VI. 15: Grado de limpieza de los tratamientos empleados en el diseño experimental 5.....	115
Figura VI. 16: Estabilidad de los distintos tratamientos del diseño experimental 5.....	115

www.bdigital.ula.ve *Resumen*

Resumen

Teniendo en cuenta la importancia que representa para la odontología restauradora determinar y controlar los distintos factores que pueden influenciar la adhesión entre la resina y las superficies del esmalte y la dentina, en la presente investigación se propuso estudiar uno de los múltiples factores que la afectan: la remoción del barrillo dentinario. Se describieron algunos mecanismos de naturaleza microscópica – molecular mediante los cuales es posible remover la capa residual dentinaria y se determinó que el pH es uno de los principales factores que promueven su remoción. Los resultados se obtuvieron tras la implementación de diversas técnicas experimentales: evaluación de la limpieza mediante un criterio que permitió convertir la información cualitativa (microfotografías) proveniente del microscopio electrónico de barrido (MEB), en cuantitativa (número), evaluación del poder dispersante mediante la observación al microscopio óptico, evaluación del poder dispersante mediante mediciones de turbidez y del Potencial Zeta.

Para explicar algunos de los fenómenos (y sus mecanismos) involucrados en la remoción del barrillo dentinario, se ejecutaron cinco diseños experimentales, en los que se empleó como sustratos la superficie de dentina cortada previamente fresada y la dentina pulverizada. El primero de los diseños implementados fue de naturaleza netamente exploratoria, el cual permitió conocer más acerca de los factores que determinan el grado de limpieza. Para ello, se aplicó una variedad de tratamientos, consistentes de soluciones salinas (NaCl , BaCl_2 y FeCl_3), sistemas buffer acetato de sodio-ácido acético, surfactantes (catiónicos, noiónicos y aniónicos) y microemulsión. Además, se midió el potencial zeta de las soluciones buffer y se estudió su poder dispersante mediante la medición de la turbidez en el tiempo.

En el segundo diseño experimental se estudió el efecto de diversas soluciones oleosas y sistemas emulsionados y se evaluó su poder de limpieza mediante observaciones al MEB. El tercer diseño experimental se basó en la aplicación de 4 tratamientos contentivos de soluciones buffer, surfactantes y agua, todos producto de un diseño experimental factorial 2^2 . Luego se evaluó el poder de remoción del barrillo tras la observación al MEB. En el cuarto diseño experimental, se estudió el efecto de la carga y la concentración de electrolitos, sobre la remoción de la capa residual dentinaria. Para tal fin, se realizaron observaciones al MEB y se estudió el poder dispersante de las soluciones mediante mediciones de turbidez. El quinto experimento consistió en la aplicación de 8 tratamientos producto de un diseño experimental factorial 2^{4-1} , seguido por la evaluación del grado de limpieza al MEB. También se estudió el poder de dispersión mediante la medición de la turbidez.

Tras la ejecución de las experiencias descritas, se dedujo que la remoción del barrillo se logra, básicamente, por la activación de la superficie de las partículas debido a la adsorción química de los iones hidronios, de manera que el pH, constituye el factor principal que promueve una variedad de fenómenos a nivel microscópico-molecular que favorecen el proceso de limpieza del barrillo de la superficie dentinaria.

www.bdigital.uia.ve ***I. Introducción***

I. Introducción

La odontología restauradora es una importante rama de la odontología que ha alcanzado un nivel de desarrollo tal que le cambia para bien la vida a millones de personas cada año, pues, se encarga de devolver el normal funcionamiento a los dientes que por una u otra razón lo han perdido de forma parcial o total. Además, investigaciones asociadas han conducido al desarrollo de tecnologías dirigidas a mejorar de manera notable la estética bucal, lo cual tiene un impacto tremendo en la psiquis de los pacientes que reciben tratamiento (Henestroza, 2003). Sin embargo, a pesar de los grandes logros de la odontología restauradora, todavía existe un sin número de problemas por resolver; como por ejemplo, aquellos relacionados con la restauración de piezas dentales que sufren de caries o aquellos en los que el tejido dental se ha perdido por otras múltiples razones. Una de las técnicas actuales más empleadas para resolver este tipo de problemas es limpiar la zona afectada de la pieza dental por medio de una fresa neumática refrigerada con agua que, además, ayuda a remover gran parte del material cortado. Los residuos remanentes de dicho proceso se remueven mediante grabado ácido. Luego se aplica un material fotopolimerizable que se adhiere, por diversos mecanismos tanto al esmalte como a la dentina. Finalmente, se aplica, una resina (material compuesto), con cualidades mecánicas y físicas, similares en apariencia a la del diente, que se adhiere al adhesivo y al que se le da la forma de la porción del diente restaurado (Eick, Gwinnett, Pashley y Robinson, 1997). La experiencia muestra que el éxito de dicha adhesión se ve fuertemente influenciado por la efectividad con que la resina se adhiera al tejido dental (esmalte y dentina) (Pashley, 1995). Más aún, se sabe que la adhesión al esmalte siempre es buena, no siempre a la dentina. Se cree que la razón de esto último es que el tratamiento previo a la adhesión, no siempre es capaz de remover por completo el barrillo dentinario, material residual que permanece adherido a la superficie del diente después del fresado y que, por tanto, es capaz de afectar negativamente la adhesión (Steenbecker, 2003). En tal sentido, es de gran valor conocer los diferentes factores, fenómenos y aspectos mediante los cuales el barrillo dentinario se remueve de la superficie de los dientes dejándola acondicionada para que la resina se adhiera a ella.

Tradicionalmente, para acondicionar las superficies tanto del esmalte como de la dentina se ha empleado, con ciertas variantes, la técnica de grabado ácido propuesta por Buonocore (1955), que consiste en la aplicación de ácido fosfórico con la finalidad de limpiar el barrillo dentinario y conferirle rugosidad a la superficie, por efecto de la desmineralización del tejido; cabe mencionar que, aún hoy en día, esta técnica es la preferida por odontólogos en todo el mundo. El mecanismo microscópico molecular mediante la cual el ácido limpia el barrillo dentinario, sin embargo, no se conoce a cabalidad,

aunque se cree que uno de sus mecanismos predominante es el de solubilización del material sólido (barrillo dentinario). Berríos et. al. (2009) contradicen tal mecanismo.

La *capa superficial de residuo, barrillo dentinario o smear layer*, que se produce como consecuencia de la preparación dentinaria con instrumentos rotatorios, provoca un taponamiento de los túbulos dentinarios impidiendo entonces el flujo posterior de resina a través de ellos, lo que trae como consecuencia poca retención de la misma y por ende una adhesión muy deficiente. Un sinnúmero de investigadores se han encargado de proponer diversas técnicas de acondicionamiento dentinario que permiten solventar el problema de la *capa de barrillo dentinario o smear layer*. Fusuyama (1980) fue el primero en preconizar que el tratamiento ácido de la superficie dentinaria, lejos de perjudicarla, favorecía su adhesividad, porque con esto se eliminaba el residuo dentinario y se permitiría el ingreso del adhesivo en los túbulos, quedando trabado micro-mecánicamente dentro de ellos luego de su polimerización; sin embargo, un tratamiento ácido a nivel dentinario resulta agresivo, ya que promueve la desmineralización del diente y el deterioro de la materia viva.

Brännström y Johnson (1974) emplearon agentes de acondicionamiento de naturaleza desmineralizante (ácido cítrico 50%p/v, ácido fosfórico 50%p/v, mezcla ácido fosfórico 50%p/v-ZnO 7%p/v y ácido láctico 20%p/v) y no desmineralizante (agua, mezcla éter-acetona, mezclas peróxido de hidrógeno-alcohol y solución microbicida 3%p/v NaF) y encontraron que aunque los agentes desmineralizantes removieron la totalidad de la capa de residuo dentinario, también lograron abrir y ensanchar las aberturas de los túbulos, lo cual se consideró como un efecto indeseable, ya que en investigaciones anteriores se había demostrado que el taponamiento de los túbulos prevenía el crecimiento de bacterias dentro de sí mismos (Vojinovic, Nyborg y Brännström, 1973). Por otra parte, la solución microbicida dio un mejor resultado ya que observaron un buen efecto limpiador sin abrir o ensanchar en demasía los túbulos dentinarios.

Tani Y. y Togaya T. (1995) en su investigación exploraron métodos de pre-tratamiento de la superficie dentinaria sin la aplicación de ácidos. Trataron las muestras dentinarias con una solución acuosa diluida de tiocianato de potasio (KSCN) y observaron que la capa de residuo se removió satisfactoriamente. No obstante, al añadir sales metálicas trivalentes (FeCl_3 , $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2$, $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$), la elución de los taponamientos dentinarios decreció y los túbulos permanecieron muy cerrados.

Ayad M. (2001) empleó distintos agentes ácidos (ácido poliacrílico al 25%p/v, ácido fosfórico al 10%p/v, ácido cítrico al 10%p/v, ácido láctico al 20%p/v y ácido fosfórico al 32%p/v) y encontró que la extensión de la remoción de la capa de residuo dentinario y por ende el proceso de adhesión ulterior, se ven afectados de alguna manera por el pH y el tipo de solución ácida empleada. Observó que con ácido láctico al 20%p/v (pH=1,40) y ácido fosfórico al 32%p/v (pH=0,16), los túbulos se abrieron casi

completamente y también notó una importante pérdida de tejido peritubular (desmineralización), aunque en el primero de los casos dicho efecto fue mucho menos evidente.

Barros, J.A., Myaki S.I., Nör J.E. y Peters, M.C. (2005) estudiaron el efecto del material de fresado y el acondicionamiento sobre la superficie de la dentina. Emplearon ácido fosfórico al 36%p/v y un acondicionador sin enjuagado, el cual es un modificador de la capa de residuo dentinario, compuesto por dos ácidos dicarboxílicos insaturados (ácidos maleico y itacónico), disueltos en agua. Observaron que las superficies preparadas con carborundo presentaron menor cantidad de residuo dentinario que aquellas preparadas con diamante. Las superficies tratadas con el acondicionador sin enjuagado, presentaron mayor cantidad de taponamiento de los túbulos que aquellas superficies tratadas con ácido fosfórico al 36%p/v.

Se agradecen los importantes aportes que han brindado las muy variadas y numerosas investigaciones con respecto al pre-tratamiento dentinario; no obstante, no hay, en lo mejor de nuestro conocimiento, una que explique de un modo claro y consistente la razón por la cual algunos de los agentes de limpieza del barrillo dentinario, en mayor o menor grado, que proponen actúan de un modo más o menos efectivo. Ahora bien, teniendo en cuenta que al conocer los diferentes aspectos de las leyes que rigen a la naturaleza, tenemos el poder para inducir, regular o inhibir sin número de eventos; como por ejemplo la remoción del barrillo dentinario. Es por ello, que resulta de vital importancia comprender y tratar de caracterizar desde el punto de vista microscópico-molecular, los diferentes mecanismos y fenómenos que tienen lugar en esta clase de sistemas. Esto permitiría comprender porque fallan algunos adhesivos dentales; más aún, se podrían formular soluciones para el pre-tratamiento mucho más robustas que funcionen siempre y cuya efectividad sea independiente de la destreza del odontólogo.

Así, el presente proyecto de investigación tiene justamente como objetivo explicar la ocurrencia de diferentes fenómenos, así como los mecanismos microscópicos-moleculares involucrados en la remoción del problemático barrillo de modo que en un futuro sea posible formular nuevos agentes de acondicionamiento dentinario, mucho más sólidos y de naturaleza menos agresiva que el ácido fosfórico al 37%, agente que se emplea en la actualidad. Para ello se va a ensayar con una variedad de detergentes, sistemas microemulsionados, ácidos y sales.

www.bdigital.ula.ve ***II. Objetivos***

II. Objetivos

Generales:

- Identificar y describir los fenómenos y sus respectivos mecanismos a nivel microscópico-molecular, mediante los cuales es posible remover la capa residual dentinaria remanente en dentina profunda, posterior al uso de una instrumentación rotatoria de odontólogo.
- Evaluar el efecto de varios factores: tipo de surfactante (noiónico, aniónico, catiónico), pH, concentración y naturaleza de electrolitos (NaCl, BaCl₂, FeCl₃), sobre el grado de limpieza del barrillo dentinario.

Específicos:

- Evaluar el efecto del mecanismo de detergencia mediante la aplicación de surfactantes de distinta naturaleza (aniónica, catiónica, noiónica) en la remoción del barrillo dentinario.
- Evaluar los mecanismos de emulsión y flotación en la limpieza del barrillo dentinario.
- Evaluar el efecto del pH y la presencia de surfactante catiónico en la limpieza del barrillo dentinario.
- Evaluar el efecto de los electrolitos (carga y concentración del contra-ion) en la limpieza del barrillo dentinario.
- Evaluar el efecto del pH y la concentración de los electrolitos en la limpieza del barrillo dentinario.

www.bdigital.uisa.ve *III.Marco Teórico*

III. Marco Teórico

III.1. Fenómenos Eléctricos Interfaciales

Para lograr describir de un modo aproximado el comportamiento del sustrato dentinario y la capa de residuo (smear layer) bajo la acción de diversos agentes de limpieza, especialmente electrolitos, es necesario comprender una serie de conceptos y fenómenos de naturaleza interfacial y eléctrica. A continuación se explican con detalle aquellos fundamentos considerados clave en el desarrollo del presente proyecto.

III.1.1. Generalidades

III.1.1.1. Fuerzas Intermoleculares

Las fuerzas intermoleculares son las fuerzas que mantienen unidas (de atracción) o separadas (de repulsión) a las moléculas. Estas fuerzas son las responsables de las propiedades macroscópicas de la materia. (Chang, 1999). Estas fuerzas constituyen el "cemento" de la materia y actúan a muy corta distancia, típicamente en función del inverso de la sexta potencia de la distancia (Salager, 2002). Las fuerzas intermoleculares son de naturaleza eléctrica. Si bien desde el punto de vista de sus configuraciones electrónicas son estables y globalmente neutras, no lo son desde el punto de vista eléctrico. Las moléculas que conforman determinada sustancia tienen una densidad electrónica definida. Cuando ellas se acercan entre sí, el efecto neto es el de un cambio en la distribución de su nube electrónica. Al separarse ligeramente, la distancia entre las cargas opuestas es algo menor que la de igual signo. De ahí que ocurra una atracción neta. Pero si las moléculas se acercan aun más, las cargas eléctricas empiezan a solaparse y se produce un efecto neto de repulsión (Steenbecker, 2003). Las fuerzas intermoleculares son las fuerzas de van der Waals, las fuerzas de naturaleza electrostática y los puentes de hidrógeno.

- **Fuerzas de van der Waals:** Las fuerzas de van der Waals incluyen las atracciones entre átomos, moléculas y superficies. Difieren del enlace covalente y del enlace iónico en que están causados por correlaciones en las polarizaciones fluctuantes de partículas cercanas. Este tipo de fuerzas explican como moléculas polares o no polares permanecen unidas. Todas las fuerzas intermoleculares de van der Waals presentan anisotropía (excepto aquellas entre átomos de dos gases nobles), lo que significa que dependen de la orientación relativa de las moléculas. Hay tres tipos de fuerzas de van der Waals: las de Keesom, las de Debye y las de London ("Fuerza Intermolecular", s.f.).

- Fuerzas de Keesom o fuerzas dipolo permanente – dipolo permanente: se presentan en sistemas constituidos por moléculas covalentes polares, es decir, con momento dipolar. Su origen es electrostático y pueden entenderse en función de la ley de Coulomb. Mientras mayor es el momento dipolar mayor es la fuerza (Chang, 1999).



Figura III. 1: Fuerzas de Keesom (Steenbecker, 2003)

:

- Fuerzas de Debye o fuerzas dipolo permanente – dipolo inducido: explican las interacciones entre moléculas polares y no polares. Cuando la molécula polar se pone en contacto con una molécula apolar, la distribución electrónica de la molécula no polar se distorsiona por efecto de la fuerza que ejerce la molécula polar, lo que ocasiona una clase de dipolo inducido. Es inducido porque la separación de las cargas positiva y negativa se debe a la proximidad de la molécula polar. La probabilidad de inducir un dipolo depende de la fuerza del dipolo permanente y de la *polarizabilidad* de la molécula apolar, es decir, de su facilidad para ver distorsionada su distribución electrónica (Chang, 1999).



Figura III. 2: Fuerzas de Debye (Steenbecker, 2003)

- Fuerzas de London o fuerzas de dispersión: son fuerzas de atracción que se generan por los dipolos temporales inducidos en las moléculas no polares. En un instante cualquiera las moléculas pueden tener un dipolo generado por las posiciones específicas de los electrones.

Este momento dipolo se denomina dipolo instantáneo porque sólo dura una pequeña fracción de segundo. En otro instante, los electrones están en posiciones distintas y el átomo tiene un nuevo dipolo instantáneo y así sucesivamente. De esta manera se explica cómo es que los átomos o moléculas no polares como el Helio (He) y el Nitrógeno (N₂) pueden condensarse (Chang, 1999).



Figura III. 3: Fuerzas de London (Steenbecker, 2003)

Las dos primeras fuerzas de van der Waals poseen valores del orden de algunos Kcal/mol, mientras que la tercera tiene un valor diez veces menor (Salager, 2002).

- **Fuerzas de naturaleza electrostática:** explica cómo se atraen entre sí los iones y las moléculas y pueden ser aquellas conocidas como fuerzas ion – dipolo permanente y fuerzas ion – dipolo inducido.

- **Fuerzas ion – dipolo permanente:** son aquellas que atraen entre sí a un ion (catión o anión) y una molécula polar. La intensidad de esta interacción depende de la carga y el tamaño del ion así como de la magnitud del momento dipolo y del tamaño de la molécula. Las cargas en los cationes están más concentradas porque estos iones suelen ser más pequeños que los aniones. En consecuencia, con una carga de igual magnitud, un catión interactúa más intensamente con los dipolos que un anión (Chang, 1999).
- **Fuerzas ion – dipolo inducido:** al igual que en el caso de las fuerzas de Debye, los iones están en la capacidad de inducir un dipolo en moléculas de naturaleza apolar, por efecto de la distorsión de la distribución electrónica de la molécula (Chang, 1999).

Existen otra clase de fuerzas de naturaleza electrostática responsables de la interacción de partículas eléctricamente cargadas. Hay varios tipos de partículas cargadas, una de ellas es el electrón con una carga negativa, el cual es el principal protagonista de los enlaces químicos y de la conducción de electricidad o el protón, con carga positiva, que forma parte del núcleo del átomo. Otras partículas cargadas se forman cuando las moléculas de algunas sustancias, denominadas electrolitos, se

disocian al entrar en solución. A estas partículas que se forman se les denomina iones y a su vez pueden ser cationes (con carga positiva) y aniones (con carga negativa). Como bien es sabido, partículas con la misma carga eléctrica se repelen, mientras que, partículas con cargas opuestas se atraen. La intensidad de las interacciones de este tipo de sistemas depende en muchos casos del número de cargas que adquieran los iones al disociarse, no obstante, cabe destacar, que siempre debe cumplirse la condición de electroneutralidad, incluso en aquellos casos en los que el número de cargas de ambas especies, aniones y cationes, sea distinta (Marcano, 1992).

- **Puentes de hidrógeno:** Es un tipo especial de interacción dipolo – dipolo que se da entre moléculas que poseen átomos de hidrógeno enlazados a átomos fuertemente electronegativos con pares de electrones sin compartir, tales como nitrógeno (N–H), oxígeno (O–H) y flúor (F–H). Los enlaces de hidrógeno son más débiles que los enlaces covalentes ordinarios, pero mucho más fuertes que las interacciones netas dipolo – dipolo (Solomons, 1999).

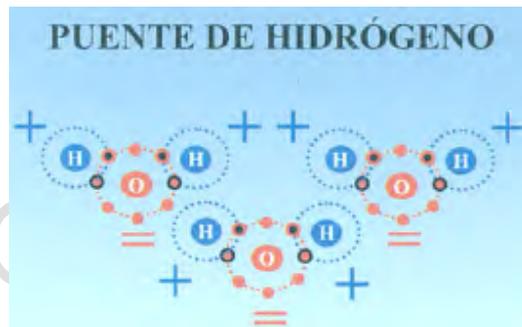


Figura III. 4: Puentes de Hidrógeno (Steenbecker, 2003)

III.1.1.2. Doble Capa Eléctrica

En cualquier interfase, ya sea gas–líquido, líquido–líquido o sólido–líquido, siempre existe una distribución desigual de cargas eléctricas entre las fases. Tal distribución provoca que en un lado de la interfase se adquiera una carga neta de un signo en particular y del otro lado también se adquiera una carga de signo opuesto, dando lugar a la formación de una *Doble Capa Eléctrica*. Como la electroneutralidad global del sistema interfacial debe mantenerse, las cargas netas a ambos lados de la interfase deben balancearse presentando exactamente la misma magnitud pero con signo opuesto (Rosen, 2004).

La doble capa eléctrica describe la variación del potencial eléctrico próximo a una superficie. Adquiere gran importancia en el comportamiento de los coloides y otras superficies en contacto con solventes. El primer modelo que explicó este fenómeno se atribuye normalmente a Helmholtz en 1879 (von Helmholtz, 1879), quien trató la doble capa eléctrica desde un punto de vista matemático como un

condensador, basado en un modelo físico en el que una capa de contraiones se alinea sobre la superficie cargada a una distancia de cerca de un diámetro molecular.

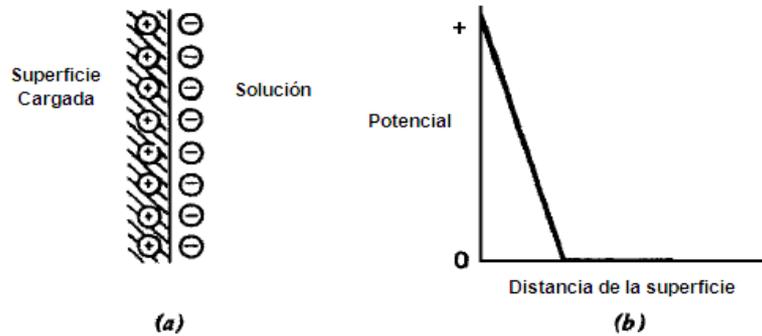


Figura III. 5: Modelo de Helmholtz de la doble capa eléctrica. a) Distribución de contraiones en la vecindad de la superficie cargada; b) Variación del potencial eléctrico con la distancia desde la superficie cargada (Rosen, 2004)

Según este modelo, el potencial eléctrico debe caer rápidamente a cero a una muy corta distancia de la superficie cargada. No obstante, esta propuesta resultó inadecuada, ya que no consideraba la agitación térmica, la cual tiende a difundir algunos de los contraiones a toda la solución (Ver figura III.5).

Más tarde, Gouy (1917) y Chapman (1913) aportaron una serie de modificaciones al introducir un modelo difuso de doble capa eléctrica, ligado a la agitación térmica. En este modelo el potencial eléctrico disminuye exponencialmente debido al efecto pantalla que se induce gracias a la adsorción de los contraiones presentes en la disolución. Dicha proposición resulta muy útil para superficies planas con baja densidad de carga o para distancias no muy cortas con respecto a la superficie, pero es insuficiente cuando las superficies presentan alta densidad de carga, especialmente cuando las distancias entre las partículas y la superficie cargada son muy pequeñas, ya que no toma en cuenta los diámetros iónicos de las cargas presentes en la solución y las considera como cargas puntuales (Rosen, 2004).

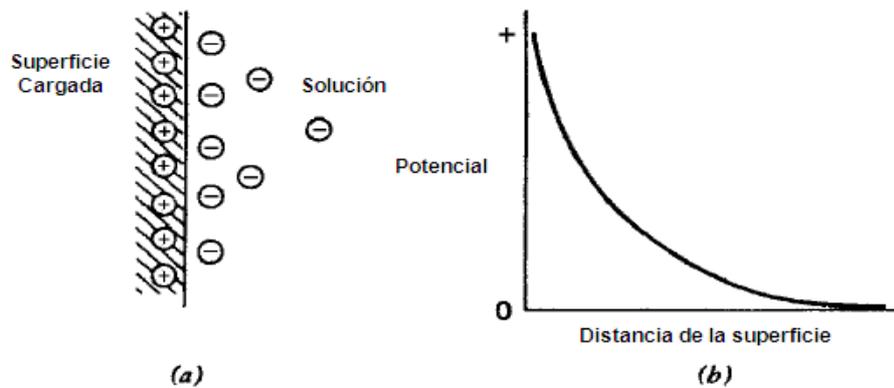


Figura III. 6: Modelo de Gouy – Chapman de la doble capa eléctrica. a) Distribución de iones en la vecindad de la superficie cargada; b) Variación del potencial eléctrico con la distancia desde la superficie cargada (Rosen, 2004)

En 1924, Stern modificó dicho modelo y dividió el lado de la solución de la doble capa en dos partes: (1) una capa firme de iones adsorbidos en sitios fijos cerca de la superficie cargada (para corregir el defecto básico del modelo Gouy-Chapman), y (2) una capa difusa de iones similar a la del modelo Gouy-Chapman. Según este modelo, el potencial eléctrico cae rápidamente en la parte fija (Capa de Stern) de la doble capa y de manera más gradual en la porción difusa. Los iones fijos en la capa de Stern pueden incluso cambiar el signo del potencial resultante de la superficie cargada (Rosen, 2004).

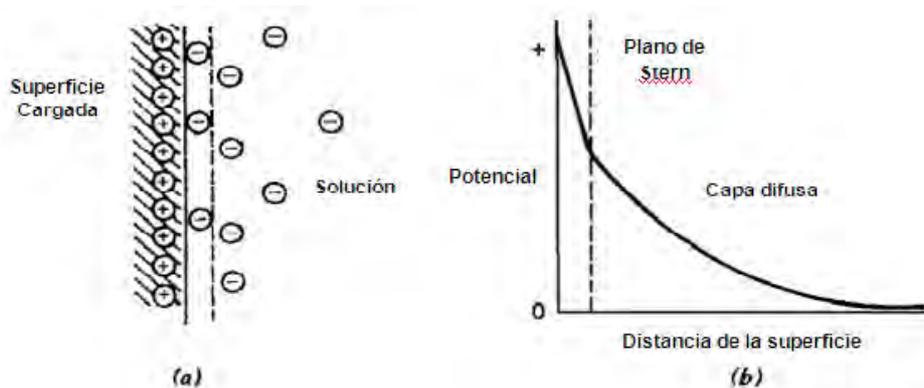


Figura III. 7: Modelo de Stern de la doble capa eléctrica. a) Distribución de iones en la vecindad de la superficie cargada; b) Variación del potencial eléctrico con la distancia desde la superficie cargada (Rosen, 2004)

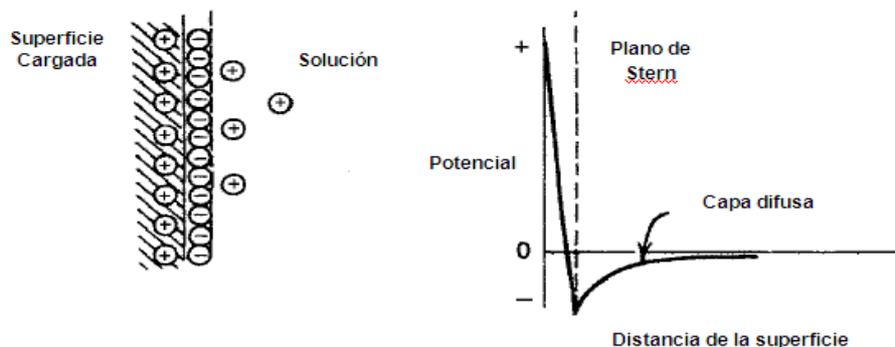


Figura III. 8: Modelo de Stern de la doble capa eléctrica que muestra la inversión del signo de la superficie cargada como consecuencia de la adsorción de los contraiones en la capa de Stern (Rosen, 2004).

Actualmente se utiliza el modelo de *Gouy-Chapman-Stern*, en el cual se combina la capa adsorbida de Helmholtz con la doble capa difusa de Gouy-Chapman. En él se utilizan importantes aproximaciones:

- Los iones son considerados como cargas puntuales
- Sólo las interacciones coulombianas son significativas
- La permitividad eléctrica es constante en el interior de la doble capa
- El solvente es uniforme a escala atómica (“Doble capa eléctrica”, s.f.).

III.1.1.3. Teoría DLVO

Antes de describir los mecanismos mediante los cuales es posible remover un sucio de un sustrato, es conveniente recordar las implicaciones desde el punto de vista energético de la *Teoría DLVO*. Esta teoría tuvo como propósito inicial explicar la estabilidad de dispersiones liofóbicas (dispersiones coloidales de partículas que no son afines al solvente) al describir la influencia de las fuerzas débiles y de Van der Waals entre las partículas. Fue desarrollada independientemente por Derjaguin y Landau (1941) y Verwey y Overbeek (1948) y es por ello que se denomina teoría DLVO. Dicha teoría asume un balance entre los potenciales energéticos de atracción y repulsión de las partículas dispersas. Las interacciones de naturaleza repulsiva se deben a la similitud entre la carga de la doble capa eléctrica que rodea a las partículas o a las interacciones solvente-partícula. Por su parte, las interacciones de tipo atractiva se atribuyen fundamentalmente a las fuerzas de Van der Waals. Para lograr dispersar a las partículas, las interacciones de tipo repulsivas deben incrementarse a un punto tal en el que ellas superen a las interacciones de tipo atractivas. En contraste, para agregar a las partículas debe revertirse tal acción.

La energía potencial total de interacción “V” es la suma de los potenciales energéticos de atracción V_A y de repulsión V_R .

$$V = V_A + V_R$$

La energía potencial de atracción en el vacío para partículas esféricas similares de radio “a” cuyos centros están separados por una distancia R, está dado por la siguiente expresión (Hamaker, 1937):

$$V_A = \frac{-Aa}{12H}$$

donde A es la Constante de Hamaker (Van der Waals) y H es la mínima distancia entre las superficies de las partículas ($H = R - 2a$) cuando H es pequeño ($R/a \leq 5$). La energía potencial de atracción siempre es negativa debido a que su valor en el infinito tiende a cero y disminuye cuando las partículas se aproximan unas a otras. En una dispersión líquida, A debe reemplazarse por una constante efectiva A_{eff} de Hamaker:

$$A_{eff} = (\sqrt{A_2} - \sqrt{A_1})^2$$

donde A_1 y A_2 son las constantes de Hamaker para las partículas y el medio de dispersión respectivamente (Vold, 1961). Como las partículas y el medio de dispersión suelen ser de naturaleza similar, A_2 y A_1 se aproximan en magnitud y A_{eff} se reduce. Esto da como resultado una disminución del potencial de atracción entre las partículas.

La energía potencial de repulsión V_R depende del tamaño y la forma de las partículas dispersas, la distancia entre ellas, su potencial de superficie ψ_0 , la constante dieléctrica ϵ_R , la dispersión de líquido y el espesor efectivo de la doble capa eléctrica, también conocida como longitud de Debye, $1/\kappa$ (Adamson, 1976):

$$\frac{1}{\kappa} = \left(\frac{\epsilon_r \epsilon_0 RT}{4\pi F^2 \sum_i C_i Z_i^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

donde $\epsilon_R = \epsilon / \epsilon_0$ se refiere a la permitividad estática relativa o constante dieléctrica de la solución (ϵ es la permitividad en la solución y ϵ_0 es la permitividad en el vacío), R es la constante de los gases, T es la temperatura absoluta, F es la constante de Faraday, C_i es la concentración molar de cualquier ión en la solución y Z es la valencia del ión en la solución. De acuerdo a la ecuación, es lógico concluir entonces que al aumentar el número de iones en la doble capa eléctrica decrece el espesor $1/\kappa$, en otras palabras, una mayor concentración de electrolito provoca una disminución del espesor de la

doble capa eléctrica. De la misma manera, un aumento en la valencia de los iones también produce una disminución del espesor de la doble capa eléctrica.

Para dos partículas esféricas de radio a , si $\kappa a \ll 1$, por ejemplo, cuando se tienen partículas pequeñas y una doble capa eléctrica relativamente densa, se tiene que el potencial de repulsión viene dado por la siguiente expresión (Lyklema, 1968):

$$V_R = \frac{\epsilon_r a^2 \psi_0^2}{R} e^{-\kappa H}$$

Cuando $\kappa a \gg 1$, lo cual se cumple en los casos en los que se tienen partículas grandes y dobles capas eléctricas relativamente delgadas, la expresión más adecuada sería:

$$V_R = \frac{\epsilon_r a \psi_0^2}{2} \ln(1 + e^{-\kappa H})$$

La energía potencial de repulsión es siempre positiva, ya que su valor en el infinito es cero y aumenta a medida que las partículas se aproximan entre sí.

En la siguiente figura se pueden apreciar las curvas típicas de “ V_A ” y “ V_R ” en función de la distancia “ H ” entre las partículas, junto con la curva del potencial total de interacción “ V ” (V_A y V_R). Las partículas tienden a agregarse a aquellas distancias en las que el potencial de atracción es mayor que el de repulsión y “ V ” se convierte en negativo. También se puede observar un máximo en la curva de potencial total “ V ”, el cual corresponde a una barrera energética que debe vencerse antes de llegar a la zona donde “ V ” decrece cuando “ H ” disminuye (Rosen, 2004).

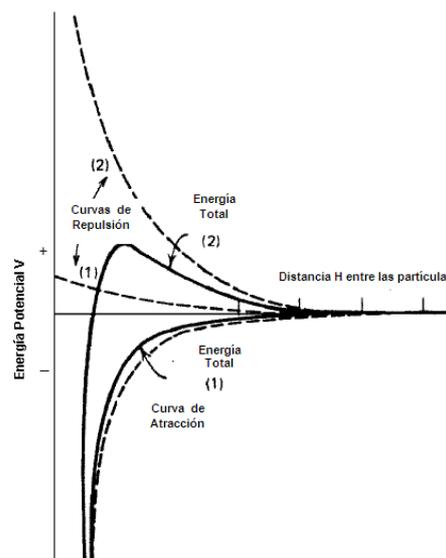
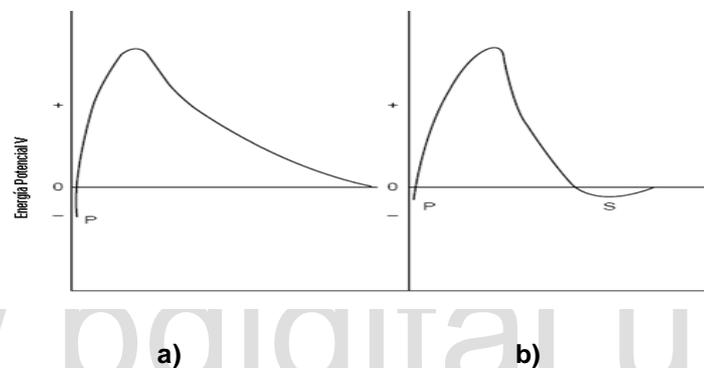


Figura III. 9: Curvas de Energía Potencial en función de la distancia entre partículas (Rosen, 2004)

Cuando $\kappa a \gg 1$ (es decir, cuando la proporción del tamaño de las partículas con respecto al espesor de la doble capa eléctrica es muy grande), la curva de potencial total muestra un mínimo secundario (S) a una distancia de separación relativamente grande entre las partículas con relación al del mínimo primario (P) (ver figura III.6b). Las partículas pueden en consecuencia formar agregados a distancias comparativamente grandes. Este tipo de agregación es a veces llamado *floculación* para distinguirlo del fenómeno de agregación en el primer mínimo, que se denomina *coagulación*. Dado que la profundidad del mínimo secundario es más bien superficial, la floculación de este tipo es reversible y las partículas pueden separarse tras la aplicación de una simple agitación. Las partículas de tamaño un tanto superior a unos pocos micrómetros (especialmente las planas) pueden experimentar este fenómeno (Rosen, 2004).



Figuras III. 10: Curvas de Energía Potencial en función de la distancia entre partículas y la relación tamaño de partícula – espesor de la doble capa eléctrica $a/(1/\kappa) = \kappa a$. a) $\kappa a \ll 1$; b) $\kappa a \gg 1$ (Rosen, 2004).

En general, se tiene que cuando la concentración de electrolito o la carga de los iones aumentan en la fase dispersante, la doble capa se comprime, la posición del máximo de V se desplaza para valores menores de H y la altura de la barrera energética disminuye. Por otra parte, una disminución del potencial de superficie tiende a producir el mismo tipo de transición pero con poco desplazamiento de la distancia a la cual se produce el máximo (Salager, 1998).

III.1.1.4. Potenciales Electrostáticos y Potencial Zeta

Toral (1973) argumenta que un potencial electrostático en un punto se mide por el trabajo (contra fuerzas electrostáticas) necesario para traer a este punto una carga unitaria desde el infinito. En un plano infinito cargado y en el vacío, el potencial se vuelve infinito porque la intensidad del campo es constante e independiente de la distancia; pero, en presencia de una solución, el efecto pantalla ejercido por los iones reduce la intensidad del campo a un valor despreciable dentro de una distancia bastante corta, de unas cuantas veces el espesor de la doble capa. Por ello, se puede asumir que el

seno de la solución se encuentra lo bastante alejado de la superficie cargada como para considerar que su potencial es cero. En consecuencia, el trabajo electrostático necesario para transportar una carga desde el seno del líquido de la solución hasta la superficie será la medida del potencial en ese punto.

De acuerdo a la misma autora, el ion transportado en solución atraviesa varias capas sin experimentar ningún cambio en su naturaleza y el trabajo correspondiente a cada una de ellas define su potencial respectivo de capa. Interesan de modo especial los potenciales asociados a tres capas. El primero de ellos es el correspondiente a la superficie cargada, el cual es una medida del potencial total de la doble capa eléctrica y se denomina *Potencial de Gouy*; este se designa como ψ_0 . El segundo potencial de interés corresponde al límite entre la capa fija (Capa de Stern) y la capa difusa, conocido como *Potencial de Stern*, designado por ψ_s . El tercer potencial es el correspondiente al límite entre la solución que se adhiere a la superficie de la pared, y que en el caso de una partícula sigue adherida a ella en su movimiento, y la solución que puede moverse respecto de la pared o de la partícula. Este límite es el *plano de corte* que separa la parte fija de la parte móvil de la doble capa (ver figura III.11). El potencial en este plano se llama *Potencial Zeta*, y se designa por ξ . Dicho potencial no corresponde así a la capa de Stern sino a la parte de la capa de Gouy que no está dentro de una capa de solución firmemente unida a la pared. Como la capa unida a la superficie es del orden del espesor de una molécula, ξ será algo menor que ψ_s , pero no mucho menor.

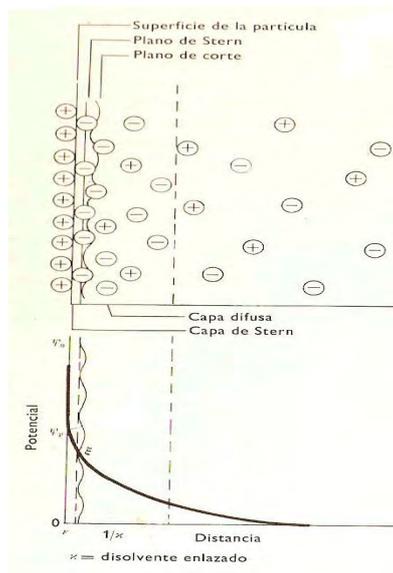


Figura III. 11: Representación esquemática de la doble capa eléctrica según Stern (Toral, 1973)

El significado del potencial zeta se relaciona primordialmente con la estabilidad de dispersiones coloidales. Este potencial indica el grado de repulsión entre partículas adyacentes cargadas con el mismo signo en una dispersión. Para moléculas y partículas suficientemente pequeñas, un alto potencial zeta les conferirá estabilidad, en otras palabras, la solución o dispersión en cuestión resistirá la agregación. Cuando el potencial es bajo, la atracción excede la repulsión y la dispersión se romperá y floculará. En la tabla a continuación se lista la estabilidad de una dispersión coloidal en función del potencial zeta (“Zeta potencial”, s.f.).

Tabla III. 1: Estabilidad de las dispersiones coloidales en función del potencial zeta (“Zeta potencial”, s.f.)

Potencial Zeta	Estabilidad del Coloide
De 0 a ± 10	Coagulación o floculación rápida
De ± 10 a ± 30	Inestabilidad incipiente
De ± 30 a ± 40	Estabilidad moderada
De ± 40 a ± 60	Buena estabilidad
Más de ± 61	Excelente estabilidad

El potencial zeta es ampliamente utilizado para cuantificar la magnitud de la carga eléctrica de la doble capa. No obstante, dicho potencial no es igual al potencial de Stern o al potencial superficial (o de Gouy), aunque es con frecuencia la única ruta que permite caracterizar las propiedades de la doble capa eléctrica. Si hay poca adsorción y si la doble capa es bastante extendida el potencial zeta es aproximadamente igual al potencial de la superficie. Sin embargo, en otros casos el potencial zeta puede ser considerablemente diferente del potencial de superficie (“Zeta potencial”, s.f.).

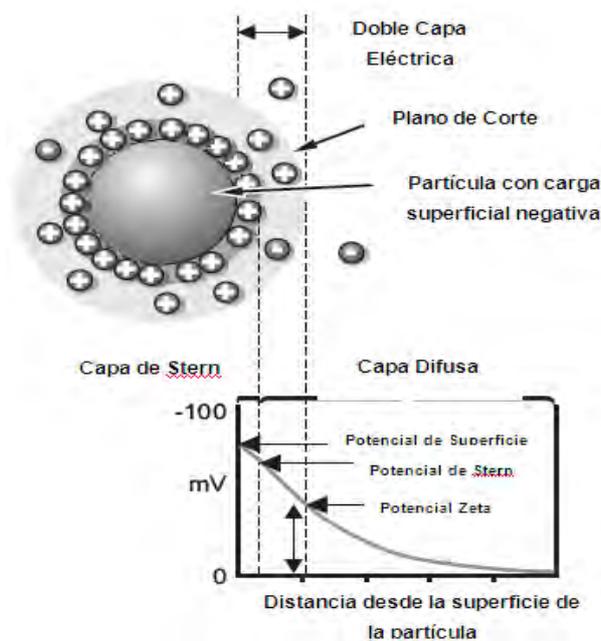


Figura III. 12: Representación del Potencial Zeta en la doble capa eléctrica

La determinación del potencial zeta se realiza considerando los fenómenos electrocinéticos, los cuales pueden ser definidos como todos aquellos fenómenos que ocurren cuando las dos fases que lo forman, el sólido y la solución de electrolito, se mueven una respecto a la otra mientras la interfase es el asiento de una de las capas de la doble capa eléctrica, la cual previamente ha sufrido una ruptura. Este movimiento de ambas fases puede ser provocado por una diferencia de potencial externa que provoca el movimiento relativo de una fase respecto a la otra, ya que tienen carga opuesta en ambos lados de la interfase. Contrariamente este movimiento de las dos fases puede ser causado también por una fuerza tangencial (flujo de líquido o gravedad) externa a la interfase, con la que se genera un campo eléctrico. Dicha ruptura de la doble capa eléctrica, provocada por algunas de las formas indicadas anteriormente, se produce de forma que la capa fija de la doble capa eléctrica permanece sobre la superficie del sólido en la interfase y la capa difusa es arrastrada.

El gradiente de potencial en este plano de corte de la doble capa eléctrica es el potencial zeta o potencial electrocinético que se determina experimentalmente. Estos son manifestaciones de las propiedades eléctricas de las interfases bajo estado estacionario y a condiciones isotérmicas y en la práctica, son con frecuencia la única fuente de información disponible de dichas propiedades, por esta razón, su estudio constituye una de las ramas clásicas de la ciencia coloidal, la electrocinética, la cual ha sido desarrollada en estrecha conexión con las teorías de la doble capa eléctrica y de las fuerzas electrostáticas de superficie. A continuación se describen brevemente los fenómenos electrocinéticos más importantes:

- **Electroforesis:** es el movimiento de partículas coloidales cargadas o de polielectrolitos, inmersos en un líquido, bajo la influencia de un campo eléctrico externo E . Algunos parámetros relacionados con este fenómeno son la velocidad electroforética v_e (m/s), la cual se refiere a la velocidad de las partículas durante la electroforesis y la movilidad electroforética u_e ($m^2/(V.s)$), que es la magnitud de la velocidad dividida por la magnitud de la fuerza del campo eléctrico. La movilidad tiene valores positivos si las partículas se mueven hacia un potencial más bajo y negativos en el caso opuesto.

$$v_e = u_e E$$

- **Electro - osmosis:** se refiere al movimiento de un líquido a través de un conjunto de partículas, poros, capilares o membranas, en respuesta a un campo eléctrico aplicado. Esto es el resultado de las fuerzas ejercida por el campo sobre la contra - carga en el líquido dentro de los capilares cargados, los poros, etc. Los iones en movimiento arrastran al líquido en el cual ellos se integran. La velocidad electro - osmótica v_{eo} (m/s), es la velocidad uniforme del líquido lejos de la carga interfacial. Usualmente, la cantidad medida es el flujo volumétrico de líquido

(m³/s) a través del capilar, plug o membrana, dividida por la intensidad del campo eléctrico $Q_{eo,E}$ (m⁴/(V.s)), o dividido por el flujo eléctrico, $Q_{eo,I}$ (m³/C). Un concepto relacionado es la contrapresión electro – osmótica, ΔP_{eo} (Pa), que se refiere a la diferencia de presión que debe aplicarse al sistema para detener al flujo volumétrico electro – osmótico. Este valor se considera positivo si la presión más alta está del lado de mayor potencial eléctrico.

- **Potencial de flujo U_{str} (V):** es la diferencia de potencial cuando el flujo eléctrico es cero, causado por el flujo de líquido bajo un gradiente de presión a través de un capilar, plug, diafragma o membrana. La diferencia es medida a lo largo del plug o entre los extremos del capilar. Los potenciales de flujo son creados por la acumulación causada por el flujo de contra – cargas dentro los capilares o poros.
- **Potencial de sedimentación U_{sed} (V):** es la diferencia de potencial que sienten dos electrodos idénticos colocados a cierta distancia vertical L en una suspensión en la cual las partículas sedimentan bajo el efecto de la gravedad. El campo eléctrico que se genera U_{sed}/L , es conocido como campo de sedimentación, E_{sed} (V/m). Cuando la sedimentación es producida por un campo centrífugo, el fenómeno se conoce como potencial de centrifugación.
- **Potencial de vibración coloidal, U_{cv} (V):** mide la diferencia de potencial generada entre dos electrodos idénticos colocados en una dispersión que es sometida a un campo ultrasónico. Cuando una onda sónica viaja a través de una suspensión coloidal de partículas cuya densidad difiere del medio que lo rodea, las fuerzas inerciales inducidas por la vibración de la suspensión dan lugar al movimiento de las partículas cargadas relativas al líquido, causando una fuerza electromotriz (Delgado, González-Caballero, Hunter, Koopal y Lyklema, 2005).

Un valor de potencial zeta por sí mismo y sin que sean definidas las condiciones de pH de la solución es tan sólo otro número que no posee significado alguno. Considérese a una partícula en suspensión, que posee un potencial zeta negativo. Si se añade álcali al sistema, la superficie de las partículas tenderá a adquirir carga negativa. Al añadir un ácido a dicha suspensión se alcanzará un punto en el que dicha carga se neutralizará y si se prosigue de esta forma, la superficie eventualmente adquirirá carga positiva debido al exceso de los iones hidronios. Una gráfica de Potencial vs. pH exhibe entonces el siguiente comportamiento:

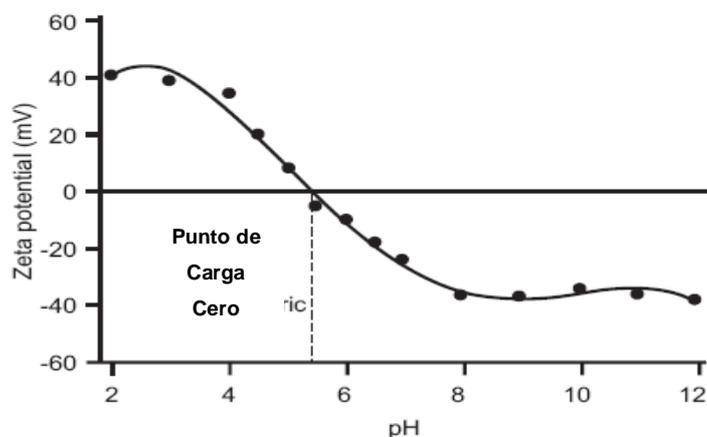


Figura III. 13: Curva de Potencial Zeta vs. pH del medio dispersante

Como puede vislumbrarse, existe una región de la gráfica en la que el potencial zeta tiene un valor positivo (exceso de cargas positivas adsorbidas a la superficie), y otra región en la que este adquiere valores negativos (exceso de cargas negativas adsorbidas a la superficie). El punto en el que ambas cargas se igualan o neutralizan se denomina *Punto de Carga Cero* y corresponde al valor del pH para el cual el potencial zeta es cero, en otras palabras, es el pH en el cual la densidad de carga eléctrica neta de la superficie se anula. Con frecuencia se emplea el término *Punto Isoeléctrico* para denotar tal circunstancia, no obstante, es conveniente hacer cierta distinción (“Isoelectric point”, s.f.; “Point of zero charge”, s.f.).

En los sistemas en los cuales los iones H^+ y OH^- son los que determinan el potencial interfacial, el punto de carga cero está dado en términos del pH. El pH al cual la superficie exhibe carga eléctrica neta neutra corresponde al punto de carga cero de la superficie. Los fenómenos electrocinéticos generalmente miden el potencial zeta y el potencial zeta cero se interpreta como el punto de carga neta cero en el plano de corte. Este se denomina punto isoeléctrico. Por lo tanto, el punto isoeléctrico es el valor del pH al cual la partícula coloidal permanece estacionaria en un campo eléctrico (“Isoelectric point”, s.f.; “Point of zero charge”, s.f.).

III.2. Fenómenos Interfaciales de Equilibrio

Un fenómeno interfacial es por definición un fenómeno que se produce en una interfase o cuya existencia está ligada a la presencia de una interfase (Salager, 2002). La *interfase* constituye el límite o separación entre dos fases inmiscibles, las cuales pueden estar formadas por líquido y líquido o líquido y sólido. La *superficie* de un cuerpo líquido o sólido es una interfase entre un gas y un líquido, o entre un gas y un sólido; así, por ejemplo, el tablero de una mesa es una superficie sólido-gas. La propiedad

más relevante de la interfase es su área, la cual es en general grande en la mayoría de las aplicaciones de interés (Fenómenos Interfaciales, s.f.).

Ciertos fenómenos de naturaleza netamente interfacial, también constituyen eslabones que permitirán comprender y esbozar aquellos mecanismos que explican el comportamiento de algunos agentes de limpieza propuestos para remover la capa de barrillo de los túbulos dentinarios. La efectividad o ineffectividad de cada uno de esos agentes, es justamente uno de los parámetros que permitirá postular o descartar su empleo alternativo en el acondicionamiento de la dentina para su posterior proceso de adhesión.

III.2.1. Energía Superficial

La energía superficial se define como la energía necesaria para romper los enlaces intermoleculares dando lugar a una superficie. En la física del sólido, las superficies deben ser intrínsecamente menos favorables energéticamente que la masa; es decir, debe haber una fuerza que genera la superficie. La energía superficial puede ser definida como el exceso de energía de la superficie de un material comparado con la que tendría si estuviera inmersa en la masa.

Si se corta un sólido en piezas se rompen sus enlaces y entonces se consume energía. Si el corte es reversible la conservación de energía nos dice que la energía consumida en el proceso de corte debe ser igual a la energía inherente en las dos nuevas superficies creadas. La unidad de energía superficial de un material debe ser, por lo tanto, la mitad de su energía de cohesión, siendo el resto de condiciones iguales. En la práctica esto es cierto solo para una superficie recién cortada preparada en vacío. Las superficies a veces cambian su forma de forma irreversible alejándose de modelos simples. Se han encontrado regiones altamente dinámicas, que reaccionan o cambian rápidamente, lo que hace que la energía superficial se ve reducida por procesos de pasivación o absorción ("Energía superficial", s.f.).

III.2.2. Tensión Superficial

Las fuerzas de atracción que existen entre las moléculas de un líquido, son de diferente magnitud dependiendo de la zona del líquido considerada. Las moléculas en el seno del líquido se encuentran lo suficientemente cerca como para que el efecto de las fuerzas de atracción sea considerable, pero tienden a equilibrarse. Por el contrario, las moléculas de la zona superficial no están rodeadas completamente por otras moléculas del líquido y por lo tanto están desequilibradas con un efecto neto hacia el seno del líquido. Esta fuerza neta es normal a la superficie y será más baja mientras más pequeña sea dicha superficie. En otras palabras, para una superficie mínima se cumple

una energía mínima y por lo tanto se puede decir que la superficie de un líquido tiende a contraerse y el efecto resultante de estas fuerzas de contracción es lo que da origen a la tensión superficial, permitiendo además que la superficie sea estable (Anton, 2005). En este caso, cabe recordar que una *superficie* se define como la superficie de contacto entre una fase gas (aire) y una fase condensada (sólido o líquido).

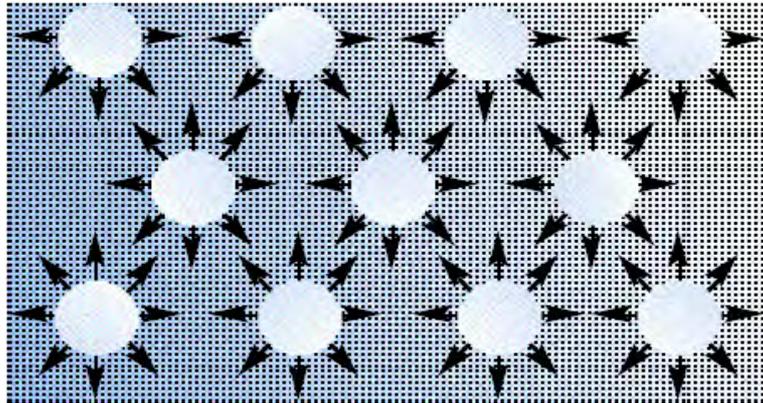


Figura III. 14: Fuerzas atractivas que actúan sobre las moléculas en el seno del líquido y en la superficie libre (Antón, 2005)

Ya que la tendencia natural, de un líquido, es reducir su superficie, cualquier intento de aumentar ésta, requiere de la realización de un trabajo. Es por ello que la tensión superficial (γ) se define desde el punto de vista mecánico, como la energía necesaria para estirar o aumentar la superficie de un líquido por unidad de área (Chang, 1999). Normalmente, la tensión superficial se expresa de forma equivalente en dinas/cm o en ergios/cm².

Se definió la tensión superficial como la fuerza de atracción hacia dentro ejercida sobre las moléculas de la superficie de un líquido. Esta tensión trae como consecuencia la contracción de la superficie. Pero también se habla de una tensión interfacial. Recordemos que una interfase se define como el límite de contacto entre dos fases condensadas (dos líquidos o un líquido y un sólido). Cuando se ponen en contacto dos líquidos inmiscibles el sistema considerado estará formado por las dos fases líquidas y la interfase de contacto entre ellas. Las moléculas de la interfase entre dos líquidos estarán sometidas a fuerzas de magnitudes diferentes a las que están sometidas las moléculas del seno de cada uno de los líquidos. Además, se tendrán también interacciones de tipo Van der Waals con las moléculas del otro líquido en la interfase, lo que conducirá a que la tensión en la interfase (tensión interfacial) tenga un valor intermedio entre las tensiones superficiales de los dos líquidos condensados (Anton, 2003). Mecánicamente hablando, la tensión interfacial tiene la misma connotación, la energía necesaria para estirar o aumentar la superficie de un líquido por unidad de área, se diferencia únicamente el estado de agregación en que se encuentra la fase en contacto íntimo con dicho líquido.

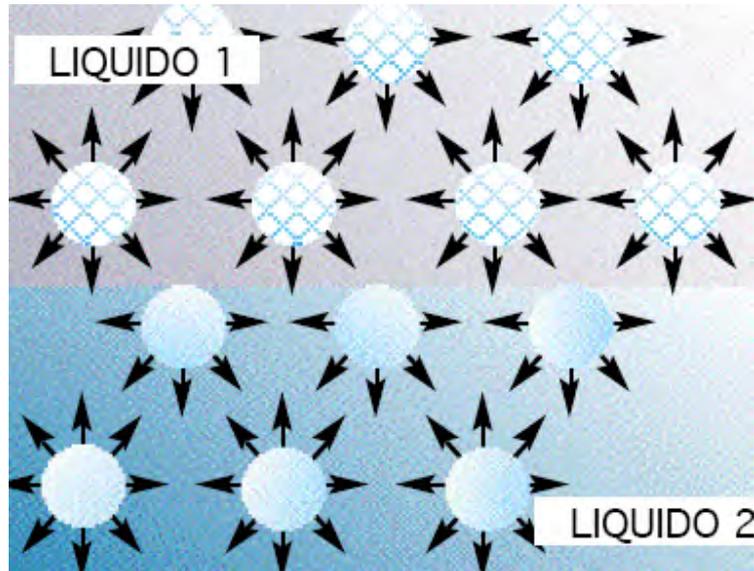


Figura III. 15: Fuerzas atractivas que actúan sobre las moléculas en el seno del líquido y en la interfase (Antón, 2005)

III.2.3. Cohesión y Adhesión

La *cohesión* es la atracción intermolecular entre moléculas semejantes (Chang, 1999). Las fuerzas que mantienen unidas a las moléculas por cohesión son las de Van der Waals. Cada una de estas fuerzas se explicó de forma clara en el apartado correspondiente a los fenómenos eléctricos interfaciales (ver apartado III.1.1). La *adhesión*, por su parte, se refiere a la atracción entre moléculas distintas (Chang, 1999). En la Figura III.16 se ilustra la diferencia entre cohesión y adhesión. En la figura de la izquierda, debe suministrarse cierta cantidad de energía para despegar un área unitaria entre dos caras de una misma sustancia, mientras que en la segunda, con cierta cantidad de energía debe separarse un área unitaria entre dos caras de sustancias diferentes.



Figura III. 16: Cohesión y Adhesión (Salager, 2002)

Un parámetro comúnmente empleado para suministrar un estimado de las fuerzas de cohesión se conoce como *parámetro de solubilidad* δ y se define como se indica a continuación:

$$\delta^2 = \frac{\Delta H_{vap}}{v_{liq}}$$

donde ΔH_{vap} es la entalpía molar de vaporización y v_{liq} es el volumen molar de la sustancia en estado líquido.

La adhesión entre dos sustancias diferentes 1 y 2 se obtiene tomando la media geométrica entre los valores de cohesión correspondientes a las sustancias respectivas:

$$\delta_{12} = \sqrt{\delta_1 \delta_2}$$

Esta relación ilustra la diferencia entre adhesión y cohesión. Si las sustancias 1 y 2 poseen una cohesión muy diferente (por ejemplo una es polar y la otra apolar), el valor de la adhesión será muy distinto a ambos valores de cohesión y como consecuencia no habrá adhesión fuerte. Al contrario si las sustancias son de la misma naturaleza y por lo tanto poseen una cohesión semejante, será la adhesión también semejante (Salager, 2002).

Los conceptos de cohesión y adhesión son los que determinan las fuerzas atractivas entre partículas, gotas o burbujas dispersadas en una fase continua líquida. Estas fuerzas atractivas tienden a reunir los fragmentos de fase dispersada y por lo tanto tienden a desestabilizar la dispersión (Salager, 2002).

III.2.4. Capilaridad

La capilaridad es una propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial (la cual depende a su vez de la cohesión), que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar de radio determinado. Cuando un líquido sube por un tubo capilar, es debido a que la cohesión entre sus moléculas es menor a la adhesión del líquido con el material del tubo (es decir, es un líquido que moja). El líquido, cuya superficie es cóncava, sigue subiendo hasta que la tensión superficial es equilibrada por el peso del líquido que llena el tubo. Sin embargo, cuando la cohesión entre las moléculas de un líquido es más potente que la adhesión al capilar, como ocurre con el mercurio, la tensión superficial hace que el líquido descienda a un nivel inferior, y su superficie sea convexa ("Capilaridad", s.f.).

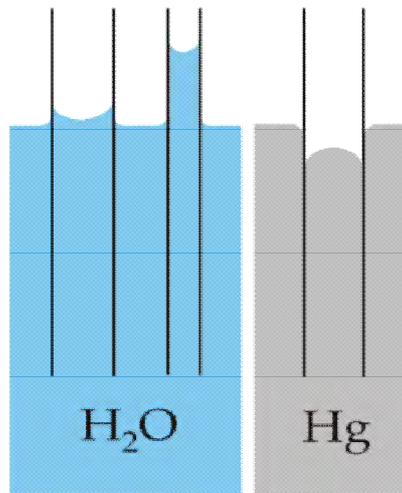


Figura III. 17: Forma de la interfase fluido-fluido en tubos verticales de distintos diámetros al equilibrio mecánico en ausencia de movimiento (Salager, 2002).

En un tubo de diámetro grande resulta que la interfase es esencialmente plana (equilibrio gravitacional de acuerdo a la ley de Pascal) con la excepción de un pequeño menisco cerca de la pared como se ilustra en la Figura III.18a, lo cual permite cumplir la condición de borde del ángulo de contacto a la pared. En la práctica el menisco no se adentra más de un milímetro en el tubo, y por tanto es despreciable en este caso.

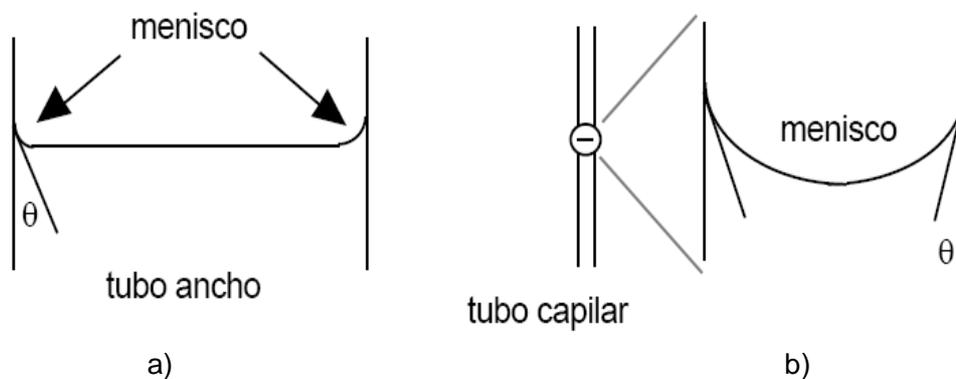


Figura III. 18: Forma de la interfase fluido-fluido en tubos verticales de distintos diámetros al equilibrio mecánico en ausencia de movimiento (Salager, 2002).

Si el diámetro del tubo es pequeño (por ejemplo un milímetro o menos) entonces la condición de borde que tiene que ver con el ángulo de contacto “invade” todo el tubo y el aspecto de la interfase es aquella que se ilustra en la Figura III.18b. Si el tubo es suficientemente pequeño, la diferencia de presión producida por la diferencia de altura es despreciable, y la interfase asume una forma esférica.

Por otra parte, la ecuación de Laplace indica que existe una diferencia de presión de parte y otra de una interfase curva, de acuerdo a (Salager, 2002):

$$\Delta P = 2gH = \frac{2g}{R}$$

donde H es la curvatura promedio que corresponde a una propiedad geométrica de cada punto de la superficie y se expresa como el promedio aritmético de la mayor y menor curvatura en este punto. Si la superficie es una esfera, la curvatura es la misma en todos los puntos y es igual al inverso del radio, de donde se deduce la segunda igualdad. La presión es mayor en la concavidad y menor del lado convexo (Salager, 2002).

III.2.5. Mojabilidad

La mojabilidad se refiere a la capacidad que posee un fluido en presencia de otro inmisible de esparcirse sobre una superficie sólida dada; esta propiedad se mide por medio del ángulo de contacto entre el fluido en cuestión y la superficie sólida y es función de la naturaleza de ambos fluidos y del sólido. En el caso de un sistema de esta clase, que contiene tres fases distintas se deben considerar las interacciones binarias. Para tal propósito se usan las energías interfaciales por unidad de área (tensión interfacial) para comparar las fuerzas relativas de adhesión. Según se favorezca o no la adhesión de una de las fases sobre las otras, se dice que existe una mayor o menor mojabilidad (con una fase sólida) o una mayor tendencia a expandirse (tres fases fluidas) (Salager, 2002).

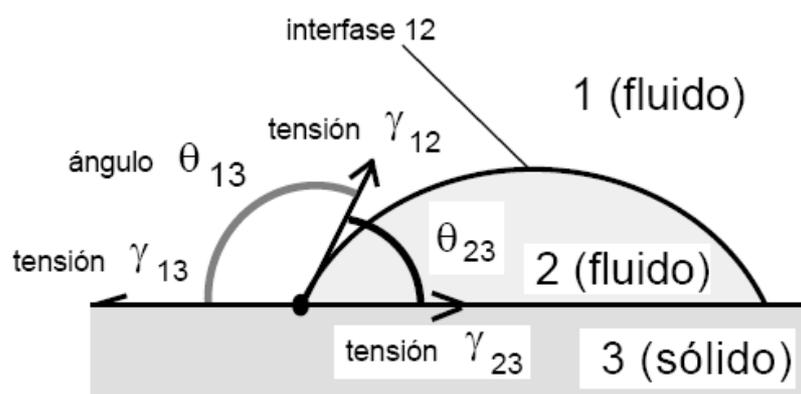


Figura III. 19: Mojabilidad y ángulo de contacto (Salager, 2002).

La Figura III.19 indica una situación típica en la que una gota de un fluido 2 está en contacto con un sólido 3, todo bañado en un fluido 1. En la línea de contacto trifásico existe un equilibrio vectorial de fuerzas (por unidad de longitud):

$$\gamma_{12} + \gamma_{23} + \gamma_{13} = 0$$

donde γ indica la tensión interfacial, superficial o energía libre por unidad de área. Como la superficie sólida es plana, la traducción vectorial de las tensiones se puede representar de la siguiente manera:

$$\gamma_{13} = \gamma_{23} + \gamma_{12} \cdot \cos \theta_{23}$$

donde θ_{23} es el ángulo de contacto entre fluido 2 y el sólido 3. Si θ_{23} es muy pequeño (cerca de cero), la gota se extiende sobre el sólido y se dice que el fluido 2 moja al sólido. Si por el contrario este ángulo es superior a 90° , entonces es el fluido 1 el que moja el sólido y se dice que el fluido 2 no moja el sólido 3 (Salager, 2002).

III.2.7. Adsorción

La adsorción es un proceso en el cual una sustancia (gaseosa, líquida o sólida) se mantiene sobre la superficie de un sólido. A la sustancia que se acumula sobre la superficie se le denomina *adsorbato*, mientras que a la superficie del sólido se le conoce como *adsorbente* (Skoog, West, Holler y Crouch, 2000). La desorción es el proceso inverso a la adsorción. Considérese un sólido dividido finamente en una solución diluida de un colorante, se observa una disminución de la profundidad del color en la solución. Si se expone un sólido dividido finamente a un gas a baja presión, la presión disminuye de forma considerable. En ambos casos, el gas o el colorante son adsorbidos en la superficie. La magnitud del efecto depende de la temperatura, la naturaleza de la sustancia adsorbida (adsorbato), la naturaleza y estado de subdivisión del adsorbente (sólido dividido finamente) y la concentración del colorante y presión del gas (Castellan, 1987).

Una de las primeras ecuaciones propuestas para relacionar la cantidad adsorbida con la concentración del material en la solución fue la isoterma de Freundlich:

$$m = kC^{\frac{1}{n}}$$

donde m es la masa adsorbida por una unidad de masa de adsorbente, c es la concentración y k y n son constantes. Esta isoterma falla si la concentración de (o presión) del adsorbato es muy alta.

Considérese ahora el proceso de adsorción por medio de una ecuación química. Si el adsorbato es una gas, es posible representar el equilibrio:



donde A es el adsorbato gaseoso, S es un lugar desocupado sobre la superficie y AS representa una molécula de A adsorbida o n sitio ocupado sobre la superficie. La constante de equilibrio puede expresarse:

$$K = \frac{x_{AS}}{x_s p}$$

donde x_{AS} es la fracción mol de lugares ocupados en la superficie, x_s es la fracción mol de lugares libres en la superficie y p es la presión del gas. Comúnmente se usa θ en lugar de x_{AS} , de manera que $x_s = (1 - \theta)$ y la ecuación puede escribirse como:

$$\frac{\theta}{1 - \theta} = Kp$$

conocida como isoterma de Langmuir; K es la constante de equilibrio para la adsorción. Ahora bien, si se quiere representar en función de la concentración molar c de una sustancia de la solución, es válido si se sustituye p por c. Como la cantidad m (cantidad de sustancia adsorbida), es proporcional a θ para un adsorbente específico ($m = b\theta$) y b es una constante, se tiene entonces:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{b} + \frac{1}{bKp}$$

de manera que al representar gráficamente la ecuación anterior, se pueden obtener los parámetros m y b a partir de la pendiente e intersección de la recta respectivamente y al conocer , se puede calcular θ .

La isoterma de Langmuir (ver Figura III. 20), es en general más acertada que la Freundlich, siempre que se forme una monocapa. A bajas presiones $Kp \ll 1$ y $\theta = Kp$, por lo que θ aumenta linealmente con la presión. A presiones altas, $Kp \gg 1$, de modo que $\theta \approx 1$. A altas presiones, la superficie está casi totalmente cubierta con una capa molecular. Por tanto, los cambios en la presión producen poca variación en la cantidad adsorbida (Castellan, 1987).

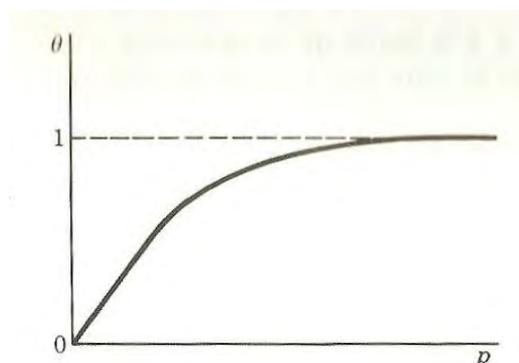


Figura III.20: Isoterma de Langmuir (Castellan, 1987)

Así como la tensión superficial, la adsorción es una consecuencia de la energía de superficie. En el seno de un material, todos los requerimientos de enlaces (iónicos, covalentes o metálicos) los satisfacen otros átomos constituyentes dentro del mismo material. No ocurre lo mismo con los átomos que se encuentran en la superficie del mismo. Estos átomos que se ubican en la periferia, se rodearán por átomos de adsorbatos. La naturaleza exacta de estos enlaces depende de las especies involucradas, pero en general, esta unión podrá ser por fisisorción o quimisorción (“Adsorption”, s.f.).

Si la interacción entre el adsorbato y la superficie del adsorbente se debe sólo a fuerzas de van der Waals, se trata de adsorción física o *Fisisorción*. Las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos (unos cuantos kilojoules) y comparables al calor de vaporización del adsorbato. El aumento de la temperatura disminuye notablemente la adsorción. La fisisorción es un proceso fácilmente reversible (Castellan, 1987).

Si las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie, el fenómeno se denomina adsorción química o *Quimisorción*. Como en este caso se rompen y forman enlaces, el calor de adsorción tiene intervalos de valores análogos a los de una reacción química, desde unos pocos hasta unos 400 kJ. La quimisorción no va más allá de la formación de una monocapa en la superficie, por tal razón, una isoterma de tipo Langmuir que predice una monocapa y nada más, es apropiada para interpretar los datos (Castellan, 1987). En este caso la fuerza de adhesión es generalmente mucho más grande que en la adsorción física y es un proceso frecuentemente irreversible.

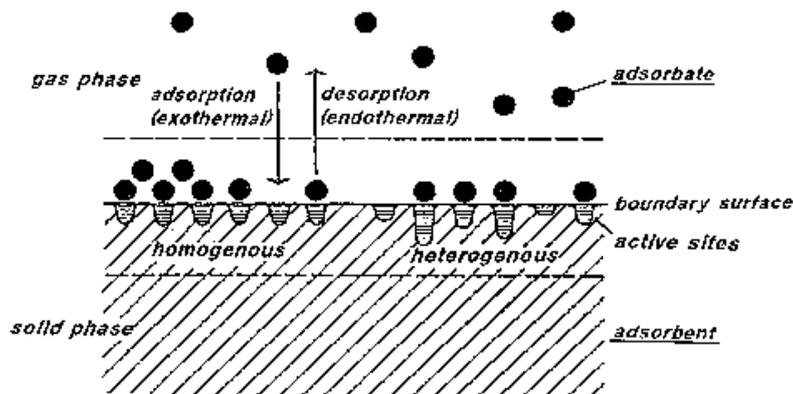


Figura III. 20: Fenómeno de adsorción con sus distintos elementos (Hemming, D. y Degel, J., s.f.).

III.2.8. Detergencia

La detergencia se refiere al proceso de remoción de la “suciedad” de una superficie sólida o de una estructura fibrosa mediante un baño líquido, en el cual la acción limpiadora del solvente se ve considerablemente aumentada por la combinación de efectos atribuibles a un *detergente*, el cual actúa alterando los efectos interfaciales en los diversos límites del sistema, tales como: adsorción a las interfases sólido-líquido y líquido-líquido, alteración de las tensiones interfaciales, solubilización, emulsión y dispersión. Simultáneamente, mediante la detergencia se contrarrestan las valencias secundarias o los efectos de cargas que mantienen adheridas las partículas sobre las superficies sujetas a limpieza. La detergencia también implica la capacidad de mantener en suspensión a la suciedad removida y la prevención de su redeposición sobre la superficie.

El fenómeno de detergencia, depende en primer lugar de la naturaleza del sistema, esto es, de su composición y de las relaciones fisicoquímicas y geométricas entre el sustrato, la suciedad y el baño. Sin embargo, la detergencia es un efecto dinámico. Por consiguiente, tal fenómeno depende también de todos los factores que afectan la interacción fisicoquímica, entre los que se pueden destacar a la temperatura (Schwartz, 1962).

Existen tres subsistemas fundamentales que componen el fenómeno detergente: 1) El sucio (material que es removido del sustrato en el proceso de limpieza), 2) el sustrato (la superficie a ser limpiada) y 3) la solución limpiadora o “baño” (líquido que es aplicado al sustrato con el fin de remover el sucio).

1) Sucio: Con respecto a la “suciedad” o “sucio”, se pueden especificar algunos aspectos con miras a describirlo mejor. Se considera al sucio como toda aquella materia indeseable o “materia en el lugar incorrecto” (Cutler y Davis, 1972). Sin embargo, para lograr definir al sucio de una forma adecuada, es necesario tomar en cuenta ciertas restricciones, al menos en cuanto a las implicaciones fisicoquímicas del proceso detergente. Una de estas restricciones está relacionada con la extensión geométrica de dicho material indeseable. El sucio debe tener dimensiones espaciales tales que no pueda ser removido mediante esfuerzos mecánicos, como por ejemplo el levantamiento con espátula. Paralelamente, la adhesión del sucio al sustrato debe ser lo suficientemente intensa como para impedir que pueda ser retirado mediante procedimientos mecánicos tales como restregado, cepillado o limpieza con plumeros. Finalmente, los materiales fácilmente solubles en agua no suelen ser considerados “suciedad” (considerando que el baño sea acuoso, lo cual es normalmente el caso), excepto en el caso del lavado en seco (Cutler y Davis, 1972).

De acuerdo a Cutler y Davis (1972), el sucio se puede clasificar en dos grandes grupos de acuerdo a su estado físico de agregación: los líquidos y los sólidos. Los sucios líquidos son

generalmente oleosos y podrían contener grasa de piel (sebo), ácidos grasos, aceites minerales y vegetales, alcoholes grasos y otros componentes que se encuentran en materiales cosméticos. El sucio líquido se presenta normalmente como una capa delgada distribuida sobre el material a ser limpiado. Por otra parte, los sucios sólidos con frecuencia contienen hollín, proteínas de la piel, óxidos de hierro y arcilla que suelen presentarse en forma de partículas discretas. Cabe destacar que, normalmente, el sucio consiste de una mezcla heterogénea de componentes sólidos y líquidos e incluso de fases intermedias entre estos.

Durham (1956) expone que las fuerzas de Van der Waals son las responsables de mantener el sucio adherido al sustrato, aunque ellas pueden variar en intensidad dependiendo de la forma en que se encuentre el sucio (ya sea líquido o sólido), y de la naturaleza del sustrato. De igual manera, este investigador indica que en los sucios sólidos las fuerzas eléctricas son de mayor intensidad que en los líquidos y que además, los enlaces de hidrógeno del sucio al sustrato generalmente no ocurren, y cuando ocurren, producen una mancha que es difícil de remover mediante los procesos comunes de limpieza.

2) Sustrato: este elemento puede variar casi sin limitación alguna, en lo que respecta a la configuración de su superficie. Puede ser liso y plano, como un vidrio de ventana o un muro pintado, o presentar una superficie muy compleja como un tejido o un material poroso, como el suelo. Los sustratos también pueden diferir en cuanto a su naturaleza líofílica. Algunos como el vidrio y la madera, son hidrofílicos, otros como la pintura, algunos metales y la tela encerada son hidrofóbicos (Schwartz, 1962). Es importante observar que, adicionalmente, tanto los tejidos como los materiales porosos pueden retener al sucio mecánicamente.

3) Baño: en un sistema detergente el baño es normalmente una solución cuyo soluto es el detergente, el cual tiene como ingrediente activo a un surfactante. Estas soluciones también suelen contener otros componentes que pueden contribuir (vigorizadores) o, por el contrario, desmejorar al fenómeno detergente (Schwartz, 1962).

Es posible extrapolar un sistema detergente común a aquel que se estudia en este proyecto de investigación. En este caso, el sistema estaría comprendido por un sustrato o superficie a limpiar que vendría siendo la dentina, el sucio representado por la capa de barrillo dentinario y finalmente la solución detergente.

De acuerdo a Rosen (1978), en todo fenómeno detergente se dan al menos las siguientes dos etapas:

1. Remoción del sucio del sustrato.

2. Suspensión del sucio en el baño y prevención de su redeposición (o deposición) sobre el sustrato.

1. Remoción de “sucio” de un sustrato sólido y sus mecanismos

Esta fase involucra al fenómeno de detergencia en sí mismo bajo diferentes mecanismos. Todos los efectos superficiales y/o interfaciales fundamentales promovidos por el detergente con el fin de retirar la “suciedad”, tienen lugar en esta etapa. El mecanismo fenomenológico de remoción del sucio dependerá, entre otros factores, de la naturaleza del sucio, del sustrato y de la solución detergente. La temperatura también, juega un rol importante. En la presente sección, se diferenciarán los mecanismos mediante los cuales se lleva a cabo dicho fenómeno, tomando como referencia la naturaleza del sucio, que como se mencionó en párrafos anteriores, pudiese ser sólido o líquido.

1.1. Remoción de partículas sólidas:

Rosen (2004) propone que en el caso en el que el sucio se encuentre en forma de partícula sólida, la remoción se logra al menos mediante tres mecanismos que ocurren simultáneamente:

- Mojabilidad del sustrato y de las partículas sólidas de sucio por el baño.
- Adsorción de surfactante y otros componentes del baño (iones orgánicos) sobre las interfases sustrato/líquido y partícula/líquido.
- Incremento de los potenciales negativos de las capas de Stern en las superficies del sucio y del sustrato tras la adsorción sobre ellos de aniones.

- **Mojabilidad del sustrato y de las partículas sólidas de sucio por el baño.**

En el caso de la detergencia, el baño, generalmente una solución acuosa de detergente, es un líquido capaz de “mojar” tanto al sustrato como a la partícula de sucio. El simple hecho de “mojar” las superficies de sucio y sustrato, facilita el fenómeno de detergencia, debido a que esto conduce a la formación de dobles capas eléctricas que disminuyen las interacciones de tipo atractivas que tienen lugar entre el sucio y el sustrato. Tales dobles capas eléctricas casi siempre generan cargas de signo similar en el sustrato y partículas de sucio, lo cual conduce a una repulsión mutua entre ellas, que al superponerse sobre las atracciones de Van der Waals preexistentes, causan una disminución neta de las fuerzas de adhesión. Además, el agua podría promover la hidratación y subsiguiente hinchamiento de la superficie del sustrato, especialmente si es una fibra natural, resultando en un incremento en la distancia entre la partícula y el sustrato, y en consecuencia una disminución de la adhesión.

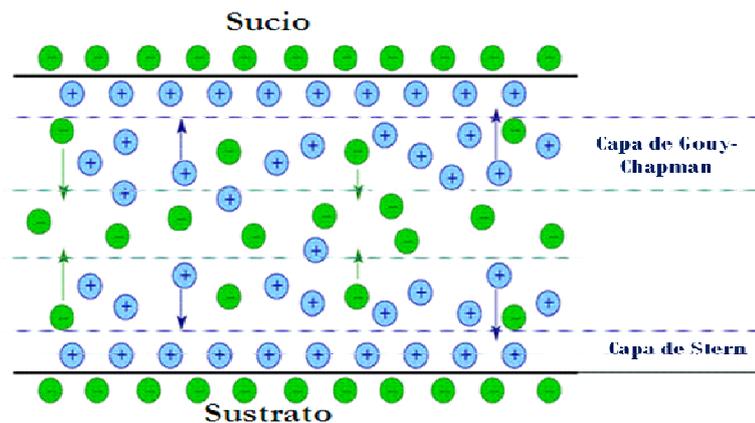


Figura III. 21: Formación de la Doble Capa Eléctrica entre las superficies Sustrato - Sucio

La tendencia del baño (B) a extenderse sobre la partícula de sucio (P) o el sustrato (S) se describe por el valor de los Coeficientes de Difusión (spreading coefficients), $S_{B/P}$ y $S_{B/S}$, respectivamente:

donde los subíndices PA, SA y AB se refieren a las interfases partícula/aire, sustrato/aire y aire/baño(solución detergente), respectivamente. La superficie del sucio o sustrato se mojará por el baño de manera espontánea si el coeficiente de difusión es positivo; de lo contrario, se ha de aplicar trabajo. La adsorción del surfactante (detergente) presente en el baño sobre la interfase aire/baño o sobre el sustrato (con el grupo hidrofílico orientado hacia el baño), puede reducir las γ_{AB} , γ_{PB} , γ_{SB} , y en consecuencia incrementar la tendencia del baño a “mojar” al sucio. Frecuentemente, la partícula de sucio y el sustrato son de naturaleza hidrofóbica, lo cual implica que γ_{PA} y γ_{SA} son bajos; por lo tanto, se requiere un trabajo mecánico adicional con el fin de lograr mojarlas. Ésta es una de las razones por las que el lavado está casi siempre acompañado de un trabajo mecánico (Rosen, 2004).

- **Adsorción de surfactante y otros componentes del baño (iones orgánicos) sobre las interfases sustrato/líquido y partícula/líquido.**

La acción detergente del surfactante en el caso de sucios sólidos tiene lugar según este mecanismo. La adsorción de surfactantes en las interfases sustrato/líquido y partícula/líquido, trae como consecuencia la disminución de γ_{SB} y γ_{PB} respectivamente, con una consecuente reducción del trabajo mecánico requerido para remover la partícula del sustrato, denominado trabajo de adhesión

W_a , el cual está dado por la siguiente expresión:

$$W_a = \gamma_{SB} + \gamma_{PB} - \gamma_{SP}$$

- **Incremento de los potenciales negativos de las capas de Stern en las superficies del sucio y del sustrato tras la adsorción sobre ellos de aniones.**

La remoción de partículas de sucio del sustrato está principalmente influenciada por el incremento en los potenciales eléctricos negativos de las capas de Stern, tanto del sustrato como de las partículas de sucio, debido a la presencia de aniones en el baño. Como es de esperarse, los surfactantes aniónicos son particularmente efectivos cuando se quieren incrementar estos potenciales, aunque los iones orgánicos, en especial los polivalentes, son igualmente útiles para tal propósito. El incremento de los potenciales eléctricos negativos, tanto del sustrato como de la partícula de sucio, aumenta la repulsión mutua, esto implica que la energía necesaria para remover el sucio del sustrato es menor, y a su vez la barrera energética para permitir la redeposición se ve incrementada (Kling and Lange, 1960).

La adsorción de surfactantes noiónicos sobre el sucio o sustrato, no incrementa significativamente los potenciales eléctricos de las capas de Stern, lo cual se traduce en que no son tan efectivos como los aniónicos, cuando lo que se busca es remover partículas de sucio, sin embargo, se pueden emplear para producir barreras estéricas en la prevención de redeposición de sucio (Albin, 1973).

En general, la reducción del trabajo de adhesión entre el sustrato y el sucio causado por la adsorción de las moléculas de surfactantes sobre ellos con el grupo hidrofílico orientado hacia el baño, la reducción de las fuerzas de atracción de Van der Waals como resultado de la hidratación de los grupos hidrofílicos del surfactante, y el incremento de la repulsión electrostática debido al aumento en magnitud de los potenciales eléctricos facilitan la separación del sucio del sustrato.

No obstante, siempre se requiere trabajo mecánico para retirar un sucio sólido de un sustrato cualquiera. Se tiene que las partículas más grandes son removidas con mayor facilidad que aquellas más pequeñas. En las partículas pequeñas la relación del área de contacto, de la partícula con el sustrato, A_0 con respecto al área superficial total de contacto, A , tiende a ser alta. Cualquier fuerza no inercial que pueda remover la partícula de sucio del sustrato, será proporcional a $(A - A_0)$, mientras que aquella fuerza que mantenga unida a la partícula con el sustrato será proporcional a A_0 (Schwartz, 1972). En consecuencia, en el caso de partículas pequeñas, será necesaria una fuerza por unidad de área más grande, con el fin de retirar al sucio del sustrato. Además, la velocidad de flujo resultante de la agitación mecánica es muy baja cerca de la superficie del sustrato; por consiguiente, dichas

partículas se encuentran a bajas velocidades. Así, las partículas de sucio menor a 1 μm , por ejemplo, son difíciles de remover de las fibras textiles (Lange, 1967).

2. Suspensión del sucio en el baño y prevención de su redeposición (o deposición) en el sustrato

Una vez removido el sucio del sustrato, es imperativo mantener estable la suspensión de suciedad en el baño, con el fin de evitar su posterior redeposición, en otras palabras, se busca evitar que el sucio vuelva a adherirse sobre el sustrato original (redeposición) o algún otro sustrato presente en el sistema (deposición).

La redeposición es el fenómeno inverso de la remoción y está regido por los mecanismos inversos. Durante el lavado con una solución detergente, las condiciones son en general tales que la remoción excede considerablemente la redeposición (cambio de mojabilidad, aumento de fuerzas repulsivas sucio-sustrato); además la agitación del líquido evita la acción de la gravedad sobre el sucio, el cual podría sedimentarse; aunque la agitación favorece el contacto sucio dispersado-sustrato (Rosen, 2004).

Este fenómeno ocurre en general cuando se produce una inestabilidad o un cambio repentino en el líquido dispersante, como por ejemplo cuando el baño se satura de sucio, cuando precipitan nuevos sucios como jabones de calcio, o bien cuando se diluye considerablemente la solución como por ejemplo en la operación de enjuague. En tales circunstancias el líquido puede perder su capacidad dispersante y como consecuencia el sucio puede depositarse o redepositarse (Rosen, 2004).

Numerosos factores pueden influenciar el equilibrio entre remoción y redeposición del sucio: el propio surfactante, los mejoradores o secuestradores de iones polivalentes en caso de agua dura, el tipo de sustrato, el tipo de sucio, la agitación del sistema, y la presencia de agentes llamados de anti-redeposición (Salager, 1988).

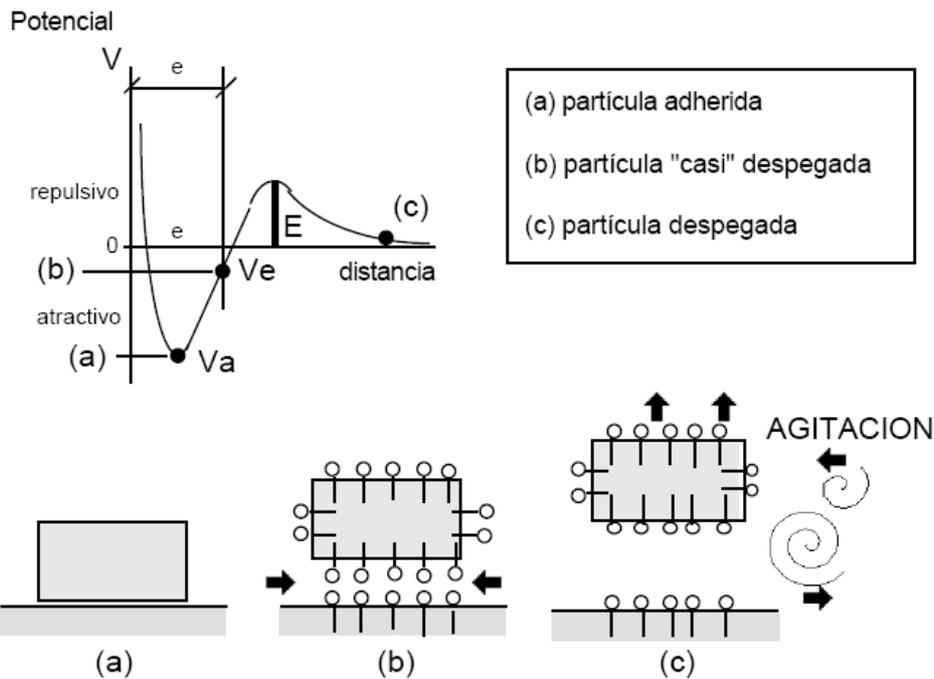


Figura III. 22: Destabilización de la adhesión del sucio – sustrato (Salager, 2002).

III.2.9. Permeabilidad

La permeabilidad se refiere a la capacidad que posee un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, y es impermeable si dicha cantidad de fluido es despreciable. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos: su porosidad, la densidad de flujo empleado y la presión a la que se encuentra sometido el fluido (“Permeabilidad”, s.f.).

La permeabilidad en el SMD se mide en cm^2 o m^2 . La unidad derivada de la Ley de Darcy¹ es el darcy, y habitualmente se utiliza el mieldarcy:

$$1 \text{ Darcy} = 9,86923 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$$

La permeabilidad dentinaria se define como el movimiento del fluido dentinario a través de los túbulos, desde la pulpa dentaria hacia la unión amelodentinaria y viceversa (véase apartado Generalidades Dentales). Este movimiento constante hace que el sistema dentino – pulpar se comporte como una bomba aspirante impelente, siendo el responsable del estímulo hidrodinámico (Pashley, 1993; Uribe, - Echeverría, 1997).

III.2.10. Flotación

La flotación es un método de separación que se basa fundamentalmente en el fenómeno de hidrofobación de una superficie por la adsorción de sustancias surfactantes. Es ampliamente utilizado en la recuperación de minerales y en otros procesos de separación.

Este método tiene lugar gracias a la ocurrencia de cierto fenómeno interfacial denominado *mojabilidad*. Como se ha explicado en apartados anteriores, el sistema debe estar conformado por dos fluidos en contacto con un sólido, y cada uno de ellos puede o no mojar la superficie del mismo. En este caso, los dos fluidos son el aire (A) y el agua (W) o un aceite (O), por lo tanto, se hablará de mojabilidad hidrófila o hidrófoba. Si el ángulo de contacto entre el agua y la superficie es inferior a 90° , la superficie es hidrófila o hidrofílica, por el contrario si este ángulo es mayor a 90° , la superficie es hidrófoba o hidrofóbica.

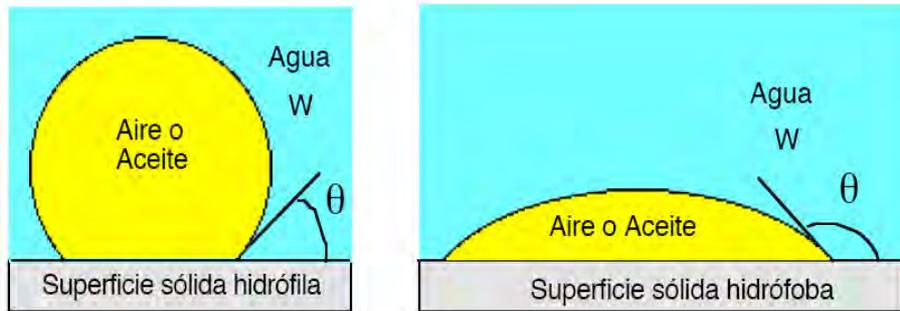


Figura III. 23: Hidrofilicidad o hidrofobicidad de una superficie (Salager y Forgariini, 2007)

Cuando una superficie es hidrófoba las gotas de aceite o las burbujas de aire tienen tendencia a adherirse a la superficie sólida. En el caso de burbujas o gotas pequeñas, resulta obvio que la probabilidad de despegue o de arranque es mucho menor cuando ellas están aplastadas sobre la superficie ($\theta < 90^\circ$).

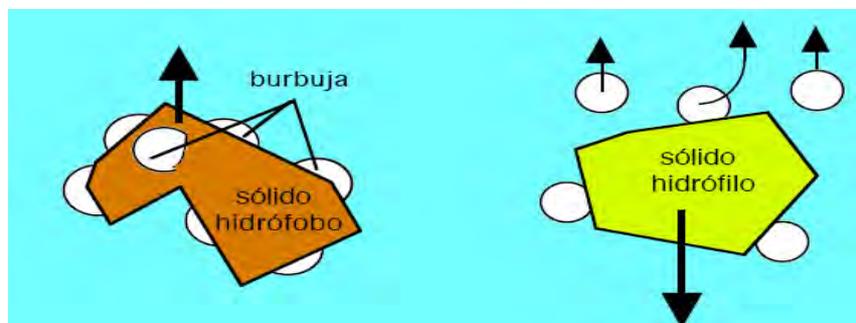


Figura III. 24: Flotabilidad de burbujas o gotas de aceite cuando estas son más pequeñas que las partículas (Salager y Forgariini, 2007).

De manera análoga, en el caso en que las partículas son más pequeñas que las burbujas o gotas, si la superficie sólida está hidrofobada, las partículas tienden a penetrar en el interior de la burbuja (o gota), resultando así protegidas de las perturbaciones externas que puedan favorecer su despegue, como en el caso de una partícula hidrófila.

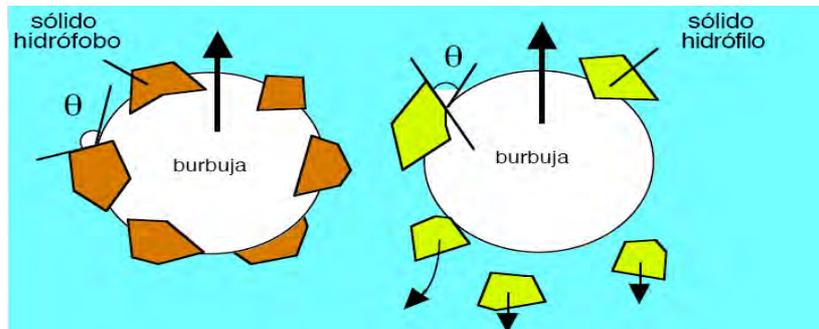


Figura III. 25: Flotabilidad de burbujas o gotas de aceite cuando estas son más grandes que las partículas (Salager y Forgiarini, 2007).

En el caso de ciertos minerales elementales existe muy poca probabilidad de hidroxilación de la superficie (por ende hay poca afinidad por el agua) y la tendencia espontánea será obtener una superficie hidrofobada propensa a la flotación. No obstante, conviene favorecer dicha tendencia promoviendo la adsorción de surfactantes, mediante una interacción de tipo *fisisorción* o *quimisorción*, dejando hacia la fase acuosa su parte lipofílica. Los surfactantes deben poseer una muy fuerte afinidad por la superficie, de manera que puedan cubrirla con una monocapa, aún a muy baja concentración en fase acuosa. Esta capa presenta el grupo hidrófobo hacia la solución acuosa, eliminando así las interacciones entre el sólido y el agua, produciendo entonces las condiciones de hidrofobación por adsorción.

A la par de la hidrofobación, la flotación también involucra ciertos fenómenos hidrodinámicos, los cuales conciernen principalmente a la probabilidad de captura o extracción de una partícula hidrofobada por una burbuja o gota. Dicha probabilidad está supeditada a tres factores:

- La probabilidad de contacto o colisión partícula-burbuja
- La eficiencia de la colisión o probabilidad de adhesión
- La probabilidad de arrastre

De los estudios hechos se pueden extraer los siguientes lineamientos: las colisiones se deben a procesos inerciales, de sedimentación o de difusión browniana según que las partículas y burbujas sean grandes, micrométricas o submicrométricas. El caso de la captura de partículas por una burbuja o gota que sube, permite ilustrar las dificultades presentes (ver Figura III.26)

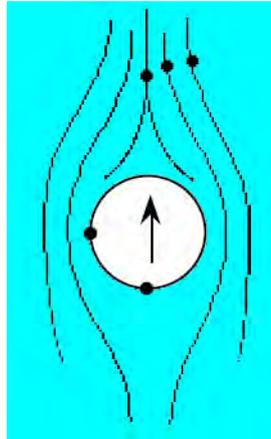


Figura III. 26: Captura de una partícula por una burbuja o gota (Salager y Forgiarini, 2007).

Sólo las partículas presentes en las líneas de corriente muy vecinas a la burbuja podrán adherirse. Además, es obvio que para una buena probabilidad de colisión se deberá reunir las condiciones de drenaje rápido de la película acuosa entre el sólido y el gas, y darle un tiempo suficiente. Esto puede significar que debe haber poca agitación y que las burbujas deben ser muy pequeñas. Pero por otra parte, es obvio que la probabilidad de colisión entre burbuja y partícula es mayor en un medio muy agitado, especialmente si hay efectos inerciales intensos. Cuando la partícula y la burbuja pasan a una distancia que puede considerarse suficientemente pequeña para ser una colisión, existe todavía la etapa de adhesión, que tiene que ver con la probabilidad de que la película líquida se rompa o no durante el "tiempo de colisión". Esto depende de factores cinéticos como el drenaje de la película, pero también de factores termodinámicos como los potenciales involucrados y el estado de las superficies. (Salager y Forgiarini, 2007).

III.3. Dispersiones

La inmiscibilidad es una propiedad atribuida a la diferencia en la naturaleza de las fuerzas intermoleculares de sustancias que al unirse, se separan formando una mezcla heterogénea. Ahora bien, existen fenómenos interfaciales que permiten la unión de dos o más sustancias inmiscibles, formando así, sistemas dispersos en los cuales una fase se encuentra en forma fragmentada (fase dispersa) dentro de otra fase continua, separadas por una interfase. (S122N)

En la Tabla se muestran varios tipos de dispersiones junto a su clase y algunos ejemplos.

Tabla III. 2: Clasificación de las dispersiones según las fases combinadas (Krestonosich et al., 1992).

Fase dispersa	Medio de dispersión	Clase y ejemplos
Gas	Líquido	Espuma crema: batida, espuma de jabón
Gas	Sólido	Espuma sólida: bizcocho
Líquido	Gas	Aerosol líquido: niebla
Líquido	Líquido	Emulsión: mayonesa, leche, mantequilla
Líquido	Sólido	Emulsión sólida: petrolatum (aceite mineral disperso en cera de petróleo)
Sólido	Gas	Aerosol sólido: humo y polvo
Sólido	Líquido	Suspensión: plata coloidal en agua, chocolate
Sólido	Sólido	Suspensiones sólidas: oro coloidal en vidrio, porcelana

Para lograr un sistema disperso estable es necesario una disminución significativa de la tensión superficial o interfacial, definida como la cantidad mínima de trabajo requerida por unidad de área para crear mayor interfase o superficie entre dos sustancias con distinta afinidad (Rosen, 1978). En otro sentido, al momento de formar una dispersión la interfaz o superficie tiende a adoptar una configuración que minimiza la energía libre interfacial o superficial (Schramm, 2005).

Una de las características más importantes de las dispersiones es el tamaño de los fragmentos de la fase dispersada. En efecto, el comportamiento de la dispersión y su funcionamiento, dependen en buena parte del tamaño de los fragmentos o cantidades de materia gaseosa, líquida o sólida presentes en el seno de la dispersión. Si estas partículas se reconocen de tamaño macroscópico se tendrán burbujas, gotas o partículas, según la fase dispersa. Si los fragmentos son de tamaño inferior al micrómetro pero netamente superior al tamaño de una molécula, las dispersiones se llaman coloides; entre los coloides se encuentran las macromoléculas, las suspensiones sólidas (soles) y los agregados de surfactante (micelas). (Salager, 2002)

Según la definición anterior de coloides, el límite superior de tamaño depende esencialmente de la estabilidad del sistema frente a la sedimentación gravitacional. Si no hay separación por sedimentación se habla de una solución, suspensión coloidal o una microemulsión. Al contrario, los sistemas que se separan por sedimentación (cualquiera sea el tiempo requerido) no son estables y se llamarán espumas, (macro) emulsiones o suspensiones. (Salager, 2002)

Por último, es importante resaltar los métodos utilizados para preparar sistemas coloidales: en primer lugar se tiene la condensación o agregación, donde el tamaño coloidal se alcanza a partir de partículas más pequeñas, y en segundo lugar se emplea la dispersión, por el cual las partículas de

dimensiones coloidales se obtienen por rompimiento de partículas más grandes (Krestonosich *et al.*, 1992).

Para efectos del presente proyecto es importante recordar el significado de las emulsiones. Las emulsiones representan un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersada en la otra, y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante. El papel de este último componente, también llamado agente tensoactivo o superficialmente activo, es favorecer la dispersión mediante una reducción en la tensión superficial.

En la mayoría de los casos en los cuales se hace una emulsión con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceite u orgánica. Por convenio, se usan las abreviaturas W (water) y O (oil) para dichas fases. Si la emulsión contiene gotas de aceite (O) dispersadas en agua (W), se le llamará emulsión O/W, la emulsión normal para todas la aplicaciones con excepción de la producción del petróleo, en la cual se denomina emulsión inversa. Si la fase dispersada es el agua, se llama una emulsión W/O, emulsión normal para la industria petrolera e inversa para los demás casos (ver Figura III.27).

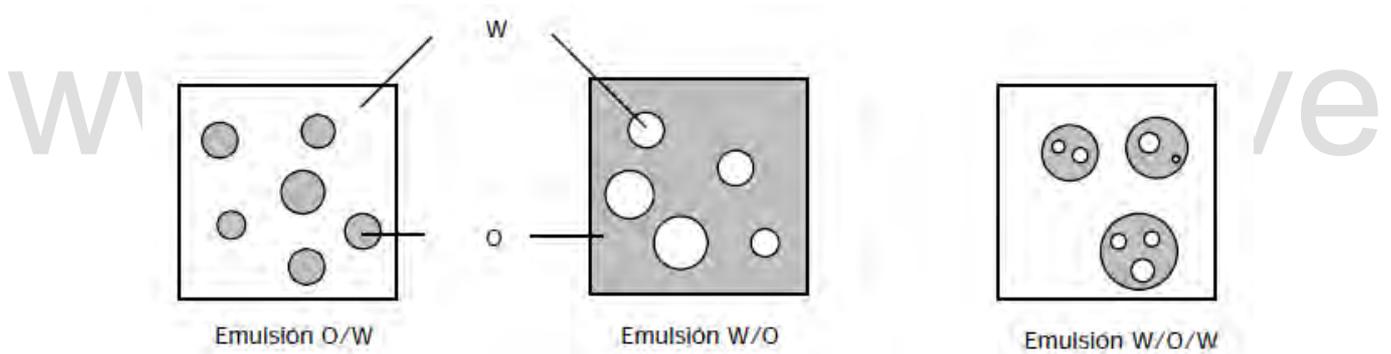


Figura III. 27: Tipos de emulsiones (Salager, 1993).

III.4. Generalidades Dentales

III.4.1. El Diente

El diente constituye la principal herramienta natural empleada por el hombre para ejecutar fundamentalmente la primera etapa del proceso digestivo, así como también participar en la comunicación oral. De hecho, la primera acción representa un desgaste o daño que se evidencia con el pasar del tiempo en una mayor o menor intensidad, dependiendo del cuidado y atención que se le brinde al diente. Es por tal motivo que se emplean ciertas técnicas mediante las cuales el diente se

restaura de los efectos abrasivos a los que ha sido sometido y es cuando la adhesión juega un rol importante (“Diente”, s.f.).

A modo descriptivo un diente es un órgano anatómico duro de color blancuzco, enclavado en los alvéolos de los huesos maxilares a través de un tipo especial de articulación denominada *gonfosis* y en la que intervienen diferentes estructuras que lo conforman: el cemento dentario y el hueso alveolar ambos unidos por el ligamento periodontal. El diente está compuesto por calcio y fósforo, los cuales se encargan de otorgarle la dureza que lo caracteriza. Básicamente, en el diente se pueden reconocer dos partes, la corona, parte visible recubierta por esmalte dental y la raíz no visible en una boca sana. Los dientes, ordenados desde el centro hacia las mandíbulas son: incisivos que cortan, los caninos que desgarran, los premolares que trituran y los molares que muelen (“Diente”, s.f.).

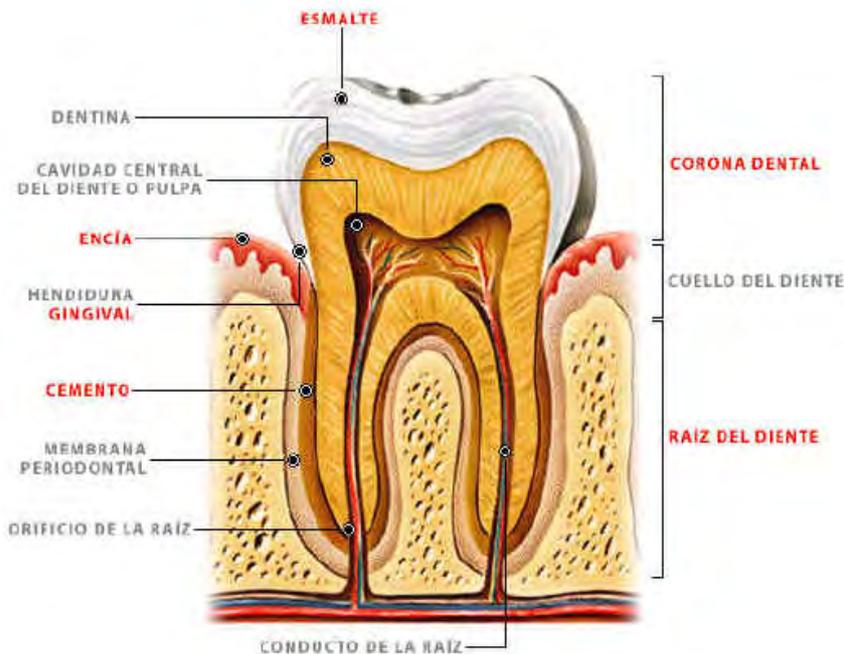


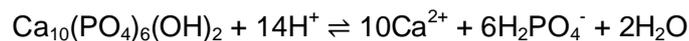
Figura III. 28: Estructura del diente (“Caries”,s.f.)

III.4.2. Tejidos dentales

Para efectos de la comprensión de diversos aspectos, en el presente trabajo se describirán algunas de las características de la naturaleza biológica y funcional del diente. Básicamente un diente está conformado por cuatro tejidos esenciales: el esmalte, la dentina, la pulpa y el cemento.

- **Esmalte**

Este componente es el tejido más duro del cuerpo humano y le confiere la protección necesaria a los tejidos vitales de la dentina y la pulpa. En la madurez, el esmalte está comprendido en un 95 a 98% en peso de contenido inorgánico (equivalente a 86% en volumen), principalmente constituido por la hidroxiapatita, que es un mineral muy poco soluble en agua formado por fosfato de calcio cristalino que representa un depósito del 99%p/p del calcio corporal y 80%p/p del fósforo total. La hidroxiapatita se disuelve en ácidos tal y como se puede observar en la siguiente reacción (Schwartz, 1996):



El esmalte también contiene entre 1 y 2% en volumen de una matriz orgánica, principalmente colágeno tipo I y entre 4 y 12% p/p de agua, la cual se encuentra contenida en los espacios intercrystalinos y en una red de microporos que abren hacia la superficie externa. Los microporos forman una conexión dinámica entre la cavidad oral externa y los túbulos de la pulpa y dentina (Schwartz, 1996). En zonas donde el esmalte es más delgado o se ha desgastado, puede ser sumamente sensible. El esmalte es translúcido, brillante e insensible al dolor pues en el no existen terminaciones nerviosas. No puede regenerarse, por eso la caries es una enfermedad crónica. En cambio si puede remineralizarse con flúor. Con el flúor se forman cristales de fluorhidroxiapatita que es mucho más resistente que la hidroxiapatita al ataque de la caries dental ("Diente", s.f.).

- **Dentina**

La dentina es un tejido intermedio, más blando que el esmalte y es el segundo tejido más duro del cuerpo. La dentina coronaria le proporciona al esmalte quebradizo una fundación elástica. Conjuntamente con la dentina radicular, la cual está cubierta con cemento, la dentina conforma el seno del diente y un revestimiento de protección para la pulpa. A pesar de ser un tejido vital sin suplemento vascular o inervación, es capaz de responder ante estímulos externos térmicos, químicos o táctiles ("Dentina", s.f.)

La dentina está compuesta por cristales de apatita inorgánica incrustados en una matriz orgánica constituida por fibrillas de colágeno. El extenso proceso citoplasmático de las células forman canales o túbulos que atraviesan todo el tejido. A diferencia del esmalte, el cual es acelular y predominantemente mineralizado, la dentina está másicamente comprendida por un 70% de hidroxiapatita, 18% de una matriz orgánica que contiene principalmente colágeno tipo I y por un 12% de agua (Schwartz, 1996).

La dentina es amarillenta y ligeramente más dura que el hueso y es un tejido muy permeable debido a la gran cantidad de túbulos que lo atraviesan. Se diferencian dos tipos distintos de dentina: 1) un componente estructural primario o *dentina intertubular*, constituida por hidroxiapatita integrada a

una matriz de colágeno entre los túbulos y 2) una *dentina peritubular*, libre de colágeno, con una pared tubular hipermineralizada. Las proporciones relativas y variables de la matriz sólida mineralizada y el volumen lleno de los túbulos determinan la respuesta clínica y biológica de la dentina. Estas relaciones varían de acuerdo a la profundidad de la dentina, la edad, y la historia traumática del diente (Schwartz, 1996).

El diámetro de los túbulos decrece desde 2,5 μm a la altura de la pulpa hasta 0,8 μm en la unión esmalte – dentina. Por otra parte, el número de cavidades también decrece desde 45000 por mm^2 cerca de la pulpa hasta unos 20000 por mm^2 cerca de la unión esmalte – dentina (Schwartz, 1996).

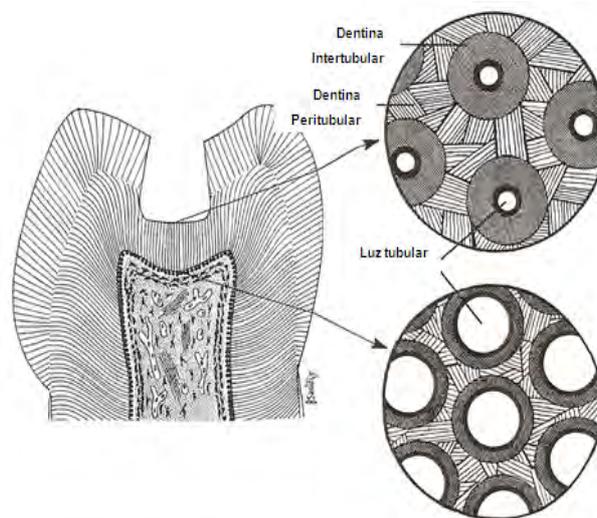


Figura III. 29: Dentina Intertubular y Dentina Peritubular (Schwartz, 1996).

La dentina sufre varios procesos durante su formación, por lo que de acuerdo a su vitalidad se puede clasificar como:

- Dentina Primaria: se extiende desde el límite con el esmalte o cemento, hasta la pulpa, y comprende toda la formación de la pieza dentaria (primero se forma la corona, luego la raíz).
- Dentina Secundaria: después que se ha formado el diente, se sigue depositando dentina durante toda la vida del diente, pero ahora a una velocidad mucho menor. Con esto la cámara pulpar disminuye de tamaño, igualmente los conductos radiculares. La estructura de esta dentina es igual a la de la primaria, solo que un poco menos mineralizada.
- Dentina reaccional: su formación es producto de alguna alteración como una caries, realización de una cavidad, desgaste del esmalte (aunque no comprometa la dentina).

- Dentina esclerótica: cuando el estímulo sobre la dentina es de poca magnitud, además de la dentina reaccional, los odontoblastos se van retrayendo y van mineralizando el túbulo dentinario (se forma dentina peritubular), con lo que desaparece. En este sector, a las observaciones por desgaste, la dentina se ve transparente.
- Tractos muertos: cuando el abrasivo rompe la prolongación odontoblástica, esta degenera en profundidad, obliterando el sector final, pero el túbulo dentinario queda vacío, llenándose con gérmenes y restos orgánicos de la cavidad bucal. Al observarlo por desgaste, los túbulos dentinarios se ven oscuros, porque se llegan por el material con que se hace el desgaste.

Los odontoblastos son células pulpares que tienen como función principal la producción de dentina (Arriagada, E. s.f.).

- **Pulpa**

Es un tejido blando y fibroso, muy vascularizado e innervado (muy sensible), formado por células conectivas. Está localizado en el interior del diente, ocupando el interior de la corona y las raíces. Sus funciones primordiales son la formación de dentina y la protección del diente dando sensibilidad a la dentina (las fibras nerviosas en el interior de los túbulos de la dentina nacen en la pulpa).

Los dientes exentos de caries, enfermedad periodontal (enfermedades de los tejidos que rodean al diente) y no sometidos a traumatismos poseen una pulpa sana. Cuando esta pulpa enferma por bacterias (caries) o traumatismos se produce una pulpitis. Si esta es irreversible es cuando se debe ejecutar un tratamiento de endodoncia ("La pulpa", s.f.).

- **Cemento**

Es un tejido conectivo altamente especializado. Es una capa dura, opaca y amarillenta que recubre la dentina a nivel de la raíz del diente. Se encarga de unir la pieza dental con el resto de la mandíbula o maxilar.

III.5. Generalidades sobre la Adhesión Dental:

III.5.1. Principios de la Adhesión como Fenómeno Interfacial

La palabra adhesión se deriva del latín *adhaerere* ("ad"= para, "haerere"= pegar) y se refiere al proceso mediante el cual se unen dos superficies. Para que ocurra la adhesión deben existir ciertas fuerzas o una energía mínima entre los átomos o moléculas de cada una de las fases que conforman la interfase, para que ocurra la fijación de las mismas.

Las superficies o sustratos que son adheridos se denominan “adherentes”. El “adhesivo”, por su parte, es el material que cuando se aplica entre superficies o sustancias, puede unirlos, resistiéndose a la separación y transmitiendo la carga a través del enlace (Schwartz, 1996).

Un requerimiento para que este fenómeno tenga lugar es que los dos materiales que pretenden unirse deben mantenerse en íntimo contacto. Además la sustancia adhesiva debe mojar de la forma más óptima posible a las superficies, en otras palabras, la tensión superficial del adhesivo debe ser menor a la energía libre superficial del adherente y el ángulo de contacto entre ambos debe ser menor a 90° . En este caso lo que ocurre es que el adhesivo en la fase líquida es atraído con más fuerza por las moléculas del sustrato que por las suyas propias. Esta atracción superior del sustrato por el líquido se produce cuando su energía superficial libre excede la resistencia cohesiva (tensión superficial) de éste (Baier et al., 1968).

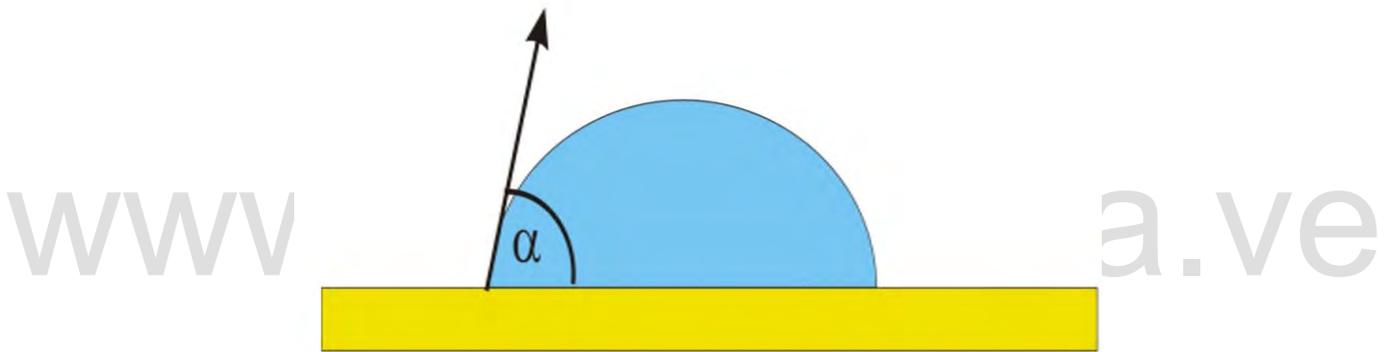


Figura III. 30: Ángulo de contacto entre adhesivo y adherente (“Capacidad”,s.f.)

Las principales fuerzas de mojado son las de van der Waals, que surgen de la interacción de los dipolos permanentes de las moléculas adyacentes. Las moléculas con dipolos permanentes pueden inducir dipolos en moléculas adyacentes y crear fuerzas de Debye. Otros dipolos inducidos (fuerzas de dispersión de London) surgen de las oscilaciones entre las moléculas que tienen dipolos instantáneos de tiempo promedio cero. Estas fuerzas de atracción son muy acentuadas, pero debido a que los efectos disminuyen rápidamente con la distancia, se necesita una asociación íntima para que sean efectivos. Las fuerzas de van der Waals, por ejemplo, varían inversamente con la séptima potencia de la distancia. El fenómeno de resonancia de la unión por puente de hidrógeno, donde dos átomos electronegativos están unidos por uno de hidrógeno, puede desempeñar algún papel suplementario (Ibsen y Neville, 1977).

III.5.2. Fundamentos de la Adhesión Dental

La odontología adhesiva se inició a principios de la década de los 60 cuando los adhesivos tisulares de cianoacrilato fueron usados por primera vez para el sellado de los puntos y fisuras en desarrollo y aproximadamente para la misma época se emplearon restauraciones de acrílico directas con una técnica de grabado ácido para la reparación de ángulos incisales fracturados. Al tiempo que la tecnología de los compuestos de diacrilato maduraba durante la década de 1960, aumentó el interés en las posibilidades de la odontología adhesiva. Las convenientes fuerzas de adhesión logradas en condiciones óptimas llevaron a los investigadores a más y más campos en los cuales los materiales restauradores anteriores, aun con técnicas adhesivas eran de por si inadecuados (Ibsen y Neville, 1977).

El objetivo fundamental de la odontología adhesiva no es únicamente la restauración de lesiones cariosas, en lugar de eso, estos procedimientos se usan como auxiliares para mejorar la calidad del sellado marginal y la adaptación marginal y reducir la cantidad de estructura dentaria sana que se sacrifica normalmente para cumplir con los requisitos de la retención mecánica. La principal aplicación, de hecho, viene siendo el sellado de puntos y fisuras y la protección de zonas de erosión idiopática. Con frecuencia también se usan como alternativas de las técnicas convencionales con el objeto de ofrecer una mejor apariencia y aumentar las posibilidades de una adecuada higiene bucal, como con los brackets ortodónticos y las férulas temporarias y permanentes (Ibsen y Neville, 1977).

La fuerza y durabilidad de los enlaces adhesivos dependen de varios factores. Entre estos caben mencionar las propiedades fisicoquímicas del adherente y del adhesivo, las propiedades estructurales del adherente, el cual es heterogéneo, la formación de contaminantes superficiales durante la preparación de las cavidades, el desarrollo de esfuerzos externos que contrarrestan el proceso de adhesión y sus mecanismos de compensación, y el mecanismo de transmisión y distribución de cargas aplicadas a través del enlace. Además, el ambiente bucal, que está sometido a humedad, esfuerzos físicos, cambios en la temperatura y pH, componentes alimenticios, hábitos de masticación, influyen considerablemente a las interacciones entre los materiales y los tejidos dentales (Schwartz, 1996).

El proceso de adhesión dental implica que el sistema adhesivo – adherente cumple con una serie de requisitos entre los que se pueden citar:

- Requisitos del adhesivo:
 - Baja tensión superficial
 - Baja viscosidad.

- Estabilidad dimensional.
 - Propiedades mecánicas adecuadas: para resistir fuerzas de masticación.
 - Hidroresistencia.
 - Compatibilidad biológica
- Requisitos de la superficie

En general, tanto el esmalte como la dentina deben presentar alta energía superficial para que atraiga al líquido y este escurra. Para ello es necesario que ella esté limpia y su superficie sea lisa (favorece la unión química pero no la mecánica). Esto es, la superficie debe ser humectable por el adhesivo. No obstante, cada una de ellas presenta ciertas condiciones no necesariamente favorables que la caracterizan y se listan en la tabla a continuación:

Tabla III. 3: Condiciones de las superficies dentales sujetas a adhesión (Esmalte y dentina), (Adhesivos, s.f.)

Condiciones del esmalte	Condiciones de la dentina
<ul style="list-style-type: none"> - Alta energía superficial - No presenta limpieza - Presenta lisura 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja energía superficial - Imposible de limpiar (el agua de los túbulos se considera suciedad) - Es rugosa

Como el esmalte tiene una energía libre superficial alta, se espera que la adhesión al esmalte sea mucho más fácil que la adhesión a la dentina. La diferencia de entre las energías superficiales de ambas se debe a que el esmalte contiene primordialmente hidroxiapatita y esta a su vez, tiene una energía libre superficial elevada, en tanto que la dentina compuesta básicamente por dos sustratos de distinta naturaleza, hidroxiapatita y colágeno, tiene una energía libre superficial más baja (Adhesivos, s.f.).

III.5.3. Mecanismos de Adhesión Odontológica

Los métodos que permiten unir materiales a los dientes se presentan en una amplia gama, no obstante, pueden clasificarse según su modo principal de retención en cuatro grupos:

- **Macromecánicos**

Son aquellos en los que la retención en el diente se logra gracias a la aplicación de una fuerza. Dicho mecanismo es el más primitivo de los cuatro grupos, aunque a menudo suele ser el más eficaz. Este grupo puede estar representado por la unión del tipo tornillo enroscado, como el sistema Splint – Mate de Whaledent, por los surcos retentivos de las coronas tres cuartos o por las trabas en “cola de milano” utilizadas para mantener las amalgamas en su lugar (McLaughlin, 1987).



Figura III. 31: Adhesión macromecánica (“Provisionales”, s.f.)

- **Micromecánicos**

Está mejor representado por la adhesión clásica al esmalte, que consiste en hacer fluir una resina compuesta sobre una superficie que ha sido previamente tratada con una solución ácida moderada (normalmente de ácido fosfórico), con la finalidad de crear miles de agarres mecánicos microscópicos. El empleo de este mecanismo con las resinas compuestas dio por resultado fuerzas de adhesión impresionantes, del orden de 980 a 1400 psi (Thomson y Lividitis, 1982) y (Yedid y Chan, 1980).



Figura III. 32: Adhesión micromecánica (“Profilaxis”, s.f.)

- **Químicos**

Este grupo está representado por los cementos dentales, como el inonómero vítreo, oxisfosfato de zinc, cianoacrilato modificado o los silanos. En él se incluyen materiales clásicamente conocidos como adhesivos. Los adhesivos suelen mostrar una fuerza adhesiva mucho mayor que la cohesiva y la mayoría de ellos muestran una adhesión particular a determinadas superficies. Estos materiales deben poseer gran resistencia adhesiva y cohesiva, deben ser biocompatibles, atóxicos y no irritantes, y sus uniones deberán ser resistentes a la degradación aun después de largos periodos de inmersión en líquidos bucales (McLaughlin, 1987).

- **De Retención Mixta**

Abarcan los sistemas retentivos que reposan sobre más de uno de los tipos citados de retención para alcanzar sus fines. Algunos de ellos son los frentes acrílicos adheridos que utilizan un mecanismo microrretentivo para adherir una capa de resina compuesta o aquellos retenedores que están unidos al esmalte grabado (micromecánicos) a la par que usan alfileres roscados (macromecánicos) para aumentar la retención. La combinación de los distintos métodos de retención incrementa la resistencia adhesiva final más allá de cualquiera de los componentes individuales (McLaughlin, 1987).

III.5.4. Sistemas de Adhesión Dental

El sistema de adhesión dental está conformado por tres pasos fundamentales:

- Grabado ácido del esmalte
- Grabado ácido de dentina
- Aplicación de adhesivos dentinarios
- **Grabado ácido del esmalte**

Existe una técnica básica de adhesión dental ampliamente utilizada denominada *grabado ácido*, desarrollada por Buonocure en 1955. Tiene como objetivos en primer lugar, limpiar la superficie, ya que gracias a esta se elimina la capa superficial del esmalte y en segundo lugar, proporcionar una superficie porosa que permita la mejor retención del adhesivo, formando microporos de 25 a 30 micrones y que son el resultado de la desmineralización de la superficie. Estos microporos se pueden representar como finas varillas que atraviesan el tejido, tal y como se puede apreciar en la figura:

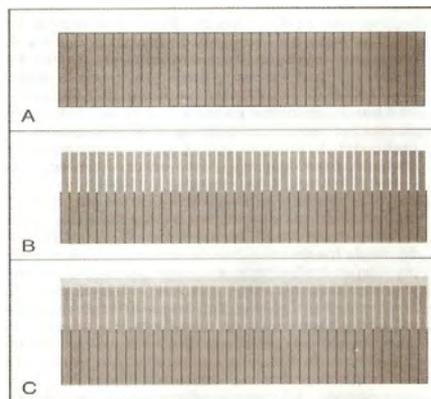


Figura III. 33: Representación esquemática del proceso de grabado ácido del esmalte. A) Las barras verticales representan una superficie limpia compuesta de varillas de esmalte. B) El grabado disuelve algunas de las varillas de esmalte, creando espacios entre ellas en la superficie. C) El adhesivo fluye en los espacios entre las varillas, se endurece y cubre la superficie con una capa de resina. El adhesivo se cierra de manera micromecánica en los espacios existentes entre las varillas de esmalte (Gladwin y Bagby, 2001).

Después, se aplica un sistema de un polímero líquido de baja viscosidad sobre la superficie rugosa que debe mojar a la superficie adecuadamente, de manera que fluya en las irregularidades microscópicas. El sistema de polímero sufre una reacción química, convirtiendo el líquido en un sólido. El sólido recién formado se adhiere a la superficie rugosa del esmalte. Se pueden utilizar gran variedad de ácidos y sistemas de polímeros, aunque debido al tiempo limitado y a las condiciones orales, sólo unos cuantos son apropiados para uso dental (Gladwin y Bagby, 2001).

La técnica básicamente se aplica de la siguiente manera:

- Lavar y limpiar con pómez para eliminar la placa bacteriana (no se usa al aplicar sellantes porque el polvo queda dentro). No se usan pastas profilácticas.
- Hacer bisel en la cavidad: plano, cóncavo o convexo; las curvas aumentan el área de retención y producen mejores resultados. Generalmente se usa una fresa llana. El bisel cóncavo es mejor porque hay mejor adaptación y menor pérdida de tejido.
- Poner el ácido. Antes hay que proteger al diente vecino (banda). Normalmente se emplea ácido fosfórico al 30-37% p/v. Se recomienda usar ácidos comerciales como gel, para controlar el lugar y la cantidad.
- Colocar ácido solo en el bisel.
- Lavar con agua y aire por 20 s. Algunos sistemas usan aspiración del ácido y spray por 5 s con la finalidad de eliminar compuestos fosfatados.
- Secar perfectamente, idealmente con aire presurizado durante 5 s, aplicándolo perpendicularmente al esmalte, protegiendo la dentina (Adhesivos, s.f.).

El tiempo de grabado debe estar comprendido entre 15 y 20 segundos y una de las características de esta técnica es la pérdida de brillo del diente una vez ha sido sometido a la acción del ácido. Cuando el esmalte ha recibido tratamiento con flúor, el tiempo se alarga hasta 60 segundos. La zona grabada no debe rozar con nada para no cerrar las irregularidades.

La superficie grabada debe mantenerse limpia y seca hasta usar la resina. El contacto con sangre o saliva evita que el adhesivo forme prolongaciones en el esmalte. Si hay contaminación con sangre y saliva, se debe volver a lavar con agua oxigenada al 3-5% p/v.

Las resinas compuestas de obturación son viscosas y no mojan el esmalte grabado, para ello se utilizan agentes de unión al esmalte (bonding): matriz de la resina diluida con otro monómero menos viscoso, lo que aumenta la unión mecánica entre el esmalte y la resina. Estos están siendo reemplazados por los llamados adhesivos dentinarios, que se unen a esmalte y dentina.

- **Grabado ácido de la dentina**

En la dentina no se puede hacer grabado ácido debido a su alto contenido de tejido orgánico, es por ello que se debe realizar adhesión específica o química. Algunos de los obstáculos que ofrece la dentina en la adhesión son:

- Es heterogénea: está constituida por colágeno e hidroxiapatita
- De naturaleza tubular, lo que produce un área variable y un constante fluido de líquido
- Presencia de capa superficial de residuos (al tallar una cavidad quedan residuos, los que se adhieren a la dentina).

- **Adhesivos dentinarios:**

La función de los adhesivos dentinarios es crear la unión química entre el calcio y la resina. En teoría el adhesivo debe ser hidrofílico. La unión a la dentina se realiza a nivel microscópico con el colágeno y con el túbulo (no importa el tamaño ni el número de túbulos de dentina). Todos los adhesivos actúan sobre la capa profunda de residuo dentinario, la cual puede ser:

- Conservada
- Eliminada totalmente
- Eliminada parcialmente
- Modificada
- Reestructurada
- Híbrida o integrada

.La resina fluida polimeriza y forma los tags o interdigitaciones de retención creando una traba mecánica. En cuanto a la clasificación de los adhesivos se tiene que es más conveniente hacerlo en generaciones, tal y como se puede vislumbrar en la tabla siguiente:

Tabla III. 4: Diferentes generaciones de adhesivos dentales (Adhesivos, s.f.).

Generación	Características
Primera generación	Antes de 1980. Sin acondicionamiento en dentina, se ponen encima de ella. Tiene valores de adhesión muy bajos en dentina: 2-7 MP; al esmalte: 24-27 MP.
Segunda generación	Adhesión 3 veces mayor a dentina y 30-50% en esmalte.
Tercera generación	Generan fuerza de unión semejante a la que existe entre esmalte y resina. Se estaba tratando de producir solamente una unión química, posteriormente se obtuvo una unión micromecánica, mediante la formación de una capa de interdifusión que conlleva altos niveles de adhesión; esta capa recibe el nombre de capa de hibridación o hibridización de la dentina, la que se obtiene previo tratamiento en dentina.
Cuarta generación	Adhesión superior a 20 MP. Productos comerciales: All Bond2 (Bisco), Opti Bond y Opti Bond F1 (Kerr), Pro Bond (Dentsply), Clear fill tiner bond 2 (Kuraray), Scotch Bond Multipropósito Plus (3M), Bond It (Jeneric).
Quinta generación	Basado en capa de hibridación dentinaria. Uso más sencillo que los anteriores. Resistencia similar a los de cuarta generación. Productos comerciales: Prime and Bond y Prime and Bond 2 (Dentsply), Optibond Solo (Kerr), Bond I (Jeneric), Syntac single Component (Vivadent), Single Bond (3M).

El adhesivo no debe ser absolutamente duro, ya que se fracturaría; debe tener cierta elasticidad, lo que le permite compensar la contracción del composite al endurecer e impedir que el composite se desprenda. Los adhesivos pueden ser multi componente, bi componente o mono componente.

Los acondicionadores ácidos son también utilizados para aumentar la permeabilidad de la dentina peritubular, remover el barrillo dentinario que se explicará con mayor detalle en apartados posteriores y para aumentar la permeabilidad de la dentina intertubular. Aunque ésta última nunca ha sido cuantificada, se supone que debe ser muy baja y se limita a canales de laterales que se ramifican desde túbulos (Chappell et al., 1994; Mjör y Nordahl 1996).

III.5.5. Adhesión Dentinaria como Problema Odontológico

Una interfase ideal entre el material dental restaurador y el tejido del diente sería una que simulara el agarre natural entre el esmalte y la dentina. El contacto molecular íntimo entre las dos

partes es un requisito para el desarrollo de una adhesión suficientemente fuerte. Esto significa que el sistema adhesivo debe mojar muy bien a la superficie, tener una viscosidad tan baja que permita una penetración efectiva en las microporosidades y ser capaz de desplazar aire y humedad durante el proceso de unión. No obstante, esto no siempre se logra con facilidad y en la actualidad tal situación se atribuye básicamente a las condiciones en las que se puede encontrar el tejido dentinario (Schwartz, 1996).

. La dentina como un sustrato dinámico, está expuesto continuamente a procesos fisiológicos y patológicos que promueven una serie de transformaciones morfológicas y estructurales que dan como resultado un tejido menos receptivo a los tratamientos adhesivos. Entre los procesos que más afectan a la dentina se pueden citar el envejecimiento propio del tejido, la abrasión mecánica, la erosión química, los procedimientos dentales y las caries. Todo esto trae como consecuencia la esclerosis, la cual se caracteriza por la formación de una dentina con una apariencia transparente y vidriosa. Básicamente, la esclerosis es el resultado de la obstrucción de los túbulos dentinarios por la yuxtaposición de dentina peritubular y la precipitación de cristales minerales romboédricos. Una dentina esclerótica usualmente contiene pocos túbulos efectivos y por lo tanto una baja permeabilidad y poca sensibilidad a estímulos externos, lo que trae como consecuencia una respuesta muy pobre a la adhesión (Schwartz, 1996).

Por otra parte, cuando la superficie del diente se somete a la acción de algún instrumento rotatorio y manual que normalmente se emplea para la preparación de la cavidad en la cual se va aplicar el elemento restaurador, una capa residual producto del corte se esparce sobre las superficies de la dentina y esmalte, formando lo que se ha denominado "*smear layer*" o capa de barrillo dentinario. La capa de barrillo dentinario se define como un residuo, de naturaleza calcificada, producida por la reducción o instrumentación de dentina, esmalte o cemento, o como un contaminante que se opone a la interacción con el tejido subyacente del diente puro. Esta capa de desechos tiene una gran influencia sobre cualquier enlace adhesivo formado entre el corte del diente y el material restaurador. La capa de barrillo dentinario contiene principalmente hidroxiapatita pulverizada, colágeno alterado, saliva, bacterias y otros desechos. Su espesor puede variar de 0,5 a 5,0 μm y se ha reportado que se reduce la permeabilidad de la dentina en un 86% (Schwartz, 1996).

Van Leeuwenhoek en 1677 fue quien observó por primera vez que esta capa residual puede ocluir la estructura tubular de la dentina (O'Sullivan y Flannelly, 1990). Más recientemente, Boyde et al. (1963) describieron a esta capa de barrillo y finalmente Eick et al (1970) demostraron que la misma está compuesta de calcio y material fosfatado y algunos componentes orgánicos (que contienen azufre, de nitrógeno y carbono). La composición de ésta refleja la composición de la dentina en la que

se formó (Eick et al. 1970). Por lo tanto, en la dentina superficial, se puede tener una composición muy semejante a la de la dentina intertubular, mientras que si proviene de la dentina profunda, ésta reflejaría su menor grado de mineralización. Del mismo modo, el barrillo dentinario formado en dientes afectados por caries puede contener colágeno que ha sido desnaturalizado por la acción de enzimas proteolíticas de las bacterias cariogénicas.

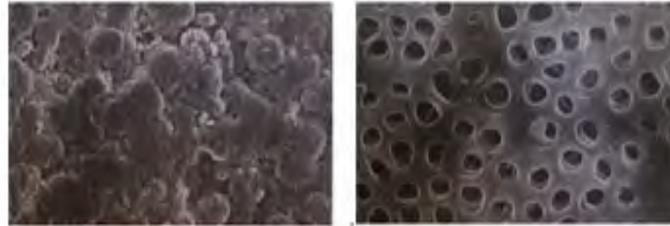


Figura III. 34: Dentina cubierta con capa de barrillo dentinario y dentina sin la capa de barrillo (Jovel, J. y Sabillón, I., s.f.).

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve *IV.Antecedentes*

IV. Antecedentes

Un sinnúmero de investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas han tenido como propósito fundamental la resolución del problema de adhesión dentinaria causado por la formación de la capa de barrillo. Entre algunas de las investigaciones se pueden citar:

Brännström M. y Johnson G. (1974) estudiaron el efecto de varios acondicionadores y agentes de limpieza de superficies de dentina preparada, empleando un microscopio electrónico de barrido. Para lograr tal cometido, evaluaron la superficie de las dentinas de sesenta (60) premolares, cuyas coronas habían sido previamente reducidas con una fresa de diamante. Aplicaron sustancias desmineralizantes y no desmineralizantes como acondicionadores y agentes de limpieza. Las sustancias limpiadoras no desmineralizantes empleadas en este estudio fueron agua, mezcla éter-acetona, mezclas de peróxido de hidrógeno y alcohol (3%-95%p/v y 30%-95%p/v) y solución microbicida 3%p/v NaF. Por su parte, las soluciones desmineralizantes usadas fueron las de ácido cítrico 50%p/v, ácido fosfórico 50%p/v, mezcla ácido fosfórico 50%-ZnO 7%p/v y ácido láctico 20%p/v. Aunque los agentes desmineralizantes removieron la totalidad de la capa de residuo dentinario, también lograron abrir y ensanchar las aberturas de los túbulos. Este hecho fue considerado un efecto indeseable, ya que en investigaciones anteriores se había demostrado que el taponamiento de los túbulos prevenía el crecimiento de bacterias dentro de sí mismos (Vojinovic, Nyborg y Brännström, 1973). De todas las soluciones probadas, la de fluoruro microbicida dio un mejor resultado ya que se observó un buen efecto limpiador sin abrir o ensanchar en demasía los túbulos dentinarios.

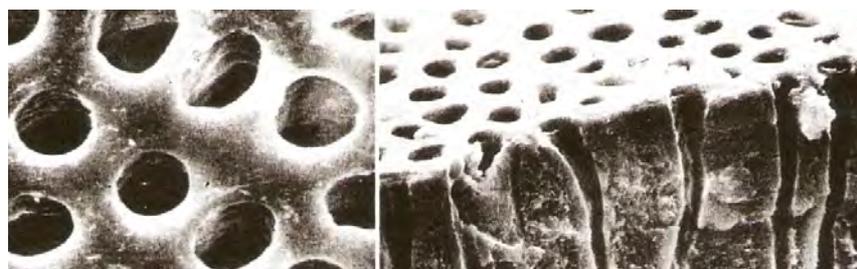


Figura IV. 1: Superficie dentinaria tratada durante 60 s con ácido cítrico al 50% p/v (Brännström y Johnson, 1974).

Brännström y Nordenvall (1977) no observaron alguna diferencia apreciable en la apariencia del esmalte, dentina o superficie interna del área de restauración tras la aplicación del grabado ácido durante 15 s o 2 min. Para ello prepararon cavidades bucales “in vivo” sobre 22 pares de dientes contralaterales. Las cavidades y el esmalte alrededor fueron sometidos a grabado ácido o limpiados con una solución superficialmente activa (el control). Los dientes se extrajeron después del tratamiento y las superficies tratadas se observaron al microscopio electrónico de barrido.

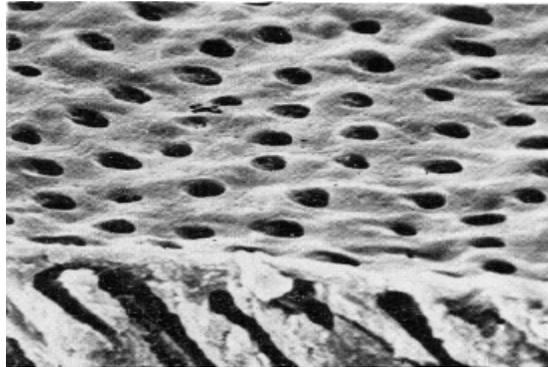


Figura IV. 2: Superficie dentinaria tras la aplicación del tratado ácido durante 2 min (Brännström y Nordenvall, 1977).

Duke E.S., Phillips R.W. y Blumershine R. (1985) evaluaron la efectividad de varios agentes en la limpieza de la superficie de dentina cortada. Utilizaron treinta y tres (33) molares humanos, que fueron cortados con un disco de carborundo y un flujo continuo de agua. Aplicaron cinco (5) protocolos de limpieza distintos. Realizaron diversas experiencias con la finalidad de remover la capa de residuo dentinario remanente producto de la preparación de la cavidad y observaron que entre todas las sustancias (empleadas comúnmente en el ámbito odontológico), el ácido poliacrílico al 40%p/v (Durelon líquido) dio el mejor resultado. El Prevodontic el polvo de pómez fueron efectivos, pero el peróxido de hidrógeno 3%p/v y el limpiador de cavidades (Cavilax) no lo fueron. También trataron la superficie inicialmente con el cemento óxido de zinc-eugenol seguido de las sustancias ya mencionadas. Los únicos agentes limpiadores que resultaron efectivos en esta experiencia fueron el polvo de pómez y el Prevodontic. El cemento parece haber dejado una película que inhibe la acción del Durelon líquido.

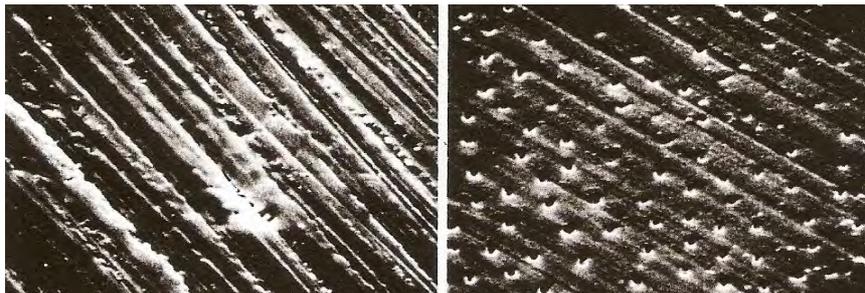


Figura IV. 3: Superficie dentinaria tratada por 10 s con Durelón líquido (Duke et al, 1985).

Franchi M. y Breschi L. en 1995, estudiaron el efecto de algunas soluciones ácidas sobre el esmalte y la dentina humana. Para dicha investigación emplearon nueve (9) molares y prepararon las cavidades a tratar con una fresa de diamante. Encontraron que entre las tres soluciones ácidas aplicadas de acuerdo al protocolo indicado por cada fabricante para remover la capa de residuo

dentinario, fue el ácido fosfórico al 37 %p/v el que mejor actuó, notándose que todos los túbulos aparecían completamente abiertos. Con la mezcla de ácido oxálico 4,3%p/v y las soluciones de sales de aluminio al 2,6%p/v, se observó que sólo el 50%p/v de los orificios se limpiaron, el resto seguía cubierto por la capa de residuo. Con el ácido maleico se lograron observar varias fibrillas de colágeno entre los túbulos que también se abrieron completamente.



Figura IV. 4: Superficie dentinaria tratada por 15 s con ácido maleico al 10%p/v (Franchi y Breschi, 1995).

Tani Y. y Togaya T. (1995) en su investigación exploraron métodos de pre-tratamiento de la superficie dentinaria sin la aplicación de ácidos. En los cinco (5) experimentos ejecutados con dientes bovinos anteriores, las dentinas cubiertas de la capa de residuo fueron tratadas inicialmente con una solución acuosa diluida de tiocianato de potasio (KSCN) por 60 segundos y luego se lavaron con agua y se secaron. Las observaciones realizadas con un microscopio de barrido electrónico revelaron que la capa de residuo se removía satisfactoriamente. Al añadir una sal metálica trivalente (FeCl_3 , $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2$, $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$), la elución de los tapones dentinarios decrecía y los túbulos permanecían muy cerrados.

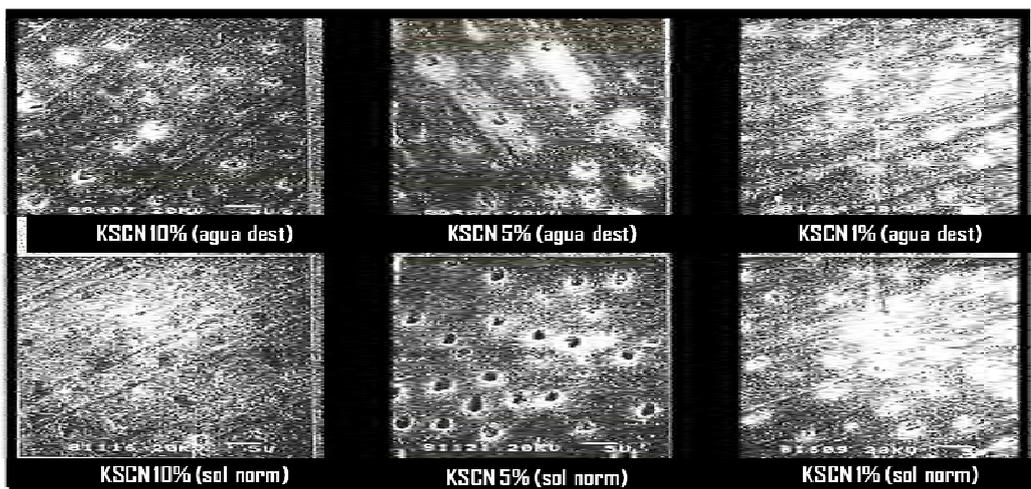


Figura IV. 5: Dentinas tratadas con distintas soluciones de tiocianato de potasio (KSCN) por 60 s (Tani y Togaya, 1995).

Ayad M. (2001) estudió los efectos del uso de los instrumentos rotatorios y de distintos agentes grabadores en la remoción de la capa de residuos dentinarios en la dentina humana. Las superficies ocluidas de treinta y cinco (35) molares humanos lijadas con papel carborundo a la profundidad de la ranura central y luego terminadas con fresas de diamante, fueron tratadas con distintos agentes ácidos (ácido poliacrílico al 25%p/v, ácido fosfórico al 10%p/v, ácido cítrico al 10%p/v, ácido láctico al 20%p/v y ácido fosfórico al 32%p/v) durante diez segundos y el efecto sobre cada una de ellas se observó empleando un microscopio de barrido electrónico. El autor encontró que la extensión de la remoción de la capa de residuo dentinario y por ende el proceso de adhesión ulterior, se ven afectados de alguna manera por el pH y el tipo de solución ácida empleada. Observó que con ácido láctico al 20%p/v (pH=1,40) y ácido fosfórico al 32%p/v (pH=0,16), los túbulos se abrieron casi completamente, y se notó una importante pérdida de tejido peritubular (desmineralización), aunque en el segundo de los casos dicho efecto fue mucho más evidente.

Berrios y López (2009) en su estudio realizado sobre dentinas superficial y profunda, no encontraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al tamaño del túbulo y a la densidad de túbulos abiertos tras aplicar tratamiento ácido durante diferentes periodos de tiempo (0, 5 y 10 segundos) dada una misma profundidad del diente.

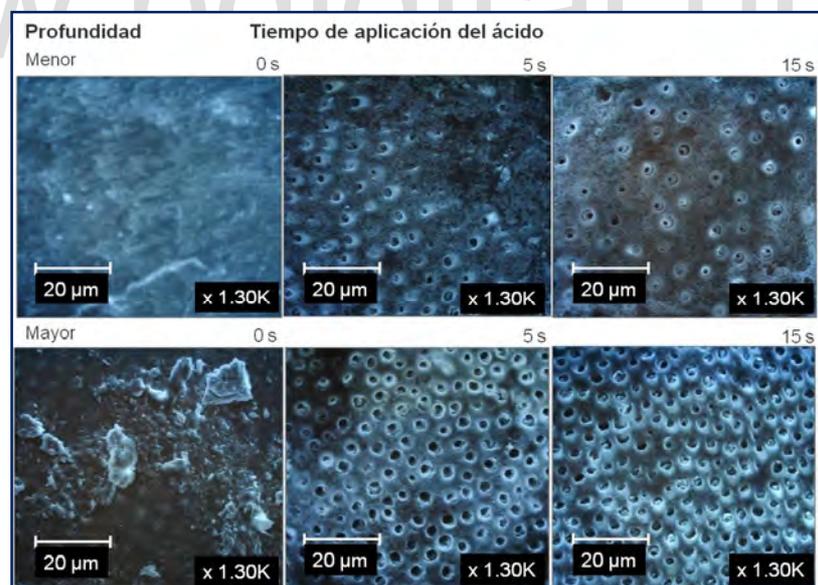


Figura IV. 6: Dentinas superficial y profunda sometidas a grabado ácido a distintos tiempos (Berrios y López, 2009).

www.bdigital.ula.ve ***V. Metodología Experimental***

V. Metodología Experimental

V.1. Resumen

La metodología experimental del presente proyecto se aboca básicamente a conocer la capacidad de remoción del barrillo dentinario de cada uno de los agentes de limpieza propuestos. Se emplearon varias sustancias limpiadoras entre las que caben mencionar: soluciones de sales de cloruro, sistemas ácidos, soluciones acuosas y oleosas de surfactantes, entre otras. Se prepararon 22 dientes humanos sin caries, de los cuales 15 se sometieron a una técnica mediante la cual se obtuvieron especímenes de dentina cortada con una superficie especialmente tratada (superficie a observar que contiene el barrillo dentinario), sobre la cual se aplicaron los distintos agentes de limpieza con un protocolo determinado. El poder de remoción del barrillo dentinario en dichos especímenes se evaluó visualmente empleando microfotografías obtenidas de un microscopio electrónico de barrido (MEB). Por otra parte, los 7 dientes restantes se llevaron a dentina, la cual se molió con la finalidad de obtener un polvo fino que simulara al barrillo dentinario. Se preparó una suspensión contentiva de una pequeña porción de barrillo en cierto volumen de sustancia limpiadora (de naturaleza electrolítica), y se midió la turbidez en intervalos de un (1) minuto durante un periodo de 5 minutos. El polvillo también se sometió a una evaluación cualitativa del poder dispersante de los distintos agentes mediante la observación al microscopio óptico.

V.2. Reactivos y Productos Empleados

A continuación se listan y describen los principales productos y reactivos empleados en el presente proyecto de investigación.

V.2.1. Electrolitos

Los electrolitos que se emplearon para llevar a cabo los diversos estudios relacionados fueron: cloruro de sodio (NaCl), cloruro de bario (BaCl_2), cloruro férrico (FeCl_3), acetato de sodio (CH_3COONa), ácido acético (CH_3COOH), ácido fosfórico (H_3PO_4) y ácido clorhídrico (HCl). En la tabla V.1 se pueden apreciar las características y propiedades más importantes de dichos reactivos.



Figura V. 1: Algunas soluciones electrolíticas preparadas

Tabla V. 1: Características y propiedades de los electrolitos. (“Cloruro de sodio”, s.f.), (“Cloruro de Bario”, s.f.), (“Cloruro de Hierro”, s.f.), (“Acetato de sodio”, s.f.), (“Ácido acético”, s.f.), (“Ácido fosfórico”, s.f.), (“Ácido clorhídrico”, s.f.)

Compuesto Propiedad	Cloruro de Sodio	Cloruro de Bario	Cloruro férrico	Acetato de sodio	Ácido Acético	Ácido Fosfórico	Ácido Clorhídrico
Fórmula Molecular	NaCl	BaCl ₂ ·2H ₂ O	FeCl ₃	CH ₃ COO Na·3 H ₂ O	CH ₃ COOH	H ₃ PO ₄	HCl
Peso Molecular (g/mol)	58,4	244,27	162,20	136,08	60,05	98,00	36,46
Estado de Agregación (@ 25°C y 1 atm)	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Líquido	Líquido	Líquido
Densidad (g/ml)	2,2	3,86	2,8	1,45	1,049	1,685	1,19
Punto de Fusión (°C)	801	960	260	58	16,7	41,85	-26
Punto de Ebullición (°C)	1465	1560	315	337	118,1	158	48
Solubilidad en agua (g/100 mL H₂O)	35,9	36	92 (a 20°C)	No disponible	No disponible	Miscible	Miscible
Apariencia	Cristales incoloros; parecen blancos si están pulverizados	Cristales blancos inodoros	Verde oscuro (cristal)	Polvo cristalino blanco	Líquido incoloro o cristales (no inodoro)	Líquido transparente, ligeramente amarillento	Líquido incoloro o levemente amarillo
Proveedor	Riedel – de Haën	Merck	Science Products Lab.	Baker Analyzed Reagen	Riedel – de Haën	Riedel – de Haën AG Seelze – Hannover	Riedel – de Haën
Lote	13541 0782	A871219 610	0550	B06198	03320	2E 20247	01380
Pureza	99,8%	99%	96%	99,992%	99,8%	85%	37%

V.2.2. Surfactantes

Los surfactantes utilizados para ejecutar los experimentos propuestos fueron el SDS (dodecilsulfato de sodio), DTAB (dodeciltrimetilamonio de bromo), NFE 17.5 y el AOT. En la tabla V.2 se listan las propiedades y características más importantes de estos agentes tensoactivos:

Tabla V. 2: Características y propiedades de los surfactantes (Dodecilsulfato, s.f.), (“Dodecyl”s.f).

	SDS	DTAB
Fórmula Molecular	NaC ₁₂ H ₂₅ SO ₄	C ₁₅ H ₃₄ BrN
Peso Molecular (g/mol)	288.38	308.34
Estado de Agregación (@ 25°C y 1 atm)	Sólido	Sólido
Clasificación	Aniónico	Catiónico
Densidad (g/ml)	1.01	No disponible
Punto de Fusión (°C)	206	246
Punto de Ebullición (°C)	273,15	246
Solubilidad en agua (g/100 mL H₂O)	No disponible	No disponible
Apariencia	Polvo fino blanco	No disponible
Proveedor	Scharlau	No disponible
Lote	SO0450 2693 60302	No disponible
Pureza	95%	No disponible

Nota: no se consiguió información acerca de los surfactantes NFE 17.5, NFE 4 y AOT.

V.2.3. Aceites y Alcoholes

Se emplearon kerosene filtrado, aceite mineral y n-pentanol. En la tabla V.3 se reflejan las características y propiedades más importantes de los aceites y del alcohol usados.

Tabla V. 3: Características y propiedades de los aceites y el alcohol (“Pentanol”, s.f.), (“Kerosene”, s.f.).

	Kerosene	n-pentanol
Fórmula Molecular	-	C ₅ H ₁₁ OH
Peso Molecular (g/mol)	32	88.15
Estado de Agregación (@ 25°C y 1 atm)	Líquido	Líquido
Densidad (g/ml)	0,80	0,8144
Punto de Fusión (°C)	-94	-77.6
Punto de Ebullición (°C)	65	138
Solubilidad en agua (g/100 mL H₂O)	Inmiscible	2,7
Apariencia	Líquido incoloro	Líquido incoloro de olor desagradable
Proveedor	No disponible	Merck's Reagenzien
Lote	No disponible	7450209
Pureza	No disponible	98,5%

Nota: no se consiguió información acerca del aceite mineral.

V.2.4. Sustrato (Dentina)

La dentina tal y como se definió en el apartado III.5.2, es uno de los tejidos constituyentes del diente, conformado básicamente por hidroxiapatita y colágeno y cuyas funciones primordiales son las de brindarle al esmalte una fundación elástica y proporcionarle a la pulpa un revestimiento de protección. En esta investigación, la dentina representa un sustrato de vital importancia, debido a que justamente sobre ella se realizaron las distintas mediciones y estudios que permitirán escudriñar los fenómenos y mecanismos que rigen la remoción de la capa residual dentinaria y la posterior adhesión dental, así como, vislumbrar otras posibles soluciones ante el problema. La dentina global utilizada se obtuvo de un total de 22 dientes humanos sanos (20 molares y 2 premolares) que fueron extraídos por razones ortodónticas.

V.3. Materiales, Instrumentos, Dispositivos y Equipos

Para la ejecución de los experimentos y mediciones pertinentes se usaron los materiales, instrumentos, dispositivos y equipos que se describen a continuación:

V.3.1. Materiales e Instrumentos de Laboratorio

- Vaso de precipitado de vidrio de 100 mL
- Matraces aforados de 50 mL y 100 mL
- Tubos de ensayo
- Bureta de 50 mL
- Soporte universal y pinza metálica
- Micropipetas de 200 μ L, 1000 μ L y 5000 μ L
- Puntas de plástico
- Espátula
- Agitador de vidrio
- Piseta
- Agua destilada
- Envases de plástico
- Recipientes de vidrio varios
- Recolectores de heces
- Jeringas clínicas de 10 mL con aguja de 0,8x38 mm
- Marcadores rojo y negro para rotular
- Gradillas metálicas y de madera
- Portaobjetos
- Microaplicadores
- Cámara fotográfica digital marca Sony

V.3.2. Balanzas Analíticas

Se emplearon dos balanzas analíticas para realizar las pesadas requeridas.

Tabla V. 4: Especificaciones de las Balanzas Analíticas

Especificaciones	Balanza 1	Balanza 2
Marca	Denver Instrument	Sartorius
Modelo	M-220	BP211D
Precisión	0,1 mg	0,01 mg
Mínimo	10 mg	0,01 mg
Máximo	220 g	210 g



Figura V. 2: Balanza Denver Instrument

V.3.3. Dispositivos y Equipos Odontológicos

V.3.3.1. Dispositivos Rotatorios

Los dispositivos rotatorios se emplearon conjuntamente con piedras de diamante de diferentes diseños, fresas de carborundo y discos de diamante. En general, se usaron para remover el esmalte y la corona del diente (turbina) y para realizar los diferentes cortes en la dentina (micromotor).

Tabla V. 5: Especificaciones de los Instrumentos Rotatorios

Especificaciones	Micromotor	Turbina
Marca	NSK (Nakanishi Inc.)	NSK (Nakanishi Inc.)
Modelo	EX-203	ML2-SU
Velocidad	22.000 rpm	400.000 rpm



Figura V. 3: Turbina



Figura V. 4: Micromotor



Figura V. 5: Piedras de diamante de grano grueso

V.3.3.2. Dispositivos de limpieza dental

- Scaler: este dispositivo se empleó para retirar la suciedad presente en los dientes antes de someterse a la remoción del esmalte y corona.



Figura V. 6: Scaler

- Jeringa triple: se usó durante el protocolo de acondicionamiento para lavar la dentina una vez se había aplicado el agente limpiador. Este dispositivo también tiene una salida de aire a presión que permite secar las superficies dentales de manera parcial.



Figura V. 7: Jeringa triple

V.3.3.3. Silla Odontológica

Esta silla se conecta a un compresor de aire. Asimismo, incluye un sistema interno de irrigación de agua.



Figura V. 8: Silla odontológica

V.3.4. Molino de Bola

Las especificaciones del molino de bola se muestran en la tabla a continuación:

Tabla V. 6: Especificaciones del Molino de Bola

Especificaciones	Molino de Bola
Marca	Retsch
Modelo	MM2
Voltaje	220 V
Frecuencia	50 Hz
Potencia Eléctrica	40 W



Figura V. 9: Molino de Bola



Figura V. 10: Recipientes de Acero

V.3.4. Microscopio Electrónico de Barrido

Se utilizó un Microscopio de Barrido Electrónico (MEB) perteneciente al Laboratorio de Microscopía Electrónica adscrito a la Facultad de Medicina de la Universidad de los Andes. En la tabla V.7 se resumen las especificaciones del microscopio empleado:

Tabla V. 7: Especificaciones del Microscopio Electrónico de Barrido

Especificaciones	Microscopio Electrónico
Marca	Hitachi
Modelo	S - 2500



Figura V. 11: Microscopio de Barrido Electrónico

V.3.5. Microscopio Óptico

Se utilizó un microscopio óptico con cámara digital integrada conectada a un software especializado denominado *Motic Images Plus 2.0* a través del cual pueden apreciarse directamente las imágenes captadas. En la tabla V.8 se especifican las principales características de ambos dispositivos.

Tabla V. 8: Especificaciones del Microscopio Óptico y la cámara integrada

Especificaciones	Microscopio	Cámara
Marca	Kyowa	Kyowa
Modelo	Medilux – 12	Moticam 2000
Número	921463	-
Lentes usados	4X y 40X	-
Megapíxeles	-	2.0



Figura V. 12: Microscopio Óptico

V.3.6. Zetámetro

El zetámetro empleado es un equipo que mide la movilidad electroforética de una suspensión líquida. A partir de dicha medición calcula y arroja los valores de su potencial zeta. Puede ser usado en suspensiones acuosas y orgánicas. Este equipo pertenece al Laboratorio FIRP de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de los Andes. Las especificaciones del equipo se reportan a continuación:

Tabla V. 9: Especificaciones del Zetámetro

Especificaciones	Zetámetro
Marca	Coulter
Modelo	Delsa 440SX



Figura V. 13: Zetámetro Delsa 440SX

V.3.7. Turbidímetro

El turbidímetro o nefelómetro es un instrumento que indica el grado de turbidez de una suspensión líquida. Para ello, este mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de la muestra. La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez, o *Nefelometric Turbidity Unit* (NTU) (Turbidez, 2009). El instrumento empleado para medir la turbidez es un turbidímetro marca Hach, modelo DR 890.

V.3.8. pHmetro

Se empleó un pHmetro marca Meterlab, modelo 620 pH210.



a)



b)

Figura V. 14: a) Turbidímetro; b) pHmetro

V.4. Metodología Experimental

V.4.1. Fase de Preparación de Agentes de Limpieza y del Sustrato (Dentina)

V.4.1.1. Soluciones Acuosas de Electrolitos

Los electrolitos mencionados en el apartado V.2.1 se emplearon fundamentalmente para preparar soluciones acuosas, a excepción del ácido fosfórico, el cual también se utilizó para obtener un sistema oleoso cuya preparación se explicará más adelante con mayor detalle.

- **Soluciones de Cloruros y de Ácido Clorhídrico**

Un primer grupo de soluciones electrolíticas fue aquel constituido por las sales mono, di y trivalentes de cloruros: cloruro de sodio (NaCl), cloruro de bario (BaCl_2) y cloruro férrico (FeCl_3), respectivamente. Inicialmente se prepararon soluciones al 1N de NaCl y BaCl_2 y 0,4 N de FeCl_3 a partir de reactivos sólidos. Mediante dilución se obtuvieron soluciones de menor concentración de cada una

de las sales (0,1N, 0,01N, 0,001N, 0,0001N y 0,00001N). Alternativamente se prepararon soluciones de 0,04N y 0,004N en FeCl₃. También se realizó un barrido de concentraciones para el cloruro de sodio (0,01%p/p, 0,1%p/p, 1%p/p, 5%p/p, 20%p/p). En cuanto al ácido se preparó una solución 0,1 N a partir de ácido comercial concentrado (al 37%) y a partir de ella se obtuvo por dilución otra solución al 0,01N.

- **Soluciones Amortiguadoras**

Las soluciones amortiguadoras (buffer) se conformaron con ácido acético (CH₃COOH) y su respectiva sal, el acetato de sodio (CH₃COONa). Inicialmente, se prepararon las soluciones 0,1M de ambos electrolitos. A partir de estas, se crearon dichos sistemas constituidos por distintas proporciones volumétricas de cada una de ellas, tal y como se puede apreciar en la próxima tabla:

Tabla V. 10: Volúmenes empleados para preparar los sistemas Acetato de Sodio – Ácido Acético.

	Volumen de Acetato de Sodio (ml)	Volumen de Ácido Acético (ml)
Solución 1	100,0	0,0
Solución 2	80,0	20,0
Solución 3	50,0	50,0
Solución 4	20,0	80,0
Solución 5	0,0	100,0

V.4.1.2. Soluciones Acuosas de Surfactantes

Los surfactantes que se utilizaron para obtener dichas soluciones acuosas fueron el SDS, DTAB y NFE 17.5 y las concentraciones empleadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla V. 11: Concentración de las diferentes soluciones de surfactantes

Surfactante Conc.	SDS (mM)	DTAB (mM)	NFE 17.5(%)
1	0,05	10,00	3,00
2	0,50	20,00	-
3	5,00	-	-
4	20,00	-	-
5	50,00	-	-
6	250,00	-	-
7	500,00	-	-

V.4.1.3. Microemulsiones

- **Primer Sistema (Barrido de Formulación)**

Se realizó un barrido en el que se varió la formulación (salinidad) de la mezcla con NaCl al 20%, dejando constantes los volúmenes de aceite (kerosene), alcohol (n-pentanol) y surfactante (SDS 500 mM), la presión (740 mmHg) y la temperatura (20 °C). Finalmente, se escogió aquel punto (punto 3) en el que las alturas de fase acuosa y orgánica del sistema resultaron ser las más pequeñas y parecidas, esto, con el propósito de obtener una formulación considerablemente cercana a la óptima. El barrido de formulación para el sistema propuesto con sus respectivas composiciones volumétricas y másicas se muestra en la tabla V.13.

Tabla V. 12: Barrido de Formulación

Punto	H ₂ O		NaCl		Aceite		SDS		n-pentanol	
	Vol (mL)	%v/v	Vol (mL)	%v/v	Vol (mL)	%v/v	Vol (mL)	%v/v	Vol (mL)	%v/v
1	5	28,9	0,5	2,9	6,9	39,9	3,85	22,3	1,05	6,1
2	4,2	24,3	1,3	7,5	6,9	39,9	3,85	22,3	1,05	6,1
3	3,4	19,7	2,1	12,1	6,9	39,9	3,85	22,3	1,05	6,1
4	1,5	8,7	4	23,1	6,9	39,9	3,85	22,3	1,05	6,1
5	0,5	2,9	5	28,9	6,9	39,9	3,85	22,3	1,05	6,1

- **Segundo Sistema**

En este segundo sistema se prepararon dos mezclas. La primera mezcla está constituida por agua, SDS 500 mM, NaCl 20% y n-pentanol. La segunda mezcla se diferencia de la primera porque además contiene kerosene filtrado. En la tabla se listan los volúmenes de cada uno de los componentes empleados.

Tabla V. 13: Volúmenes de componente de las mezclas

Mezcla Volumen (mL)	1	2
H ₂ O	0,1	0,7
SDS 500 mM	2,0	0,3
NaCl (20%p/p)	0,3	0,5
n-pentanol	0,5	2,5
Kerosene	0,0	1,0

V.4.1.4. Sistemas Oleosos

Inicialmente se prepararon dos soluciones de surfactantes en diferentes aceites:

- 1) AOT en kerosene al 20%p/v
- 2) NFE4 en aceite mineral al 20%p/v

Con estas soluciones se formaron dos nuevos sistemas constituidos por un 75% en la solución de AOT en kerosene al 20%p/v y un 25% en la solución de NFE4 en aceite mineral al 20%p/v (el porcentaje es volumétrico). El primero de ellos contenía únicamente ambas soluciones, mientras que al segundo se le añadió una gota de ácido fosfórico al 85% (aproximadamente 10 μ L).

V.4.1.5. Sistemas Buffer – Surfactantes (Diseño Experimental Factorial 2^2)

Para obtener estos sistemas se aplicó un diseño experimental factorial 2^2 , en el que se seleccionaron como factores la composición volumétrica de sus componentes (A) y la presencia del surfactante catiónico DTAB 20 mM (B). Los niveles del primer y segundo factor se indican en la tabla V.15 y en la V.16 se plantea el diseño experimental. Cada uno de los tratamientos contenía un total de 5,0 mL distribuidos de la siguiente forma: 4,7 mL del buffer, 200 μ L de SDS 500 mM y los restantes 100 μ L de agua o DTAB según hubiese sido el caso.

Tabla V. 14: Niveles del diseño experimental 2^2

	A	B
(+)	Solución buffer con mayor pH \rightarrow (Solución 1 de la tabla V.11)	100,0 μ L de DTAB
(-)	Solución buffer con menor pH \rightarrow (Solución 2 de la tabla V.11)	0,0 μ L de DTAB

Tabla V. 15: Diseño experimental factorial 2^2

Tratamiento	A	B
1	(-)	(-)
2	(+)	(-)
3	(-)	(+)
4	(+)	(+)

V.4.1.6. Sistemas Ácido – Sales de Cloruro (Diseño Experimental Factorial 2^{4-1})

El diseño en este caso es uno del tipo 2^{4-1} en el que se seleccionaron como factores la presencia de varios electrolitos (A= HCl, B= FeCl₃, C= NaCl y D= A*B*D= BaCl₂). Los niveles se

indican en la Tabla V.18 y se relacionan con la concentración del electrolito en la solución y su respectivo pH. Cada tratamiento constó de 30 mL. Para obtener los tratamientos con las concentraciones deseadas, se partieron de soluciones de HCl, FeCl₃, NaCl y BaCl₂ al 0,1 N, de HCl al 0,01 N y agua destilada. Los volúmenes empleados de cada una de las soluciones para obtener los tratamientos se especifican en la Tabla V.19.

Tabla V. 16: Niveles del diseño experimental factorial 2⁴⁻¹

	A	B	C	D	Acidez de cada nivel
(+)	0,01	0,01	0,01	0,01	pH = 2
(-)	0,0001	0,001	0,001	0,001	pH = 4

Tabla V. 17: Diseño experimental factorial 2⁴⁻¹

Tratamiento	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

Tabla V. 18: Volúmenes de especies empleados para obtener los tratamientos correspondientes al diseño experimental factorial 2⁴⁻¹

Tratamiento	A (μL)		B (μL)	C (μL)	D (μL)	H ₂ O (μL)
	10 ⁻²	10 ⁻¹				
1	300	0	300	300	300	28,8x10 ³
2	0	3x10 ³	300	300	3x10 ³	23,4x10 ³
3	300	0	3x10 ³	300	3x10 ³	23,4x10 ³
4	0	3x10 ³	3x10 ³	300	300	23,4x10 ³
5	300	0	300	3x10 ³	3x10 ³	23,4x10 ³
6	0	3x10 ³	300	3x10 ³	300	23,4x10 ³
7	300	0	3x10 ³	3x10 ³	300	23,4x10 ³
8	0	3x10 ³	3x10 ³	3x10 ³	3x10 ³	18,0x10 ³

V.4.2. Preparación de la Dentina

Se emplearon un total de 25 dientes humanos (molares y premolares) sin caries extraídos por razones ortodónticas. Todos los dientes se lavaron con agua empleando el scaler (Figura V.5) para retirar todos los restos orgánicos retenidos. Los dientes se prepararon siguiendo dos técnicas diferentes en función de las evaluaciones a realizar, las cuales se describen a continuación:

Técnica 1. Preparación de la dentina para su evaluación al microscopio electrónico de barrido.

Esta técnica consiste en la obtención de especímenes caracterizados por presentar una superficie de dentina profunda (cercana a la pulpa) con barrillo dentinario. Para ello se cortaron 15 dientes. La superficie de dentina profunda se expuso luego de ejecutar un corte de la corona en dirección perpendicular al eje longitudinal del diente. Ésta corresponde a la superficie a estudiar. La profundidad del corte se estableció mediante una radiografía. Esta cisura se realizó con la turbina (Figura V.2) y una fresa de carborundo de forma cilíndrica (Figura V.5). Los dientes así cortados se seccionaron tras ejecutar varios cortes paralelos al eje longitudinal del diente en dos direcciones (X y Y), para lo que se usó el micromotor con un disco de diamante. Finalmente, a la superficie dentinaria ya seccionada se le realizó un último corte perpendicular al eje longitudinal del diente para terminar de separar los especímenes de la raíz. De esta manera, se obtuvieron los especímenes que posteriormente se sometieron a la acción de los agentes de limpieza propuestos en el presente proyecto de investigación. Cabe destacar que por cada diente se obtuvieron entre 4 y 8 especímenes y todos presentaron tamaños y formas completamente irregulares.



a)



b)

Figura V. 15: Distintos cortes que se les realiza al diente: a) Corte paralelo al eje longitudinal b) Corte perpendicular al eje longitudinal del diente.

Técnica 2. Preparación de la dentina para su evaluación al microscopio óptico, turbidez y potencial zeta.

En esta segunda técnica se obtuvo dentina pulverizada a partir de 7 dientes. Inicialmente, se procedió a desgastar el esmalte dental con distintas piedras de carborundo de grano grueso de diferentes diseños. Una vez retirado el esmalte, se realizó un único corte perpendicular al eje longitudinal del diente (con el micromotor al que se le acopló un disco de diamante), el cual tuvo como finalidad desprender la porción completa de dentina. Estas porciones se sometieron a molienda en un molino de bola cuyas especificaciones técnicas ya han sido reportadas.

V.4.3. Fase Experimental

V.4.3.1. Evaluación de la limpieza del residuo dentinario mediante la observación al microscopio electrónico de barrido.

Para ejecutar estos experimentos se usaron las dentinas cortadas cuyas superficies fueron preparadas (especímenes). Las superficies de dichos especímenes se sometieron a la acción limpiadora de los distintos agentes propuestos, no obstante, el protocolo de lavado se varió en ciertos casos, pudiéndose clasificar en cinco experimentos.

Experimento 1:

Para este experimento se dispuso de la dentina de 5 dientes, entre los que se encontraban 4 molares y un (1) premolar. El protocolo de limpieza en este caso se basó en aplicar inicialmente los diferentes agentes propuestos, empleando para ello un microaplicador con el que se frotó la superficie a ser observada. El agente se dejó actuar durante 15 segundos y se lavó con el agua proveniente de la jeringa triple por 30 segundos. Luego se aplicó de forma rápida una corriente de aire sobre la superficie para secarla parcialmente. Finalmente, las áreas tratadas se observaron en el microscopio electrónico de barrido. Los agentes de limpieza que se utilizaron en este primer experimento fueron: soluciones de sales de cloruro (NaCl , BaCl_2 , FeCl_3) al 0,01N, soluciones acetato de sodio – ácido acético cuyas proporciones volumétricas se especifican en la tabla V.11, soluciones de cloruro de sodio al 0,01%p/p, 0,1%p/p, 1%p/p, 5%p/p y 20%p/p, soluciones SDS 20 y 250 mM, solución de DTAB 20mM, solución de NFE 17.5 al 3% y microemulsión del punto 3 de la Tabla V.13.

Experimento 2:

En el experimento se usó dentina proveniente de 3 molares. El protocolo de limpieza en este caso se basó en aplicar inicialmente los diferentes agentes propuestos, empleando para ello un microaplicador con el que se frotó la superficie a ser observada. El agente se dejó actuar durante 15 segundos y se lavó con agua proveniente de la jeringa triple por 30 segundos. Luego se aplicó de

forma rápida una corriente de aire sobre la superficie para secarla parcialmente. Finalmente, las áreas tratadas se observaron en el microscopio electrónico de barrido. Los agentes de limpieza aplicados en este segundo experimento fueron los sistemas oleosos y emulsionados cuya preparación se explica en el apartado V.4.1.4.

Experimento 3:

Se empleó dentina procedente de 3 molares. El protocolo de limpieza en este caso se basó en aplicar inicialmente los diferentes agentes propuestos, empleando para ello un microaplicador con el que se frotó la superficie a ser observada. El agente se dejó actuar durante 30 segundos y se lavó con agua proveniente de la jeringa triple por 60 segundos. Luego se aplicó de forma rápida una corriente de aire sobre la superficie para secarla parcialmente. Finalmente, las áreas tratadas se observaron en el microscopio electrónico de barrido. En este caso, se emplearon los agentes cuya descripción se especifica en el apartado V.4.1.5 del presente proyecto de investigación.

Experimento 4:

En este caso se utilizó dentina proveniente de 3 molares y (un) 1 premolar. Se aplicaron inicialmente los diferentes agentes propuestos, empleando para ello un microaplicador con el que se frotó la superficie a ser observada. El agente se dejó actuar durante 40 segundos y se lavó con 12 mL del mismo agente aplicado con jeringas clínicas. Luego se aplicó de forma rápida una corriente de aire sobre la superficie para secarla parcialmente. Finalmente, las áreas tratadas se observaron en el microscopio electrónico de barrido. Los agentes de limpieza que se utilizaron en este experimento fueron las soluciones de las distintas sales de cloruro (NaCl , BaCl_2 , FeCl_3), esta vez insertando aquellas más diluidas (0,001N, 0,0001N y 0,00001N).

Experimento 5:

En el experimento se usó dentina proveniente de 3 molares. El protocolo de limpieza en este caso se basó en aplicar inicialmente los diferentes agentes propuestos, empleando para ello un microaplicador con el que se frotó la superficie a ser observada. El agente se dejó actuar durante 15 segundos y se lavó con 12 mL del mismo agente empleando jeringas clínicas. Luego se aplicó de forma rápida una corriente de aire sobre la superficie para secarla parcialmente. Finalmente, las áreas tratadas se observaron en el microscopio electrónico de barrido. Los agentes de limpieza aplicados en este quinto experimento fueron los tratamientos resultantes del diseño experimental factorial que se especifica en el apartado V.4.1.5.

En las imágenes a continuación se muestran las distintas fases de limpieza de las superficies dentinarias:



Figura V. 16: Aplicación del agente de limpieza del barrillo dentinario



Figura V. 17: Aplicación del agua

V.4.3.2. Evaluación del poder dispersante mediante la observación al microscopio óptico.

Esta observación requirió del uso de dentina molida. Una pequeña porción del sustrato (aproximadamente 5 mg) se colocó sobre un portaobjetos al cual se le añadieron algunas gotas del agente limpiador. La cámara acoplada al microscopio captaba las imágenes correspondientes que a su vez eran reproducidas por el software ya mencionado en el apartado V.3.5. De esta manera, fue posible apreciar el comportamiento del sistema en cuestión. Los agentes de limpieza que se utilizaron en esta experiencia fueron: soluciones de sales de cloruro (NaCl , BaCl_2 , FeCl_3) al 0,01N, soluciones diluidas de las distintas sales de cloruro (0,001N, 0,0001N y 0,00001N), soluciones acetato de sodio – ácido acético cuyas proporciones volumétricas se especifican en la tabla V.11, soluciones de cloruro de sodio al 0,01%p/p, 0,1%p/p, 1%p/p, 5%p/p y 20%p/p, soluciones SDS 20 y 250 mM, solución de DTAB 20mM, solución de NFE 17.5 al 3% y microemulsión del punto 3 de la tabla V.13.

V.4.3.3. Medición del Potencial Zeta.

Los valores de potencial zeta se obtuvieron a partir de la medición realizada por el Zetámetro citado en el apartado V.3.6. Aproximadamente unos 65 mg de dentina molida se agregaron a 80 mL de distintas soluciones electrolíticas contenidas en envases de plástico. El sólido insoluble en dichas soluciones,

se dejó sedimentar por completo. Finalmente, las dispersiones con el sólido sedimentado se introdujeron al equipo y se registraron los valores de potencial zeta en milivoltios (mV). Se emplearon las soluciones de acetato de sodio – ácido acético cuyas proporciones volumétricas se especifican en la tabla V.10.

V.4.3.4. Evaluación del poder dispersante mediante la medición del Índice de Turbidez.

Para llevar a cabo este experimento se empleó el turbidímetro cuyas características se detallan en el apartado V.3.7. En primer lugar, se calibró el instrumento con el blanco (solución electrolítica libre del polvillo dentinario). Una vez calibrado, se procedió a mezclar la dentina molida con la solución, se agitó y se tomaron varias medidas de turbidez en intervalos de un (1) minuto durante cinco (5) minutos para cada una de las dispersiones formadas. Los medios continuos empleados fueron las soluciones del sistema acetato de sodio – ácido acético cuyas proporciones volumétricas corresponden a las indicadas en la tabla V.11, las soluciones electrolíticas de NaCl, BaCl₂ (0,00001 N, 0,0001 N, 0,001 N, 0,01 N, 0,1 N y 1 N) y de FeCl₃ (0,00001 N, 0,0001 N, 0,001 N, 0,004 N, 0,01 N, 0,04 N, 0,1 N y 0,4 N) y los tratamientos correspondientes al diseño experimental factorial 2ⁿ⁻¹ especificado en el apartado V.4.1.6.

V.4.3.5. Medición del pH

Para medir el pH, se tomaron muestras de 10 mL de las soluciones de cloruros preparadas que tenían aproximadamente 5 mg de sólido molido (dentina).

Tabla V. 19: Tabla Resumen de los Diseños Experimentales ejecutados

Diseño Experimental	Finalidad del Diseño	Tiempo Aplicación Agente limpieza	Tiempo de Lavado/Agente lavado	Agentes de limpieza empleados
1	Explorar el efecto de varios agentes de limpieza de distinta naturaleza en la remoción del barrillo	15 s	30 s/Agua	(NaCl, BaCl ₂ , FeCl ₃), buffer en distintas proporciones (ácido acético/acetato de sodio), (SDS, DTAB, NFE 17.5), microemulsión
2	Evaluar mecanismos de emulsión y flotación en la limpieza del barrillo	15 s	30 s/Agua	Sistemas oleosos y emulsionados: AOT en kerosene al 20%p/v (75%v/v) y NFE4 en aceite mineral al 20%p/v (25% v/v) y el mismo sistema con 10 µL de H ₃ PO ₄
3	Evaluar el efecto del pH y la presencia de surfactante catiónico en la limpieza del barrillo	30 s	60 s/Agente limpieza	Diseño Experimental Factorial 2 ² : tratamientos constituidos por soluciones Buffer + DTAB + SDS
4	Evaluar efecto de los electrolitos (carga y concentración contra-ion) en la limpieza del barrillo	40 s	12 mL/Agente limpieza	Soluciones de sales de cloruro (NaCl, BaCl ₂ , FeCl ₃) a distintas concentraciones
5	Evaluar efecto del pH y la concentración electrolitos en la limpieza del barrillo	15 s	12 mL/Agente limpieza	Diseño Experimental Factorial 2 ⁴⁻¹ : tratamientos constituidos por soluciones de sales de cloruros (NaCl, BaCl ₂ , FeCl ₃) y ácido clorhídrico

www.bdigital.ula.ve ***VI.Resultados y Discusión de Resultados***

VI. Resultados y Discusión de Resultados

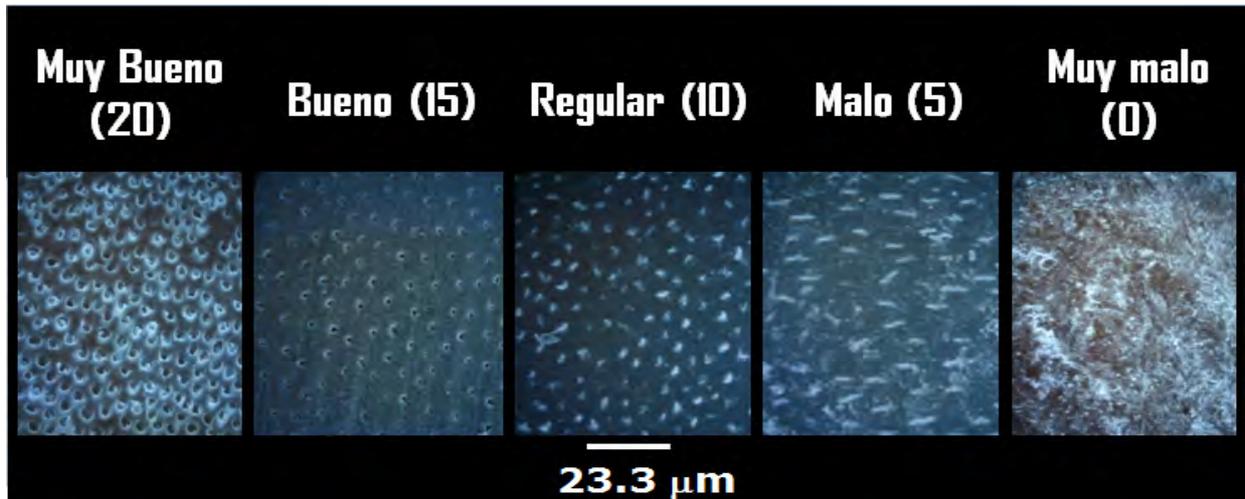
Explicar algunos de los fenómenos, y sus mecanismos, relacionado con la remoción del barrillo dentinario es de gran importancia para formular sistemas más robustos, adecuados para una variedad de situaciones, como pretratamiento en restauraciones dentales. Los resultados que se presentan a continuación explican, de manera progresiva, algunos fenómenos, sus mecanismos, factores que le inducen, cohiben e inhiben y la influencia de estos en la remoción del barrillo dentinario de la superficie de la dentina. De hecho, se sabe que la remoción de esta capa residual se ve influenciada por un buen número de factores de naturaleza fisicoquímica (Eick, 1970). Sin embargo, el alto porcentaje de hidroxiapatita mineral fosfatado de naturaleza ligeramente básica (Attal JP, Asmussen E, Degrange M., 1994) indica que los mecanismos de limpieza se relacionan con aquellos fenómenos de naturaleza electrostática; más específicamente, aquellos relacionados con la doble capa eléctrica. De hecho, Berríos y López (2009) sugieren que el ácido fosfórico, agente de limpieza empleado por excelencia en odontología de adhesión, actúa mediante este mecanismo y no por solubilización del barrillo dentinario. Además, la naturaleza esencialmente básica de la dentina sugiere que las partículas del barrillo dentinario son susceptibles de ser modificadas, al menos en su superficie, por especies de naturaleza ácida.

VI.1. Evaluación del poder de remoción del barrillo dentinario mediante la observación en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

El microscopio de barrido es de gran valor en este tipo de investigaciones, ya que permite evaluar semi-cuantitativamente el comportamiento del sistema ante la acción de los agentes de limpieza estudiados. Tal y como se describió en la metodología, se llevaron a cabo, en esencia, “cinco experimentos” que se diferenciaron básicamente en el protocolo de lavado de las piezas dentales y en las modificaciones propias de los tratamientos (sistemas de limpiantes). No obstante, en cada uno de los casos la metodología para el procesamiento de las fotografías proveniente del microscopio electrónico fue la misma. Con la finalidad de obtener resultados más con menos ruido y con más validez estadística, cada tratamiento se replicó (esto es, se aplicó el tratamiento a la superficie de la dentina, luego del fresado neumático, de dos especímenes), se aleatorizó cada conjunto de experimento y luego a cada una de las superficies de ambos especímenes se le tomaron 5 microfotografías en regiones seleccionadas, en el centro y en las cuatro esquinas de un recuadro que recorre sistema móvil xy del microscopio electrónico. Esto indica que por cada tratamiento se tomaron un total de 10 microfotografías. Para que los resultados se transformasen de cualitativos a semi-cuantitativo, se estableció una escala de medición que sirvió de criterio para evaluar el poder de

remoción de cada una de las sustancias limpiadoras propuestas. La escala está comprendida por 5 valores que corresponden a 5 grados de limpieza distintos. El valor máximo (20) indica que la limpieza es “completa” y el valor mínimo (0) sugiere que la capacidad de limpieza es muy pobre o nula. Dicha escala se muestra a continuación:

Tabla VI. 1: Escala de medición del poder de remoción de las distintas sustancias limpiadoras propuestas



Tres (3) observadores con conocimiento de la materia, evaluaron, por separado, cada una de las microfotografías apoyándose en la escala arriba mostrada y, así, asignaron el valor del grado de limpieza del barrillo dentinario logrado por cada tratamiento. El valor del grado de limpieza logrado por cada tratamiento, así evaluado, es el promedio del promedio de las dos replicas correspondientes a cada tratamiento. Ahora bien, una vez definido el procesamiento de los datos, se procederá a mostrar y discutir los resultados obtenidos por cada diseño experimental.

VI.1.1. Diseño Experimental 1:

El diseño experimental 1 constituye básicamente una actividad exploratoria. El objetivo fundamental del mismo es proponer distintos agentes limpiadores que se supone actuaran de acuerdo a la prevalencia de distintos fenómenos, bajo los distintos mecanismos microscópicos-moleculares. Se trabajó con soluciones electrolíticas de sales de cloruro con distintas cargas de sus cationes respectivos NaCl , BaCl_2 y FeCl_3 , y para una misma sal, el NaCl , se efectuó un barrido de concentración. Basándose en lo sugerido por Adamson (1976), se esperaría que un aumento en la intensidad de la carga o en la concentración del ión se tradujera en una disminución de la longitud de Debye (longitud efectiva de la doble capa eléctrica), es decir, una compresión de la misma, lo cual

traería como consecuencia la disminución de la distancia media entre partículas y por ende menor poder dispersante. Destáquese que para nuestros efectos, un mayor poder dispersante de las soluciones podría implicar mayor capacidad de remoción del barrillo dentinario. Ahora bien, observemos los resultados del primer experimento:

Tabla VI. 2: Evaluación del efecto de la carga de los iones sobre el poder de remoción del barrillo dentinario

Parámetro/ Cación	Na ⁺	Ba ²⁺	Fe ³⁺
Grado de limpieza promedio	2,7	4,7	1,3
Microfotografía representativa			

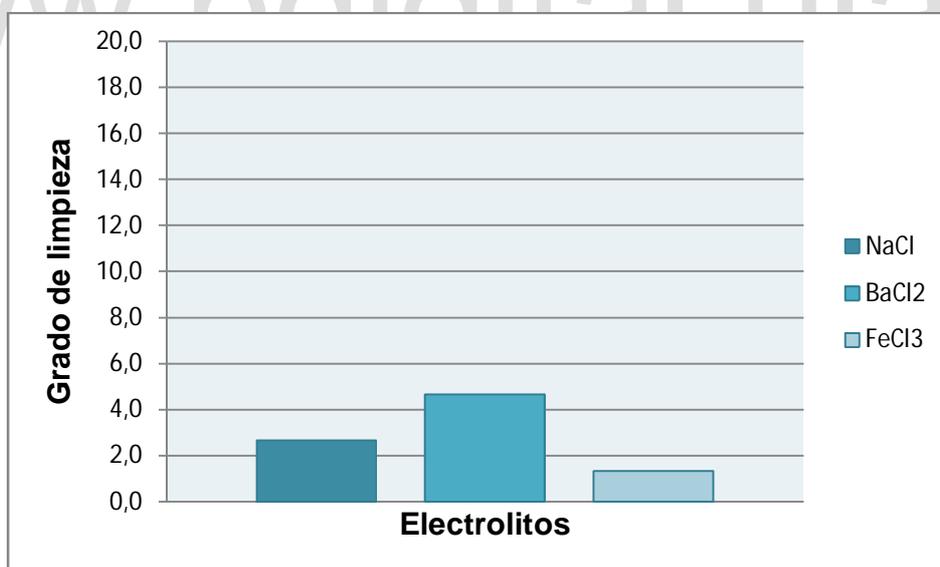


Figura VI. 1: Efecto de la carga sobre la remoción de la capa residual dentinaria

De acuerdo a los resultados obtenidos, la carga del catión parece no estar ejerciendo influencia alguna sobre la limpieza del barrillo dentinario (grado de limpieza de muy malo (0) a malo (5)); de hecho, puede notarse que en general los electrolitos se comportan como malos agentes de limpieza de los túbulos. No obstante, es posible atribuir este efecto al hecho de haber empleado agua como agente

de lavado durante el protocolo de limpieza; esto pudo generar otros fenómenos colaterales de distinta naturaleza que pudieron influenciar de forma negativa el efecto de los electrolitos en su capacidad de remoción del barrillo dentinario.

Por otra parte, los resultados sobre el efecto de la concentración del ión, que en este caso es el Na^+ se muestran en la Tabla VI.3 y en la Figura VI.2. En la Tabla VI.3 se presentan los promedios del grado de limpieza de cada uno de los tratamientos que luego se muestran en forma gráfica en la Figura VI.2. En estas representaciones se puede apreciar, por simple inspección, que la concentración tiene un efecto pequeño, pero efecto al fin sobre el grado de limpieza del barrillo dentinario. Con los resultados hasta aquí mostrados todavía no se puede hablar sobre un fenómeno dado, mucho menos de sus mecanismos.

Tabla VI. 3: Evaluación del efecto de la concentración de los iones (Na^+) sobre el grado de limpieza del barrillo dentinario

Parámetro/ Concentración	0,001%	0,01%	0,1%	1%	5%	20%
Grado de limpieza promedio	3,8	8,2	3,7	2,5	6,5	1,7
Microfotografía representativa						

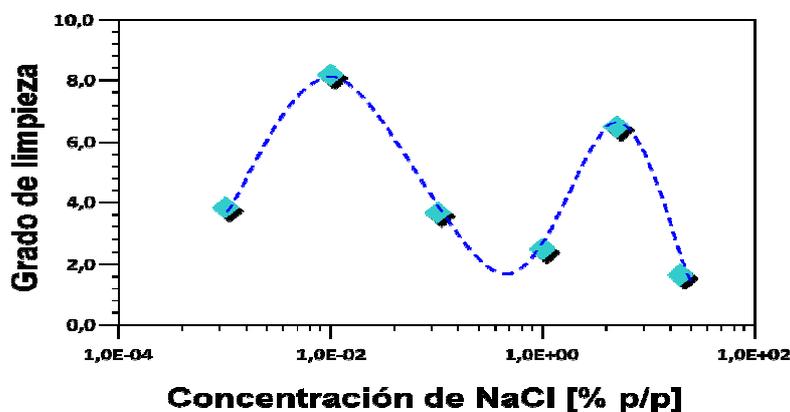


Figura VI. 2: Efecto de la concentración de electrolito en la remoción de la capa residual dentinaria (Diseño experimental 1)

En este diseño experimental también se propuso explorar el posible efecto del pH sobre el grado de limpieza. Para ello, se trabajó con cinco tratamientos (cinco soluciones buffer a diferentes concentraciones de ácido acético-acetato de sodio, ver Tabla V. 11). Los resultados se pueden apreciar en la Tabla VI.4 y en la Figura VI.3. Al observar la Figura VI.3 es posible apreciar un máximo de limpieza a un pH aproximadamente igual a 4,14. Dicho resultado sugiere que la remoción de barrillo de alguna manera se ve influenciado por el pH. Por otra parte, la presencia de un máximo, en este caso, o un mínimo en el comportamiento de algún aspecto de un sistema sugiere la existencia de factores que tanto favorecen como desfavorecen a uno o más fenómenos. Buscando explicar estos resultados y teniendo en mente que un posible fenómeno de limpieza tenga que ver con la formación de la doble capa eléctrica alrededor de las partículas se midió el potencial zeta de los distintos sistemas buffer (tratamientos) empleados con la dentina dispersa en ellos. En la Figura VI.4 se puede apreciar la funcionalidad del potencial zeta y el pH del sistema observándose un máximo a un pH alrededor de 4, que indica la existencia de una doble capa eléctrica que se ve fuertemente influenciada por el pH. Más aún, se ve que el máximo en el potencial Z coincide con el observado en la Figura VI.3. De hecho, si se observa detalladamente ambas figuras se puede apreciar que el grado de limpieza se corresponde con el potencial zeta en cada uno de los puntos. Así que, posiblemente, los mismos fenómenos que estén afectando el grado de remoción estén afectando el potencial Z en la misma "dirección". Esto podría, incluso, sugerir que la doble capa juega un rol determinante en el grado de remoción y que la relación entre la concentración del ácido acético y la del acetato de sodio (esto es la concentración de los iones H_3O^+ , pH,) cumplen el rol de activar la doble capa eléctrica, de hacerla más efectiva en la remoción del barrillo dentinario.

Tabla VI. 4: Efecto del pH sobre la remoción del barrillo dentinario

Concentración Ác. Acético (M)	0,00	0,02	0,05	0,08	0,1
Grado de limpieza promedio	4,3	4,6	6,3	12,2	7,5
Microfotografía representativa					

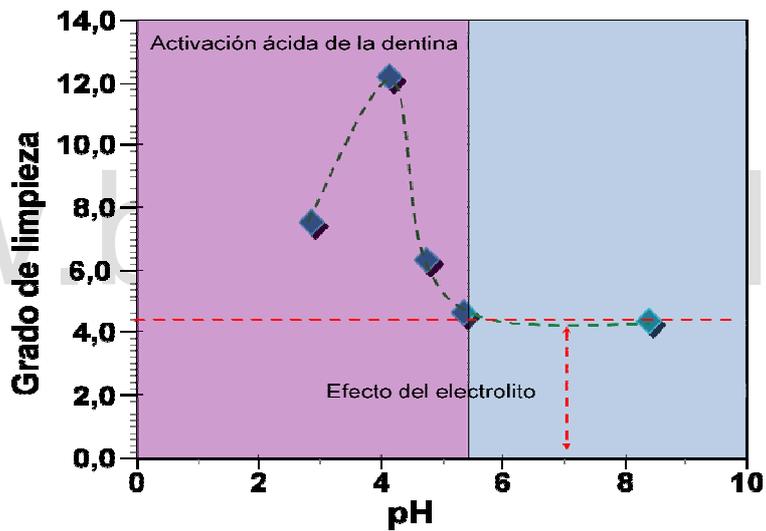


Figura VI. 3: Efecto del pH en la remoción del barrillo dentinario (Diseño Experimental 1)

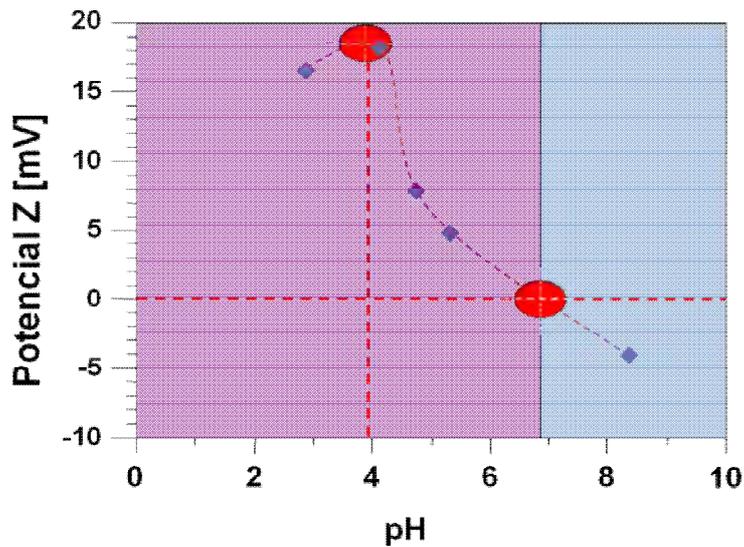


Figura VI. 4: Potencial zeta vs. pH del medio (Diseño Experimental 1)

En la Figura VI.4 también se pueden observar dos regiones demarcadas por rectángulos de diferentes colores; una zona púrpura en la que el potencial zeta es positivo, lo que implica que la carga superficial neta de la partícula en ese intervalo de pH es también positiva. Por otra parte, una segunda región (azul) en la que el potencial zeta del sistema es negativo y en donde la superficie adquiere carga negativa. Se sabe que un potencial zeta grande, generalmente, implica alta estabilidad en las dispersiones (Potencial Zeta, 2009) y en este caso una alta estabilidad podría implicar una buena remoción de la capa residual dentinaria. Por otra parte, la Figura VI.3 también presenta varias zonas. Una zona azul en la que el grado de limpieza permanece casi constante y denota el efecto de los electrolitos, por contraste con agua, sobre el grado de limpieza. La zona púrpura demarca la zona a partir de la cual el pH activa algunos fenómenos que dan como resultado una activación del grado de limpieza.

En este diseño experimental exploratorio también se estudiaron sistemas surfactantes (tratamientos) que podrían remover la capa de barrillo mediante otros fenómenos y mecanismos microscópicos-molecular especificados en el apartado III.2.8 del presente trabajo. Cabe destacar, sin embargo, que la acción limpiadora de los detergentes sobre partículas sólidas depende primordialmente de la afinidad del surfactante sobre la superficie de sucio y de su capacidad como dispersante, entre otras factores (Rosen, 2004). En la Tabla VI.5 se puede apreciar el efecto de surfactantes de distintas naturalezas: aniónico (SDS), catiónico (DTAB) y noiónico (NFE 17.5).

Tabla VI. 5: Evaluación del efecto de la detergencia sobre el grado de limpieza promedio del barrillo dentinario.

Parámetro/Tipo de Surfactante	SDS (20 mM)	SDS (250 mM)	DTAB (20m M)	NFE 17.5 (3%)
Grado de limpieza promedio	6,2	4,8	9,2	0,0
Microfotografía representativa				

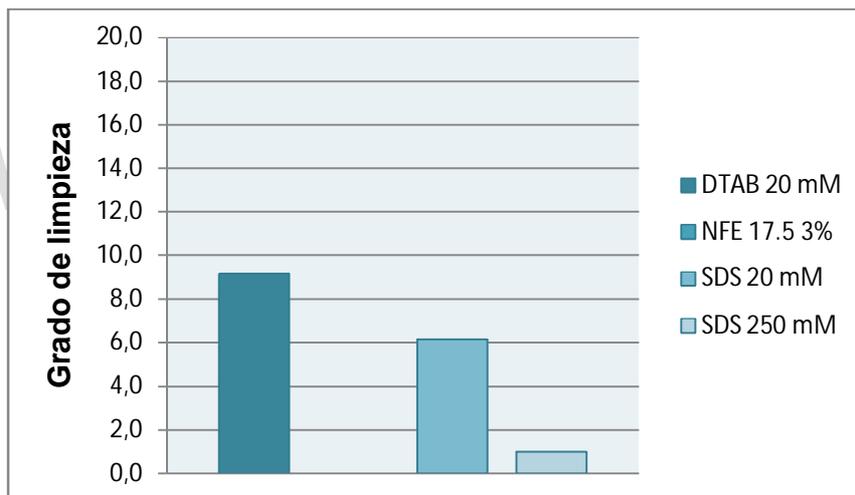


Figura VI. 5: Grado de limpieza de los distintos surfactantes empleados (Diseño Experimental 1)

De acuerdo a la figura VI.5 se puede concluir que el mejor detergente del barrillo es el DTAB, seguido por el SDS 20 mM, SDS 250 mM y, finalmente, el NFE 17.5 cuya acción es prácticamente nula. Ambos surfactantes, DTAB y SDS cuentan con una porción hidrofóbica similar, por lo que cualquier diferencia entre ellos se debe a la parte hidrofílica; esto es las cabezas positivas y negativas respectivamente. Dado que, la dentina se comporta como una base y que el DTAB, con su carga positiva, se comportaría como un ácido muy débil y tendría más tendencia a adsorberse que el SDS, Por otra parte, el NFE17.5, no limpia, sugiriendo que este surfactante si se adsorbe sobre las

partículas no es capaz de separarlas lo suficiente de la superficie de la dentina como para que posteriormente sean removidas por medio del lavado con agua.

Un último mecanismo de limpieza propuesto en este experimento fue el de flotación. Para ello se empleó una microemulsión W/O, cuya preparación se explicó detalladamente en el apartado V.4.1.3. La idea es que las pequeñas gotitas de aceite formadas por el fenómeno de emulsificación espontánea a las cuales se pudiesen adherir las partículas de barrillo dentinario por afinidad con el surfactante. Esto en conjunto sería arrastrado por el agua durante el lavado. Sin embargo, no fue posible lograr tal cometido, de hecho, el grado de limpieza alcanzado por este agente es de uno (1), bastante deficiente. Se presume que este mecanismo puede inducirse al cambiarse la naturaleza del surfactante y del aceite.

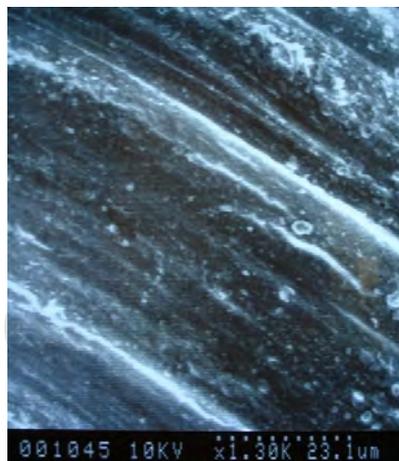
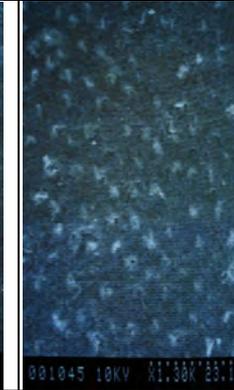


Figura VI. 6: Microfotografía de la superficie dentinaria tras la limpieza con la Microemulsión (Diseño Experimental 1)

VI.1.2. Diseño Experimental 2:

Mediante este diseño experimental se buscaba promover la limpieza del barrillo dentinario empleando para ello sistemas oleosos y emulsionados. En la Figura VI.9 se puede apreciar de forma más clara el grado de limpieza alcanzado por cada uno de los agentes de limpieza propuestos.

Tabla VI. 6: Efecto de los sistemas oleosos y emulsionados sobre el grado de limpieza del barrillo dentinario

Parámetro/Tipo de Surfactante	AOT + NFE 4	AOT+ NFE 4 + H3PO4	H2O+NaCl+C5OH+SDS	H2O+NaCl+C5OH+SDS+Kerosene
Grado de limpieza promedio	2,7	4,6	2,2	5,8
Microfotografía representativa				

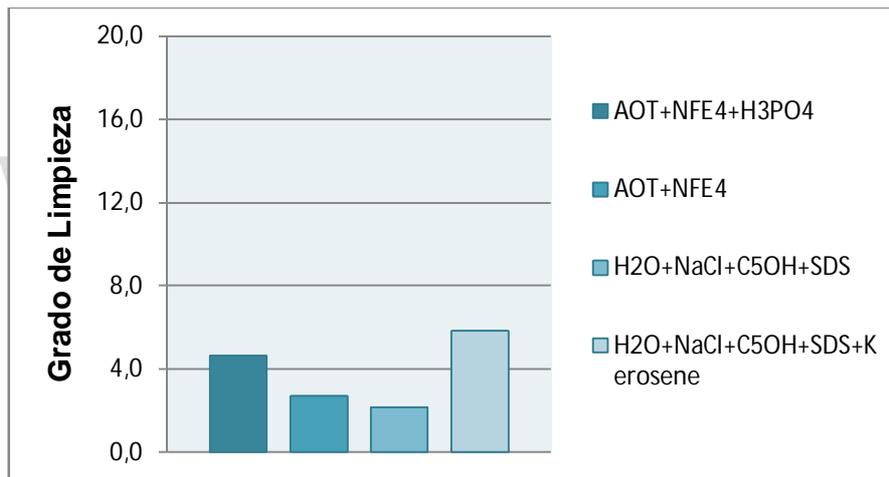


Figura VI. 7: Grado de limpieza de los distintos agentes empleados en el diseño experimental 3

Como puede vislumbrarse en la Figura VI.7 el grado de limpieza alcanzado por cada agente se considera entre malo y muy malo. La razón de ello es que al parecer los fenómenos de emulsificación espontánea, bajo diferentes mecanismos, flotación de las partículas por gotas de aceite, y transferencia de cantidad de movimiento no son lo suficientemente extensos como para remover las partículas. Por ejemplo, se observó en el microscopio óptico que las gotas de aceite, forman corrientes de fluido que parecen intensas, pero que no son capaces de dispersar a las partículas; además, se puede apreciar también que las partículas no se adhieren a las gotas de aceite por lo que no se pudo activar el fenómeno de flotación. Así, para que estos sistemas tengan éxito, se deben agregar aditivos

que permitan activar las superficies de las partículas y además hacer que estas se puedan adherir a las gotas de aceite formadas por emulsificación espontánea.

VI.1.3. Diseño Experimental 3:

En este experimento se evaluó la limpieza promovida por cuatro tratamientos producto de un diseño experimental factorial 2^2 . Se buscó determinar si la presencia de los surfactantes DTAB 20 mM y SDS 20 mM en dos de los sistemas buffer (80-20 y 100-0) representan un efecto favorecedor en la limpieza del barrillo dentinario

Tabla VI. 7: Efecto de los tratamientos Buffer – DTAB sobre la remoción de la capa de barrillo dentinario

Parámetro/Tipo de Surfactante	T1 (80-20 y agua)	T2 (80-20 DTAB)	T3 (100-0 y agua)	T4 (100-0 DTAB)
Grado de limpieza promedio	4,2	8,3	4,8	4,0
Microfotografía representativa				

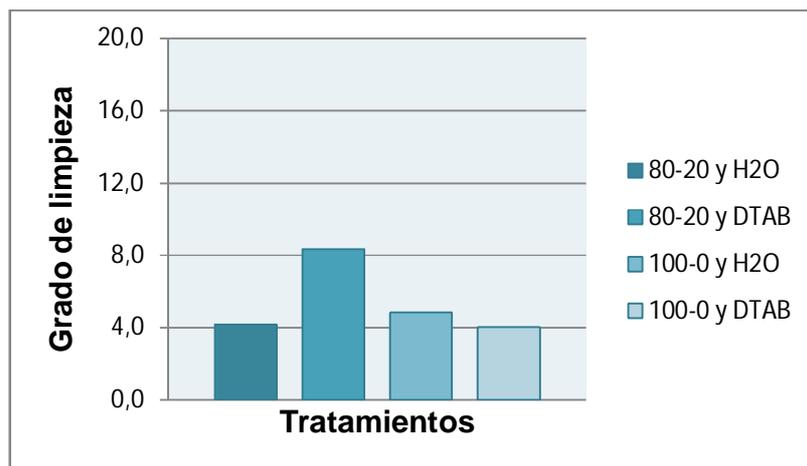


Figura VI. 8: Grado de limpieza de los distintos agentes empleados en el diseño experimental 3

Analizar estos resultados no es fácil en este tipo de gráfico, así que se procederá de acuerdo a la representación propia del diseño experimental como se muestra en la Figura VI. 9. En ella se

observa un fuerte efecto de interacción entre la presencia de DTAB en SDS y la relación de las concentraciones entre el ácido acético y el acetato de sodio. Así, un sistema adecuado sería aquel con mayor concentración de ácido y presencia de DTAB en SDS. Esto es de esperar, puesto que a medida que se incrementa la concentración de ácido, la superficie se carga positivamente, ver Figura VI, y puesto que el sistema surfactante es esencialmente aniónico tenderá a adsorberse sobre las partículas. La presencia de DTAB, lo que hace es que incrementa la densidad de adsorción del SDS sobre las partículas de barrillo dentinario, lo que mejora su dispersión y en consecuencia mejora el grado de limpieza (Rosen, 2004). A relación 100-0, la presencia de DTAB desmejora el grado de limpieza, lo cual se puede explicar de la misma manera que en el caso anterior, dado que la superficie en tal condición es negativa y el DTAB aumenta la densidad del SDS, que es negativo, hace que la adsorción sea pobre y por tanto se desmejora la limpieza.

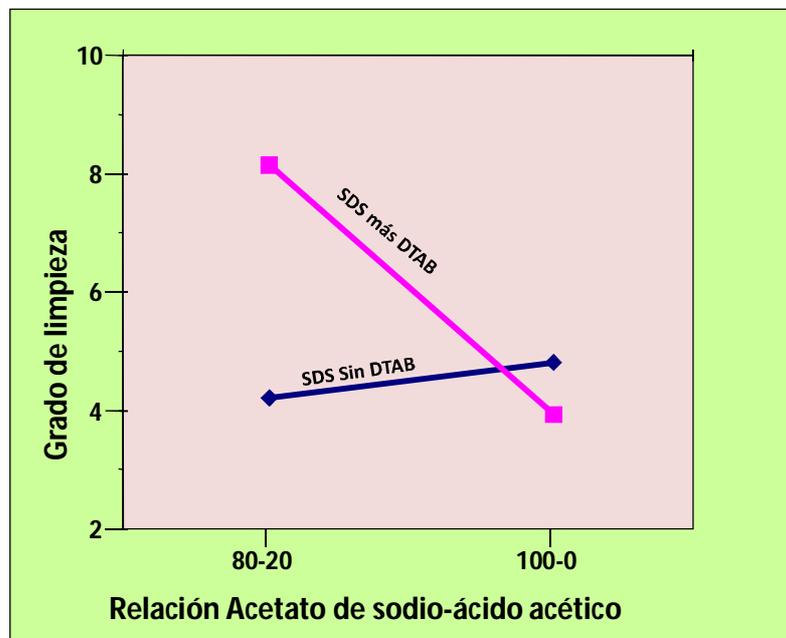
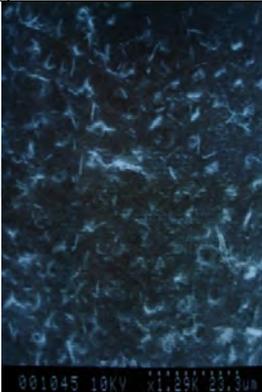


Figura VI. 9: Representación gráfica propia de un diseño experimental factorial

VI.1.4. Diseño Experimental 4:

En este diseño experimental se modificó el protocolo de lavado, haciéndose éste con la propia solución del electrolito en lugar de agua como en el primer diseño. La idea es que, durante el lavado no se generen otros fenómenos como el de difusión u ósmosis que puedan introducir errores perceptivos al evaluar la información o que enmascaren el verdadero efecto de la composición química (naturaleza y concentración) del electrolito. Los resultados de este diseño experimental se resumen en la Tabla VI.8 y en la Figura VI.10.

Tabla VI. 8: Evaluación del efecto de la carga y concentración de electrolitos en la remoción del barrillo

Electrolito/ Concentración (N)		0,00001	0,0001	0,001	0,01
NaCl	Grado de limpieza promedio	2,8	3,7	5,8	5,3
	Microfotografía representativa				
BaCl ₂	Grado de limpieza promedio	4,8	3,8	5,5	2,7
	Microfotografía representativa				
FeCl ₃	Grado de limpieza promedio	3,7	4,8	6,5	15,2
	Microfotografía representativa				

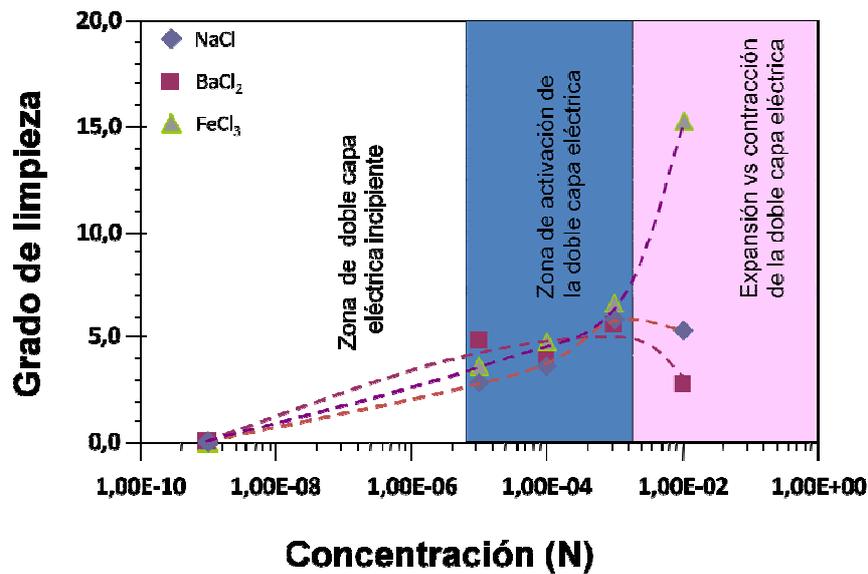


Figura VI. 10: Variación del grado de limpieza con respecto a la concentración de las sales empleadas

Como en los casos anteriores la Tabla VI.8 muestra una serie de fotografías microelectrónicas representativa en las que se ve de alguna manera el grado de limpieza de superficies de dentina sometidas a los respectivos tratamientos. La Figura VI.10 muestra, por su parte, que los sistemas salinos se comportan de manera similar hasta una concentración dada, zonas 1 y 2; esto es, el grado de limpieza pareciera mejor poco a poco, casi de manera lineal. Luego en la zona 3, los sistemas se diferencian entre sí de manera bastante marcada. Así, mientras los tratamientos con cloruro de sodio y de bario empeoran el grado de limpieza, el tratamiento con cloruro férrico mejora sustancialmente el mismo. Para explicar este comportamiento primero es necesario hacer uso de más información para luego volver al mismo.

Teniendo en cuenta que del diseño experimental 1, el grado de acidez resultó ser un factor de gran importancia se procedió a medir el pH de las soluciones de los distintos electrolitos estudiados a diferentes concentraciones. La Figura VI.11 muestra la correlación entre el pH, el tipo de electrolito y la concentración. En ellas se puede apreciar que las soluciones de NaCl son neutras en todo el intervalo de concentración evaluado; esto se debe al hecho de que los iones sodio y cloruro son muy débiles, puesto que los mismos provienen de una base y un ácido fuerte respectivamente. Por lo tanto, estos iones no son susceptibles de sufrir hidrólisis. En los casos de BaCl₂ y FeCl₃, los cloruros no se hidrolizan. Sin embargo tanto el Ba⁺² y el Fe⁺³ si se hidrolizan, siendo el ión hierro el que más se hidroliza por ser un ión más pequeño y tener una carga mayor, lo que resulta en un menor pH para una misma concentración normal.

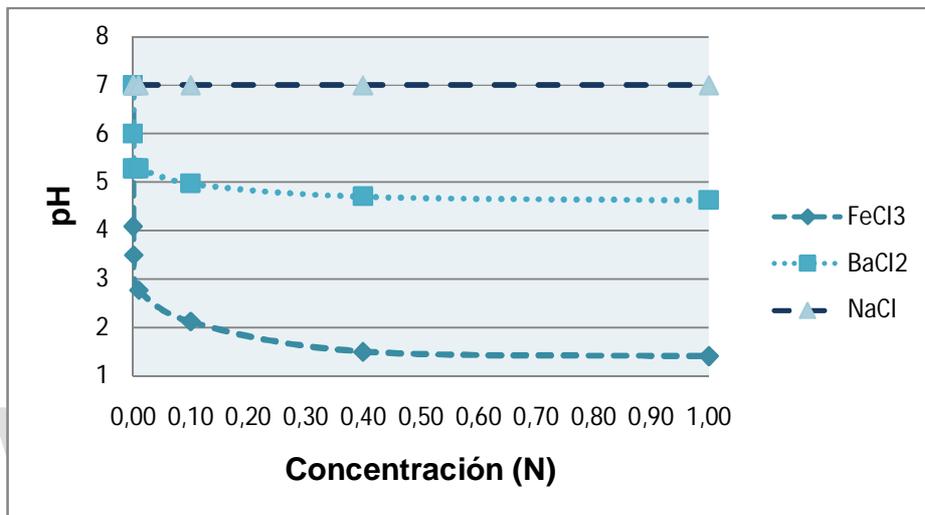
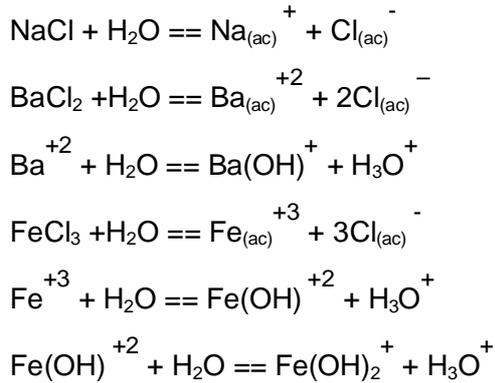


Figura VI. 11: Variación del pH con la concentración del electrolito

Ahora bien, teniendo en cuenta esto y lo observado en la Figuras VI.3 y VI.4, se puede intuir que lo que ocurre en este caso es que el ion férrico se hidroliza bastante como para incrementar la concentración de iones hidronios, H_3O^{+} , baja el pH, a un nivel tal que hace que el potencial Z se incremente suficiente como para activar la doble capa, lo que hace que las partículas eventualmente puedan separarse lo suficiente de la superficie de la dentina como para que las fuerzas que las mantienen unidas a esta se debiliten, de modo que un chorro de solución pueda removerlas fácilmente de la superficie de la dentina. Siendo, la hidroxiapatita, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ uno de los componentes principales de la dentina, lo que la hace algo básica, los iones hidronios reaccionan con ella dejando un protón sobre la superficie. De esta manera, la superficie se carga positivamente como lo mide el potencial Z. Ahora bien, en estas circunstancias en la capa difusa se concentra más el ión cloruro, que es el mismo en los tres casos y está a la misma concentración. Así que, las diferencias entre los distintos tratamientos va a ser por el grado de carga superficial que tengan cada una de las superficies (carga del catión) y por la concentración.

Es bien conocido que la doble capa eléctrica se comprime con la concentración de los electrolitos presentes, de hecho se ve en la Figura VI.10 que el grado de limpieza empeora con la concentración más alta, excepto para el cloruro férrico que es capaz de activar otro mecanismo, como se dijo arriba. Esta compresión de la doble capa eléctrica en este caso en el que los sistemas partículas de barrillo ya están adheridos, favorece un poco la remoción del mismo, lo cual corresponde a la zona II de la Figura VI.10. Para explicar mejor esto, proponemos el mecanismo microscópico-molecular bosquejado en la Figura VI.12. En esta figura se presenta el comportamiento de la energía para acercar o alejar dos partículas, en este caso, de la odontología restauradora, las partículas ya están adheridas por lo que se encuentran en el “valle”. También se puede apreciar que al agregar electrolitos al sistema la barrera disminuye; por tanto, si las partículas estuviesen separadas sería más fácil que flocularan, pero como están unidas, también es más fácil separarlas ya que la barrera energética disminuye. Esto explica el por qué las sales, sin importar cual, logran mejorar de manera incipiente el grado de remoción de barrillo en un determinado intervalo de concentración al compararlas con el agua.

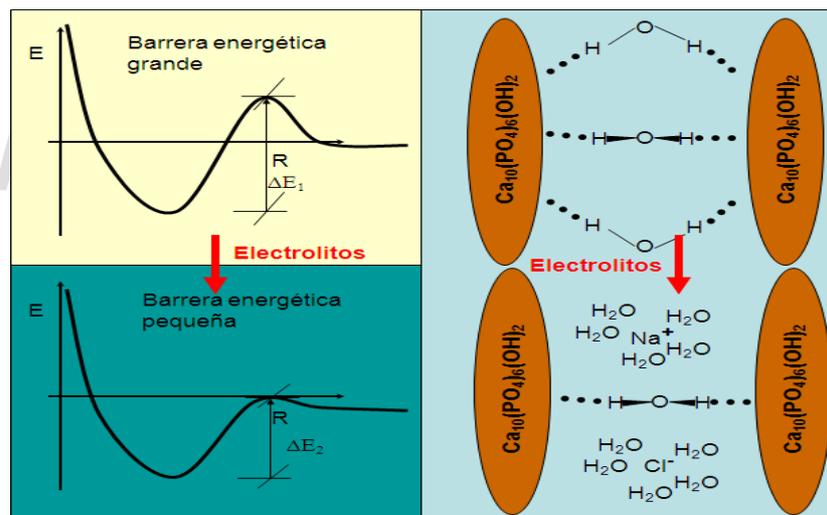


Figura VI. 12: Bosquejo del mecanismo microscópico molecular que explica el por qué los electrolitos limpian el barrillo dentinario mejor que lo que lo hace el agua.

En la medida en que aumenta la concentración del cloruro férrico, se ve favorecida la formación de iones hidronio por efecto de la hidrólisis de la sal, lo que implica entonces la disminución del pH. Fenomenológicamente hablando, lo que ocurre es que los iones hidronio como ácidos de Brønsted – Lowry, tienen la capacidad de ceder los protones H^+ . Estos iones H^+ son a su vez un ácido de Lewis, lo que implica que tienen alta tendencia a captar un par de electrones que no esté compartido. Esta disposición provoca que dichas especies encuentren en la superficie de la dentina, específicamente en la de la hidroxiapatita, un sustrato (grupo fosfato) ideal para reaccionar, por lo que en lugar de llevarse

a cabo una adsorción de tipo electrostática, lo que ocurre es una reacción química sobre la superficie de la partícula, lo cual corresponde a un fenómeno conocido como quimisorción. La superficie de las partículas adquiere carga positiva cuya intensidad aumenta con la concentración y esto trae como consecuencia un acrecentamiento de las fuerzas de repulsión, por lo que las partículas se separan unas de otras lo suficiente como para ser lavadas, de una manera efectiva, por un chorro de líquido a presión.

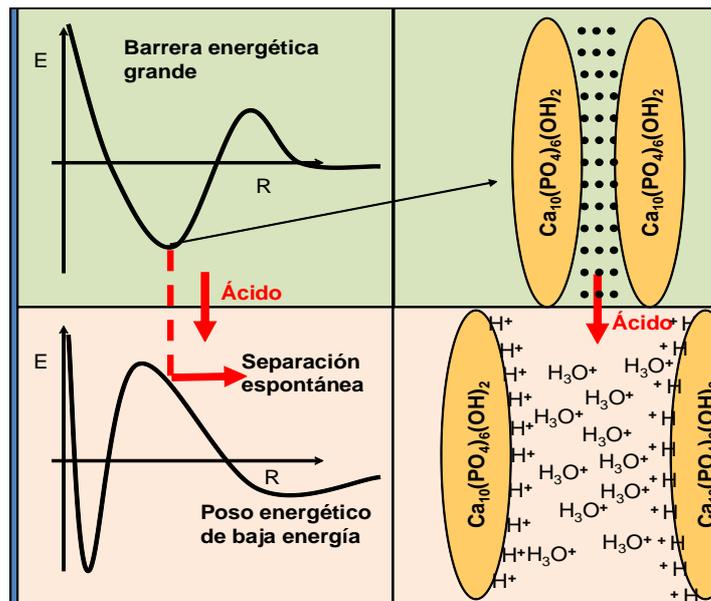


Figura VI. 13: Bosquejo del mecanismo microscópico molecular mediante el cual se explica el cómo los ácidos remueven el barrillo dentinario con suma facilidad.

En la Figura VI.14 se puede observar que la estabilidad de la dispersión permanece fundamentalmente constante con la variación de la concentración tanto del NaCl como del BaCl₂. No obstante, para el FeCl₃ se observa que la concentración afecta notoriamente la estabilidad de la dispersión de dentina molida. La estabilidad de la dispersión se definirá como el cociente entre la turbidez a un tiempo dado, en este caso 5 minutos, y la turbidez inicial (a tiempo cero). Por ahora no se puede explicar este comportamiento y tampoco se puede correlacionar claramente con la información del grado de limpieza.

$$\textit{Estabilidad de la Dispersión} = \frac{\textit{Turbidez a tiempo dado (FAU)}}{\textit{Turbidez inicial (FAU)}}$$

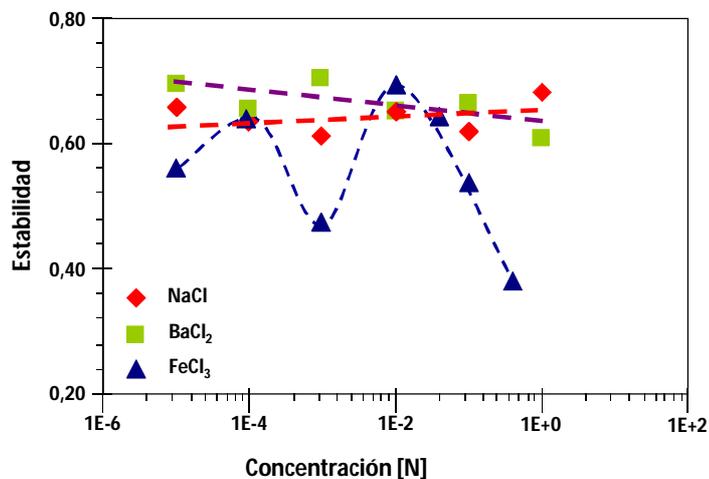


Figura VI. 14: Evaluación de la estabilidad de la dispersión con respecto a la concentración de las sales empleadas para un tiempo de 5 minutos.

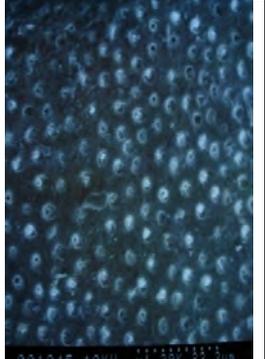
VI.1.5. Diseño Experimental 5:

Aquí, se aplicaron 8 tratamientos, dos réplicas, de acuerdo a un diseño experimental factorial 2^{4-1} (ver apartado V.4.1.6). El propósito fundamental de este diseño es el de comprobar que como describe el mecanismo microscópico molecular propuesto y bosquejado en la Figura VI.13 la concentración de los iones hidronios, el pH, es el factor determinante en la remoción del residuo dentinario, al menos vía este mecanismo. Para ello se empleó esta vez un ácido fuerte, ácido clorhídrico.

La Tablas VI.8 y la Figura VI.15 muestran claramente que la presencia de un ácido fuerte a una concentración suficientemente alta, 0.01N, pH próximo a 2, induce los fenómenos que facilitan la remoción del barrillo dentinario, mientras que a baja concentración, 0,0001N, se observa un grado de limpieza incipiente, que sugiere que los fenómenos que favorecen el grado de limpieza no se activan a dicha concentración de iones hidrónios. Así, de la información proveniente tanto de la tabla como de la figura queda claro que es el HCl y la concentración de 0,01N los factores que determina la limpieza del barrillo dentinario, los otros factores como tipo de electrolito y concentración de los mismos juegan un role menos importante. Estos dos factores, el HCl y su concentración, se conjugan en uno sólo, la concentración de los iones hidronios, H_3O^+ , o el pH; esto es, un pH de aproximadamente 2 hace las condiciones que induce, cohibe e inhibe los fenómenos, de modo que, un chorro de solución líquida pueda vencer las fuerzas que mantienen adheridas a las partículas de barrillo dentinario a la superficie de la dentina. De igual manera, es importante notar que a concentración de HCl 0,0001N el grado de limpieza ya no es tan bueno, incluso en el caso del cloruro férrico 0,01N que había mostrado ser un

buen tratamiento, ver diseño experimental 4. Al parecer, la presencia de otros electrolitos tienen un efecto negativo, en cuanto a inducir una mejor limpieza de la dentina. La presencia de un ácido fuerte, inhibe la hidrólisis del cloruro de bario y férrico, por lo que habrá en el medio gran cantidad de iones Ba^{+2} y Fe^{3+} ; por otra parte, la presencia de otros iones en alta concentración el cloruro de sodio, T_7 , en un caso y el de bario en el otro, T_3 , parecen comprimir la doble capa siendo más importante el caso de cloruro de bario, que tiene un catión con carga +2. Finalmente, resulta importante notar que en el tratamiento 8, T_8 , el ácido clorhídrico 0,01N desmejora su capacidad para inducir la limpieza debido a que todos los demás electrolitos están a una concentración alta, condición que induce la compresión de la doble capa, desmejorando así su efecto sobre el grado de limpieza. Finalmente, se puede decir que la información de este diseño experimental apoya al mecanismo propuesto.

Tabla VI. 9: Efecto de la adición de los tratamientos correspondientes al diseño factorial 2^{4-1} sobre la remoción de barrillo dentinario

Parámetro/Tipo de Surfactante	T1	T2	T3	T4
Grado de limpieza promedio	4,8	19,2	6,2	19,2
Microfotografía representativa				
Parámetro/Tipo de Surfactante	T5	T6	T7	T8
Grado de limpieza promedio	4,3	19,2	8,3	16,3
Microfotografía representativa				

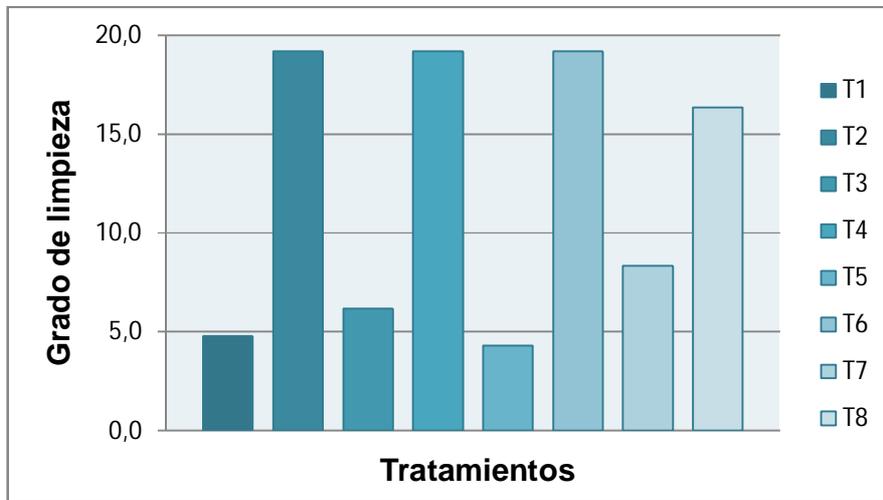


Figura VI. 15: Grado de limpieza de los tratamientos empleados en el diseño experimental 5

La Figura VI.16 muestra la turbidez de los sistemas polvo de dentina disperso en los distintos tratamientos del diseño experimental 5 en seis momentos diferentes. Al igual que en el experimento anterior, ilustrado en la Figura VI.15, se observa que los tratamientos que mejor limpiaron tienen un comportamiento bastante diferente al resto, pero todavía no está claro la correlación que existe entre ellos y los fenómenos que promueven la limpieza del barrillo. En esta Figura VI.16, se observan dos hechos resaltantes: primero, que la turbidez inicial de los tratamientos que promueven la remoción del barrillo dentinario, T₂, T₄, T₆ y T₈, es mucho menor y segundo que son más estables, dado que la turbidez casi no se modifica en el tiempo como si lo hace en todos los otros cuatro casos, T₁, T₃, T₅ y T₇.

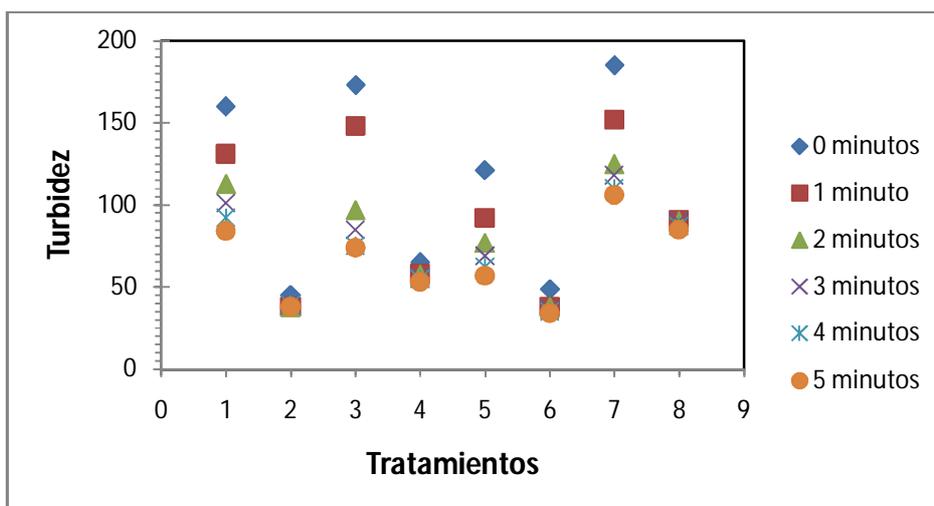


Figura VI. 16: Estabilidad de los distintos tratamientos del diseño experimental 5

www.bdigital.ula.ve **VII. Conclusiones**

VII. Conclusiones

- Las formulaciones surfactantes usadas (DTAB 20 mM, NFE 17.5 3%p/p, SDS 20 mM, SDS 250 mM) no son capaces de promover un fenómeno detergente a través del cual sea posible remover de un modo efectivo el barrillo dentinario.
- Los sistemas oleosos y emulsionados empleados (AOT en kerosene - NFE4 en aceite mineral - H_3PO_4) no lograron promover los fenómenos (emulsión y flotación) a partir de los cuales sea posible remover efectivamente el barrillo dentinario.
- Los electrolitos por sí mismos (NaCl, $BaCl_2$, $FeCl_3$) logran promover de forma incipiente la limpieza de la capa residual dentinaria y su alcance es casi independiente de su concentración.
- Se identificó y describió el mecanismo mediante el cual los electrolitos promueven la limpieza del barrillo dentinario en mayor o en menor grado: "Activación de la superficie dentinaria por parte de los iones hidronios producto de la hidrólisis de las sales".
- El pH (la concentración de los iones hidronios) resultó ser el factor de mayor influencia y alcance en la remoción de la capa de barrillo dentinario.
- Se propuso que el mecanismo mediante el cual el pH limpia el residuo dentinario, está relacionado con la activación de la superficie dentinaria por parte de los iones hidronio.

www.bdigital.ula.ve ***VIII. Referencias Bibliográficas***

VI. *Referencias Bibliográficas*

- Adamson, A. W. (1976) *Physical Chemistry of Surfaces*, 3rd ed., Interscience, New York, 1976, pp. 197.
- Albin, T. B., D. W. Bisacchi, J. C. Illman, W. T. Shebs, and H. Stupel. (1973) Paper presented before Am. Oil Chem. Soc., Chicago, Sept. 18.
- Altmajer, D. (2004). *Formulaciones de Detergentes Biodegradables. Ensayos de lavado. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, España.* pp. 49,51.
- Anton, Raquel. (2005) *Tensión Interfacial. Cuaderno FIRP S203A. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Mérida, Venezuela.* pp 1-2, 5.
- Attal JP, Asmussen E, Degrange M. (1994), Effects of surface treatment on the free surface energy of dentin. *Dent Mater.*10, (4), 259-64.
- Ayad, Mohamed (2001). Effects of rotary instrumentation and different etchants on removal of smear layer on human dentin. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 85, 67-72.
- Baier, R. E., Shafrin, E.G. y Zisman, W.A. (1968). Adhesion: Mechanisms that assist or impede it. *Science*, 162, 1360 -1368.
- Barros, J.A., Myaki S.I., Nör J.E. y Peters, M.C. (2005). Effect of type conditioning on the surface and interface of dentine. *Journal of Oral Rehabilitation.* 32, 849-856.
- Boyde A, Switsur VR, Steward A.D.G. (1963). An assessment of two new physical methods applied to the study of dental tissues. In: *Advances in fluorine research and dental caries prevention.* 1. Oxford, UK: Pergamon Press Ltd., pp. 185-193.
- Brännström M. y Johnson G. (1974). Effects of various conditioners and cleaning agents on prepared dentin surfaces: A scanning electron microscopic investigation. *Journal of Prosthetic Dentistry.* 31, (4), 422 – 430.
- Brännström M. y Nordenvall K.J. (1977). The Effect of Acid Etching on Enamel, Dentin, and the Inner Surface of the Resin Restoration : A Scanning Electron Microscopic Investigation *Journal of Dental Research.* 56, (8), 917-923.
- Buonocuore M.A. (1955). A simple method of increasing the adhesion of acrylic fillings to enamel surfaces. *Journal of Dental Research.* 34, 849 - 853.

Castellan, G. (1987). Físicoquímica. Segunda Edición en español. Estados Unidos: Addison – Wesley Iberoamericana. pp 452 – 455.

Chang, R. (1999). Química. Sexta Edición.. México D.F.: Editorial McGraw Hill. pp 418–423.

Chapman, D. L. (1913). Philos. Mag. 25, 475.

Chappell R.P., Cobb C.M., Spencer P., Eick I.D.(1994). Dentinal tubule anastomosis: a potential factor in adhesive bonding. Journal of Prosthetic Dentistry. 72,183-188.

Cutler, W. G y Davis R.C. (1972). Detergency. Theory and Test Methods Part I.. New York: Marcel Dekker. p. 66

Delgado, A.V., González – Caballero, F., HunterR.J., Koopal, L.K. y Lyklema, J. Measurement and Interpretation of Electrokinetic Phenomena. Technical Report. pp. 1756-1762.

Derjaguin, B. y Landau, L. (1941). Acta Physicochim, 14, 633.

Duke E.S., Phillips R.W. y Blumershine R.(1985). Effects of various agents in cleaning cut dentine. Journal of Oral Rehabilitation. 12, 295 – 302.

Durham K. (1961). Surface Activity and Detergency. Mcmillian & Co Ltda. p 250.

Eick I.D., Wilko R.A., Anderson C.H., Sorensen, S.E. (1970). Scanning electron microscopy of cut tooth surfaces and identification of debris by use of the electron microprobe. Journal of Dental Research. 49,1359-1368.

Franchi, M. y Breschi, L. (1995). Effects of acid etching solutions on human enamel and dentin. Quintessence International. 26 (6),431-435.

Gladwin, M. y Bagby M. (2001). Aspectos clínicos de los materiales en odontología. Primera edición. México D.F: Editorial El Manual Moderno. pp 44 – 46.

Gouy, G. (1910). J. Phys. 9, 457.

Gouy, G. (1917). Ann Phys. 7, 129.

Hamaker, C. H. (1937) Physica. 4, 1058.

Holmberg, K; Jonsson, B; Kronberg, B. y Lindman, B. (2003). Surfactants and Polymers in Aqueous Solution. Segunda Edición. Chichester (Inglaterra): John Wiley & Sons, Inc.

Ibsen, R. y Neville, K. (1977). Odontología Restauradora Adhesiva. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana. pp. 13 -17.

Kling, W. and H. Lange. (1960).The Journal of the Oil Chemists Society. 37, 30.

Krestonosich, S; Mostue, M; Olivares, W; Almeida R; Scharifker B; Agrifolio, G; Iacocca, D; De la Cruz, C; Cortes, L y Bifano, C. Disoluciones – Monografías de Química, Editorial Miró, 1992.

Lange, H. (1967). Solvent Properties of Surfactant Solution en K. Shinoda (Ed.), Vol. 5. Chap. 4. New York: Marcel Dekker. pp 195–244.

Lyklema, J. (1968). Adv. Colloid Interface Sci. 2, 67.

Marcano, D (Ed). Reacciones de Óxido-Reducción. Editorial Miró. Caracas, Venezuela. p 3-4.

McLaughlin, G. (1987). Retenedores de Adhesión Directa: puente de Maryland y otras alternativas. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana. p 13-14.

Mjör I.A., Nordahl I. (1996). The density and branching of dentinal tubules in human teeth. Arch Oral Biol 38,541- 546.

O'Sullivan R, Flannelly M (1990). Leeuwenhoek and the structure of dentin. J Irish Dent Assoc 36, 129-133.

Pashley, D.H et al. (1993). Permeability of dentin to adhesive agents. Quintessence International. 24, 618.

Rosen, M. (1978). Surfactants and Interfacial Phenomena. (Tercera Edición., pp. 1,3). Estados Unidos: Wiley- Interscience.

Rosen, M. (2004). Surfactants and Interfacial Phenomena. (Tercera Edición., pp. 1, 35 – 39, 353 – 361, 371). Estados Unidos: Wiley- Interscience.

Salager J.L. (1998). Doble Capa Eléctrica Interfacial. Cuaderno FIRP S610A. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Mérida, Venezuela.

Salager J.L. y Forgiarini A. (2007). Fundamentos de la Flotación. Cuaderno FIRP S335a. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Mérida, Venezuela. p. 1 – 10.

Salager, J.L. (1988). Detergencia. Fenómenos y Mecanismos. Cuaderno FIRP S331A. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Mérida, Venezuela. p. 6-11.

Salager, J.L. (1993). Surfactantes en Solución Acuosa. Cuaderno FIRP S201A. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, p. 7-11.

Salager, J.L. (2002). Fenómenos Interfaciales en Dispersiones Polifásicas y en Medios Porosos. Cuaderno FIRP S122N. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería Química. Mérida, Venezuela. p 3, 15-30, 34.

Schamm, L. (2005). *Emulsions, Foams and Suspensions*. Weinheim (Alemania): WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Schwartz, A. M (1962). Detergencia y Detergentes en R.E. Kirk. y Othmer (Ed.), *Enciclopedia de Tecnología Química* (1era edición, Tomo VI, pp. 365, 366,377-379, 386 - 391). México: D.F. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana.

Schwartz, A. M. (1972). en E. Matijevic (Ed.), *Surface and Colloid Science* (Vol. 5, pp. 195–244). New York: Wiley.

Schwartz, Richards et al. (1996). *Fundamentals of Operative Dentistry. A Contemporary Approach.*, Inc. Illinois,USA: Quintessence Publishing Co.

Skoog, D.A., West, D. M., Holler, F.M. y Crouch, S.R. (2000). *Química Analítica*. Séptima edición. México D.F: Editorial McGraw Hill. p 191.

Solomons, T. W. (1999). *Fundamentos de Química Orgánica*. Segunda Edición. México D.F: Editorial Limusa. pp 122-123.

Steenbecker, Oscar (2003). *Fundamentos de la Adhesión Dental en Henestroza, G (Ed.), Adhesión en Odontología Restauradora*. Primera edición. Curitiba, Brasil: Editorial Maio. pp 27,43.

Stern, O., (1924). *Z. Electrochem.* 30, 508.

Tani, Y. y Togaya, T. (1995). *Dentin Surface Treatment without Acids*. *Dental Materials Journal*. 14 (1), 58-69.

Thomson, V.P. y Lividitis, G.J. (1982). *Etched casting acid etch composite bonded posterior bridges*. *Pediat Dent*. 4, (1), 38 – 43.

Toral, M. T. (1973). *Fisicoquímica de Superficies y Sistemas Dispersos*. España: Ediciones Urmo. pp. 120 – 122.

Uribe – Echeverría, D. et al. (1997). *Dentin action and penetration of dentin conditioners*. *Journal of Dental Research*. 76 (4) 5, p 918.

Verwey, E. and J. Th. G. Overbeek (1948). *Theory of the Stability of Lyophobic Colloids*. Amsterdam: Elsevier.

Vojinovic, O., Nyborg, H. y Brännström, M. (1973). *Acid Treatment of Cavities Under Resin Fillings: Bacterial Growth in Dentinal Tubules and Pulpal Reactions*. *Journal of Dental Research*. 52, (6), 1189-1193.

Vold, M. J., J. (1961). Colloid Sci. 16, 1.

Von Helmholtz, H. (1879). Wied. Ann. Phys. 7, p. 337.

Yedid, S.E y K.C. (1980). Bond strenght of three esthetic restorative materials to enamel and dentin. J Prosthet Dent. 42:573.

Zetasizer NanoSeries. Zeta Potential Theory, Chapter 16, p. 16.2.

Zetasizer NanoSeries. Zeta Potential Theory, Chapter 16, p. 16.3

Fuentes Electrónicas

Acetato de sodio. (s.f.) Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
http://es.wikipedia.org/wiki/Acetato_de_sodio

Ácido acético. (s.f.) Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_ac%C3%A9tico

Ácido clorhídrico. (s.f.) Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
es.wikipedia.org/wiki/Ácido_clorhídrico

Ácido fosfórico. (s.f.) Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
es.wikipedia.org/wiki/Ácido_fosfórico

Adhesivos. (s.f.). Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
[www.idap.com.mx/apuntes/.../Adhesivos\(8\).doc](http://www.idap.com.mx/apuntes/.../Adhesivos(8).doc)

Adsorption. (s.f.). Consultado el 15 de junio de 2009 de la dirección electrónica:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption>

Arriagada, E. (s.f.) Consultado el 15 de septiembre de la dirección electrónica:
[www.idap.com.mx/apuntes/Embriologia/Dentina\(3\).doc](http://www.idap.com.mx/apuntes/Embriologia/Dentina(3).doc)

Capacidad de mojado. (s.f.) Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
<http://resinasepoxi.com.ar/page/2/>

Capilaridad. (s.f.). Consultado el 15 de junio de 2009 de la dirección electrónica:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Capilaridad>

Caries dental. (s.f.) Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
<http://www.dentalsalud.com.ve/index2.htm>

Cloruro de Bario. (s.f.). Consultado de 10 de mayo de 2009 de la dirección electrónica:
<http://www.grupoprevenir.es/fichas-seguridad-sustancias-quimicas/0614.htm>

Cloruro de hierro. (s.f.). Consultado el 2 de septiembre de 2009 la dirección electrónica:
[http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_hierro_\(III\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_hierro_(III))

Cloruro de sodio. (s.f.). Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
http://es.wikipedia.org/wiki/Cloruro_de_sodio

Dentina. (s.f.) Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Dentina>

Diente extraído. (s.f.). Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
http://es.wikipedia.org/wiki/Diente_extraido el 02/09/2009 a las 10:30 pm

Doble capa eléctrica, (s.f.). Consultado el 14 de junio de 2009 de la dirección electrónica:
es.wikipedia.org/wiki/Doble_capa_eléctrica

Dodecilsulfato sódico. (s.f.) Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
http://es.wikipedia.org/wiki/Dodecilsulfato_s%C3%B3dico

Dodecyl trimethyl ammonium bromide. (s.f.). Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB8339676.htm

Energía superficial. (s.f.). Consultado el 14 de junio de 2009 de la dirección electrónica:
es.wikipedia.org/wiki/Energía_superficial

Fenomenos interfaciales. (s.f.) Consultado el 30 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/.../r23853.DOC

Fuerza intermolecular. (s.f.). Consultado el 10 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
http://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_intermolecular

Hemming, D. y Degel, J. (s.f.). Activated carbón for solvent recovery. Consultado el 30 de agosto de 2009 de la dirección electrónica:
www.activated-carbon.com/solrec3.html

Histología de las articulaciones. (s.f.) Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica:
<http://www.monografias.com/trabajos45/histologia-articulaciones/histologia-articulaciones2.shtml>

Isoelectric point. (s.f.). Consultado el 10 de julio de 2009 de la dirección electrónica:
http://en.wikipedia.org/wiki/Isoelectric_point

Jovel, J. y Sabillón, I. (s.f.). Consultado el 20 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica: http://www.javeriana.edu.co/academiapendodencia/art_revision/revision_2006/i_a_revision43.html

Kerosene. (s.f.) Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica: <http://www.ecosur.net/Sustancias%20Peligrosas/kerosene.html>

La pulpa dental. (s.f.) Consultado el 2 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica: <http://www.caries.info/pulpa.htm>

Pentanol. (s.f.) Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica: Obtenido de "http://es.wikipedia.org/wiki/1-pentanol"

Permeabilidad. (s.f.). Consultado el 20 de mayo de 2009 de la dirección electrónica: <http://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad>

Point of zero charge. (s.f.). Consultado el 10 de julio de 2009 de la dirección electrónica: http://en.wikipedia.org/wiki/Point_of_zero_charge

Profilaxis o Limpieza Dental sin Dolor. (s.f.). Consultado el 20 de septiembre de 2009 de la dirección electrónica: http://www.draosorno.com/profilaxis_o_limpieza_dental_sin.htm

Provisionales. (s.f.) Consultado el 2 de septiembre de la dirección electrónica: www.prodonoa.com.ar/.../provisionales_foto2.jpg.

Turbidez. (s.f) Consultado el 7 de octubre de 2009 de la dirección electrónica: <http://es.wikipedia.org/wiki/Turbidez>

Zeta potencial. (s.f.). Consultado el 22 de agosto de 2009 de la dirección electrónica: http://en.wikipedia.org/wiki/Zeta_potential.

www.bdigital.ula.ve *Anexos*

Anexos

Anexo 1: Tabla de Evaluación de las Microfotografías Electrónicas para el diseño experimental 1

Efecto	Solución	Replica 1					Replica 2					Promedio		
		(puntaje por microfotografía)					(puntaje por microfotografía)							
		1	2	3	4	5	promedio	1	2	3	4		5	promedio
Electrolito	BaCl ₂ 0.01 N													
	FeCl ₃ 0.0001 N													
	FeCl ₃ 0.01 N													
	NaCl 0,01 N													
pH	Buffer 0-100													
	Buffer 20-80													
	Buffer 50-50													
	Buffer 80-20													
	Buffer 100-0													
Concentración	NaCl 0.001%													
	NaCl 0.01%													
	NaCl 0.1%													
	NaCl 1%													
	NaCl 5%													
	NaCl 20%													
Detergencia y emulsión	Microemulsión													
	DTAB 20 mM													
	NFE 17.5 3%													
	SDS 20mM													
	SDS 250													

Anexo 2: Tabla de Evaluación de las Microfotografías Electrónicas para el diseño experimental 2

Solución	Replica 1						Replica 2						Promedio
	(puntaje por microfotografía)						(puntaje por microfotografía)						
	1	2	3	4	5	promedio	1	2	3	4	5	promedio	
AOT NFE 4													
AOT NFE 4 H3PO4													
H2O+NaCl+C5OH+SDS													
H2O+NaCl+C5OH+SDS+Kerosene													

Anexo 3: Tabla de Evaluación de las Microfotografías Electrónicas para el diseño experimental 3

Efecto	Replica 1						Replica 2						Promedio
	(puntaje por microfotografía)						(puntaje por microfotografía)						
	1	2	3	4	5	promedio	1	2	3	4	5	promedio	
80-20 y agua													
80-20 DTAB													
100-0 y agua													
100-0 DTAB													

Anexo 4: Tabla de Evaluación de las Microfotografías Electrónicas para el diseño experimental 4

Efecto	Replica 1						Replica 2						Promedio
	(puntaje por microfotografía)						(puntaje por microfotografía)						
	1	2	3	4	5	promedio	1	2	3	4	5	promedio	
BaCl2 0,00001 N													
BaCl2 0,0001 N													
BaCl2 0,001 N													
BaCl2 0,01 N													
FeCl3 0,00001 N													
FeCl3 0,0001 N													
FeCl3 0,001 N													
FeCl3 0,01 N													
NaCl 0,00001 N													
NaCl 0,0001 N													
NaCl 0,001 N													
NaCl 0,01 N													

Anexo 5: Tabla de Evaluación de las Microfotografías Electrónicas para el diseño experimental 5

Efecto	Replica 1						Replica 2						Promedio
	(puntaje por microfotografía)						(puntaje por microfotografía)						
	1	2	3	4	5	promedio	1	2	3	4	5	promedio	
T1													
T2													
T3													
T4													
T5													
T6													
T7													
T8													

www.bdigital.ula.ve