



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y

MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERA EN PETROQUÍMICA**

**TEMA: DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO CON BASE EN
LOS POLÍMEROS POLIDIMETILSILOXANO Y
POLITETRAFLUORURO DE ETILENO PARA SU USO EN
RECUBRIMIENTOS DE PRÓTESIS HUMANAS.**

AUTORA: CHICAIZA SALAZAR, RITHA ISABEL

DIRECTOR: ING. DONOSO QUIMBITA, CATERINE ISABEL MSC.

LATACUNGA

2019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA E PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el proyecto de titulación, **“DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO CON BASE EN LOS POLÍMEROS POLIDIMETILSILOXANO Y POLITETRAFLUORURO DE ETILENO PARA SU USO EN RECUBRIMIENTOS DE PRÓTESIS HUMANAS”** fue realizado por la señorita Chicaiza Salazar, Ritha Isabel , el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, Enero del 2019

Ing. Donoso Quimibita, Caterine Isabel, MSc.

C.C.:050250753-6



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Chicaiza Salazar, Ritha Isabel, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO CON BASE EN LOS POLÍMEROS POLIDIMETILSILOXANO Y POLITETRAFLUORURO DE ETILENO PARA SU USO EN RECUBRIMIENTOS DE PRÓTESIS HUMANAS”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, Enero del 2019

Chicaiza Salazar, Ritha Isabel

C.C.: 050350728-7



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Chicaiza Salazar, Ritha Isabel** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO CON BASE EN LOS POLÍMEROS POLIDIMETILSILOXANO Y POLITETRAFLUORURO DE ETILENO PARA SU USO EN RECUBRIMIENTOS DE PRÓTESIS HUMANAS”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, Enero del 2019

Chicaiza Salazar, Ritha Isabel

C.C.: 050350728-7

DEDICATORIA

Dedicado a:

Dios por la oportunidad de vivir y aprender.

A la Virgencita del Cisne por llenar de fe mi vida.

A mi hijo Luciano Dariel por ser lo más importante en mi vida, por acompañarme
con su inocencia y ternura.

A mi hermana Elizabeth por su apoyo incondicional en las buenas y en las malas.

A mis padres David y Yolanda, por el esfuerzo y sacrificio que han hecho para
poder apoyarme y nunca abandonarme brindándome todo su amor.

A Dimitri por enseñarme que la vida está llena de obstáculos que se pueden superar
con esfuerzo, gracias porque a pesar de las adversidad hoy estas a mi lado.

A mi abuelita Aurora, por darme luz en mis días más oscuros, te amo donde estés.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la vida por las oportunidades que me han brindado para poder crecer académica y personalmente.

A la Ing. Caterine Isabel Donoso Quinbita por darme la apertura de realizar este trabajo de investigación compartiéndome sus conocimientos y brindándome su apoyo incondicional, gracias infinitas por ser una guía fundamental en mi tesis.

Al Ing. Francisco Quiroz, director del Centro de Investigación Aplicada a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional y a la Ing. Elizabeth Venegas por permitirme realizar parte de este trabajo en el departamento a su cargo.

A mi amor verdadero, mi hijo, Luciano Dariel, por sus palabras tiernas de aliento cuando ya me rendía, a mis Hermanos Ely, Lili, Wili y José por su cariño y apoyo, en especial a mi querida hermana Ely gracias eternas por apoyarme con la crianza de mi hijo Dariel en los momentos de mi ausencia y permitirme concluir con una etapa más de mi vida.

A todos quienes formaron parte de mi carrera universitaria en especial al Dr. Román Rodríguez, gracias por las cosas buenas y malas porque de aquello queda la enseñanza para poder seguir adelante en todos los ámbitos de la vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRAC	xiii

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema	5
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo General.....	7
1.4.2. Objetivo Específicos	7

1.5.	Hipótesis	8
1.6.	Variable Dependiente	8
1.7.	Variable Independiente.....	8

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.	Introducción a la síntesis de polímeros	9
2.1.1.	Polímero.....	9
2.1.2.	Historia	11
2.1.3.	Clasificación	13
2.1.4.	Polímeros sintéticos.....	14
2.1.5.	Propiedades generales de los polímeros	16
2.1.6.	Organosiloxano - Siliconas	17
2.1.7.	Origen	17
a.	Propiedades	19
b.	Tipos de siliconas.....	19
2.1.8.	Polidimetilsiloxano.....	21
a.	Propiedades y aplicaciones	22
2.1.9.	Fluoropolímeros	23
2.1.10.	Politetrafluoruro de etileno	23
a.	Descubrimiento	25
b.	Propiedades y Aplicaciones	25
2.1.11.	Reticulación	26
a.	Agente reticulante – Ortosilicato de tetraetilo	28
2.1.12.	Curado	28
a.	Agente de curado - Dilaurato de dibutil estaño	29
2.2.	Métodos de preparación de láminas de pdms/ptfe	29
2.3.	Materiales compuestos	31

2.4.	Ensayos mecánicos.....	32
2.4.1.	Ensayo de resistencia a la tracción.....	33
2.4.2.	Módulo de elasticidad.....	34
2.5.	Ensayos físicos.....	35
2.5.1.	Solubilidad.....	35
2.5.2.	Permeabilidad.....	36
a.	Técnica de desecante.....	38
b.	Técnica de agua.....	38

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1.	Introducción.....	40
3.2.	Materiales, equipo y reactivos.....	40
3.2.1.	Materiales.....	40
3.2.2.	Equipos.....	41
3.2.3.	Reactivos.....	42
3.3.	Parte Experimental.....	42
3.4.	Diseño experimental.....	43
3.5.	Procedimiento.....	45
3.5.1.	Acondicionamiento de la materia prima.....	45
3.5.2.	Preparación de la capa interna.....	45
3.5.3.	Preparación del politetrafluoruro de etileno.....	47
3.5.4.	Preparación del material compuesto.....	47
3.6.	Evaluación del material compuesto.....	48
3.6.1.	Resistencia a la tracción.....	48
3.6.2.	Cálculo del rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad.....	52
3.6.3.	Permeabilidad al vapor de agua.....	53

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1.	Resistencia a la tracción bajo especificaciones de las Norma ASTM – D638.....	55
4.1.1.	Análisis del diseño experimental aplicado a la resistencia a la tracción	55
4.1.2.	Análisis de varianza.....	58
4.2.	Módulo de elasticidad.....	63
4.3.	Cálculo Rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad.....	70
4.3.1.	Cálculo Rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad.....	71
4.4.	Permeabilidad al vapor de agua	79
4.5.	Análisis de viabilidad económica	82

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones.....	88
5.2.	Recomendaciones.....	90

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
--	-----------

ANEXOS.....	97
--------------------	-----------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades físico-químicas de los polímeros experimentados.	42
Tabla 2 Niveles de las variables independientes.	44
Tabla 3 Combinación del diseño experimental	44
Tabla 4 Combinaciones del diseño experimental respecto a la resistencia a la tracción.....	56
Tabla 5 Resultados del ANOVA de la resistencia a la tracción propuesto por el diseño.....	59
Tabla 6 Combinaciones experimentales respecto del módulo de elasticidad.	64
Tabla 7 Módulo de elasticidad de las diferentes capas en la piel humana.....	67
Tabla 8 Datos referenciales de Módulo de elasticidad de las capas de la piel.	69
Tabla 9 Datos referenciales de módulo de elasticidad de acuerdo a la edad.	69
Tabla 10 Cálculo de rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad en agua.....	71
Tabla 11 Cálculo Rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad en etanol.	76
Tabla 12 Resultados obtenidos de permeabilidad al vapor de agua.	79
Tabla 13 Datos referenciales de reactivos para el desarrollo del material compuesto	82
Tabla 14 Datos referenciales de equipos para el desarrollo del material compuesto.	82
Tabla 15 Costo unitario de producción del material compuesto.	83
Tabla 16 Costo unitario de producción del material compuesto de menor resistencia.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la formación del polímero.	10
Figura 2. Estructura monomérica de la silicona.	17
Figura 3. Esquema de la flexibilidad de la silicona.	19
Figura 4. Estructura química de Polidimetilsiloxano.	21
Figura 5. Formación del Politetrafluoruro de etileno.	24
Figura 6. Estructura reticulada.	27
Figura 7. Clasificación de los polímeros en función de la técnica de preparación.	29
Figura 8. Esquema del ensayo de la resistencia a la tracción.	34
Figura 9. Curva de esfuerzo deformación.	35
Figura 10. Esquema de reacción de formación de elastómeros.	46
Figura 11. Troquelación de probetas tipo halterio.	49
Figura 12. Máquina de ensayo Instron.	50
Figura 13. Ruptura de la probeta durante el ensayo de tracción.	51
Figura 14. ASTM D-638 Curva de tensión – deformación.	51
Figura 15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.	60
Figura 16. Figura 16. Grafica de efectos principales de la resistencia a la tracción.	61
Figura 17. Gráfica de interacción de resistencia a la tracción.	62
Figura 18. Diagrama de Pareto, módulo de elasticidad.	66
Figura 19. ASTM D-638 Curva de tensión – deformación	68
Figura 20. Pruebas de solubilidad del material compuesto obtenido en agua destila.	72
Figura 21. Diagrama de Pareto. Rendimiento de entrecruzamiento en agua.	73
Figura 22. Gráfica de interacción para rendimiento de entrecruzamiento en el agua.	75
Figura 23. Pruebas de solubilidad del material compuesto obtenido en agua destila.	77
Figura 24. Diagrama de Pareto de rendimiento de entrecruzamiento en etanol.	78
Figura 25. Diagrama de permeabilidad del vapor de agua bajo.	80
Figura 26. Costo de producción unitario del material compuesto.	86

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PDMS. Polidimetilsiloxano

PDMS-OH: Polidimetilsiloxano

PTFE. Politetrafluoruro de etileno

TEOS. Ortosilicato de tetraetilo

DBTL. Dilaurato de di butilestaño

ASTM. American Society for Testing and Materials

ASTM – D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

ASTME E96. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials

WPV. Permeabilidad al vapor de agua

RESUMEN

Esta investigación está enfocada en el desarrollo de un material compuesto integrado por una capa principal de polidimetilsiloxano y un refuerzo de politetrafluoruro de etileno, a fin de utilizarlo posteriormente en recubrimientos de prótesis humanas. Se evaluó proporciones másicas de la capa principal (PDMS: TEOS: DBTL) en un rango de 33:1:0,5; 25:1:0,5 y 10:1:0,5 y la proporción másica del material compuesto (PTFE: PDMS) en un rango de 1:9; 1:1 y 2:3. Obteniéndose los siguientes resultados: Resistencia a la tracción de 0,085 MPa en base a la relación de 33:1:0,5 - 1:9 y 0,59 MPa con respecto a la relación de 10:1:0,5 - 2:3 evidenciándose un aumento de resistencia a la tracción de 0,617 MPa al disminuir el peso del PDMS: TEOS: DBTL (10:1:0,5) y al aumentar el peso del PTFE/PDMS (1:1), con respecto a la propiedad de solubilidad se verificó que el material compuesto es hidrófobo e insoluble en agua y etanol, además de que tiene un 100% de rendimiento entrecruzamiento, por otra parte la combinación de las proporciones másicas de 10:1:0,5 (capa principal) y 1:1 (PTFE/PDMS), es la que tiene menos permeabilidad al vapor de agua $5,24 \times 10^{-7}$ gr/Pa.s.m².

PALABRAS CLAVE:

- **POLIDIMETILSILOXANO**
- **POLITETRAFLUORURO DE ETILENO**
- **MATERIALES COMPUESTOS DE POLÍMEROS**
- **RECUBRIMIENTO - PRÓTESIS**

ABSTRAC

This research is focused on the development of a composite material composed of a main layer of polydimethylsiloxane and a reinforcement of ethylene polytetrafluoride, to be used later in human prosthesis coatings. Mass ratios of the main layer (PDMS: TEOS: DBTL) in a range of 33:1:0.5; 25:1:0.5 and 10:1:0.5 and the mass ratio of the composite material (PTFE: PDMS) in a range of 1:9; 1:1 - 2:3 were evaluated. The following results were obtained: Tensile strength of 0.085 MPa based on the ratio of 33:1:0.5 - 0.59 MPa with respect to the ratio of 10:1:0.5 - 2:3 showing an increase in tensile strength of 0.617 MPa to decrease the weight of PDMS: TEOS: DBTL (10:1:0.5) and to increase the weight of PTFE / PDMS (1:1) with respect to the property of solubility it was verified that the composite material is hydrophobic and insoluble in water and ethanol, besides that it has a 100% cross-linking performanc, on the other hand the combination of the mass ratios of 10:1:0,5 (main layer) and 1:1 (PTFE/PDMS), is the one that has less permeability to water vapour $5,24 \times 10^{-7}$ gr/Pa.s.m².

PALABRAS CLAVE:

- **POLYDIMETHYLSILOXANE**
- **POLITETRAFLUORURO DE ETILENO**
- **COMPOUND MATERIALS OF POLYMERS**
- **PROSTHESIS - COATING**

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Es trascendental la importancia del uso de polímeros para el diseño de nuevos dispositivos biomédicos compuestos, el empleo de polímeros en ingeniería tisular tiene un gran avance tecnológico y óptimos resultados en la investigación debido a las nuevas propiedades mecánicas y químicas que se pueden desarrollar.

Pueden ser naturales o sintéticos y en cualquier caso se pueden encontrar formulaciones bioestables (con carácter permanente) específicamente útiles para sustituir de forma parcial o total tejidos u órganos lastimados o destruidos y biodegradables (con carácter temporal) con una funcionalidad apropiada durante un tiempo limitado. La selección de los polímeros se basa en las propiedades químicas las cuales deben asemejarse lo más posible a aquellas partes que son de interés reemplazar, es decir, según la aplicación de las propiedades químicas de los polímeros deben ser previamente conocidas (Duffo, 2011).

Los materiales poliméricos ampliamente utilizados, deben su éxito a las enormes posibilidades que presentan en variedad de compuestos como en la posibilidad de fabricarlos de distintas formas con características determinadas y con la facilidad de conformarlos en fibras, tejidos o bloques (Duffo, 2011).

Dentro de la gran familia de polímeros se encuentra los polisiloxanos, también conocidos como siliconas, están constituidas por cadenas alternadas de oxígeno y silicio con grupos orgánicos laterales. Poseen aplicaciones diversas debido a sus propiedades físicas químicas, eléctricas, mecánicas y en biocompatibilidad. Para aplicaciones biomédicas se destaca el polidimetilsiloxano (PDMS) que es termoestable e hidrófobo. Este polímero puede ser entrecruzado de forma que sus propiedades puedan imitar tejidos suaves como implantes mamarios, articulaciones maxilofaciales, marca pasos, entre otros, debido a que sus propiedades mecánicas son menos susceptibles a los cambios de temperatura (Delgado Osorio, y otros, 2017)

Alvarado Santiago en 2009, manifiesta que los dispositivos manufacturados a partir de materiales polímeros son factibles tanto en tiempo y diseño de fabricación como en su bajo costo, uno de los polímeros flexibles más eficaces y de utilidad es el polidimetilsiloxano debido a las esenciales perspectivas de mercado para el futuro cercano y del que más aplicaciones se han reportado en la literatura. Entre las propiedades de la silicona se encuentra su resistencia térmica con un rango de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, repele el agua, tiene una buena resistencia al oxígeno, al ozono y a los rayos ultravioleta. Es un excelente aislante eléctrico, flexible, suave, antiadherente, prácticamente no se desgasta ni exuda, no corroe los materiales, tiene baja toxicidad y reactividad química, además posee una resistencia a la tracción de 70 kgf/cm^2 con una elongación promedio de 400% . A diferencia de otros materiales, la silicona mantiene estos valores aún después de largas exposiciones a temperaturas extremas (Wang, Polydimethylsiloxane Mechanical Properties Measured by Macroscopic Compression and Nanoindentation Techniques, 2011)

En los últimos años, los polímeros flexibles se han vuelto cada vez más importantes para muchas aplicaciones que impactan la vida diaria, incluidos los dispositivos portátiles, pantallas flexibles, y dispositivos para monitorear señales fisiológicas, estas aplicaciones de gama alta suelen requerir el

uso de un elastómero o caucho, como el poli (dimetilsiloxano) reticulado, para impartir flexibilidad y robustez mecánica además de comodidad, (Heonjoo Ha, Jaesung Park, KiRyong Ha, Benny D. Freeman, Christopher J. Ellison 2016)

Camacho A, (2013) Por otra parte menciona que el politetrafluoruro de etileno es un polímero sintético constituido por carbono y flúor, es estable, considerado como uno de los biomateriales más inertes, no se absorbe, no provoca alergias, tiene una respuesta inflamatoria mínima, es hidrófobo, resistente a la tracción y no se modifica por la presencia de infecciones. La molécula de politetrafluoruro de etileno tiene un alto peso molecular y un elevado punto de fusión de 320 °C a 342 °C. Su estructura alineada le permite alcanzar hasta el 90 % de cristalinidad. Dentro de las propiedades mecánicas a temperatura ambiente posee una resistencia a la tracción de 7 a 28 MPa, además por su alta inercia química posee resistencia a ácidos inorgánicos (Guerrero G., 2013).

Los materiales conformados o compuestos resultan de la fusión de dos capas de material polimérico, los más utilizados son el polipropileno (PP), el poliéster (PS) y el politetrafluoruro de etileno (PTFE), en combinación con otros materiales como el titanio, ácidos grasos, omega 3, poliglecoprone 25, polifluoruro de vinilideno (PVDF) y hialuronato, entre otros (Camacho Ramírez, y otros, 2013)

El componente superficial es el refuerzo, confeccionado con politetrafluoruro de etileno, polipropileno o poliéster. El segundo componente es una capa que puede ser de naturaleza química con muy escasa reactividad, compuesta por láminas de colágeno, polietilenglicol, glicerol, ácido hialurónico, carboximetil celulosa, celulosa oxidada regenerada o ácido omega 3, o las de naturaleza física como son polifluoruro de vinilideno (PVDF), silicona polidimetilsiloxano (PDMS), poliuretano (PU), titanio o el propio politetrafluoruro de etileno (Camacho A, 2013).

La incorporación de partículas de politetrafluoro de etileno en la capa principal de polidimetilsiloxano contribuye a la formación de un material compuesto hidrofóbico con ángulos de contacto de 155 – 169 °. Dicho material compuesto puede ser aplicado como revestimiento de dispositivos microelectrónicos además tendrá protección contra la humedad. (Camacho Ramírez, y otros, 2013)

Vallet M. (2003) manifiesta que actualmente más de cincuenta millones de personas en todo el mundo tienen implantado algún tipo de prótesis. Es bien conocido en nuestra sociedad la utilidad y necesidad de todo tipo de implantes; sin embargo, muchos de ellos son diseñados, sintetizados y procesados, con el único fin de tener un aplicación en el campo biomédico, impulsando un gran avance en el campo de los biomateriales (Álvarez L., 2012).

Por esta razón el material compuesto, está orientado para el uso en recubrimientos de prótesis humanas, en los últimos años se sabe que se ha alcanzado un gran desarrollado de sustitutos de piel conocidos en el medio como piel artificial, el primer diseño reportado de piel artificial fue realizado por Yannas y Burke, quienes en la década de 1970, iniciaron con la ardua investigación y experimentación de la piel sintética. El investigador Burke rediseñó la forma de tratar las quemaduras, al extirpar el tejido dañado en lugar de dejarlo en el paciente; esto llevo a la elaboración de una piel sintética llamada Integra Dermal Regeneration Template (Integra ®), se considera como el método precursor de ingeniería tisular para generación de piel artificial (L.G.Wade)

Además según la literatura se han desarrollado grandes investigaciones con respecto a los polímeros en mención, ocupándolos para láminas de pervaporacion de algunos reactivos, asimismo estos polímeros forman parte fundamental para el desarrollo de un sinfín de materiales poliméricos que han sido empleados como revestimientos para dispositivos electrónicos como por ejemplo los

sensores, sin embargo no se lo ha empleado como recubrimiento para prótesis humanas por lo que se pretende conseguir un material con propiedades similares a la piel humana con la finalidad de orientarlos hacia el recubrimiento de prótesis humanas.

1.2. Planteamiento del problema

Los recubrimientos son muy útiles ya que protegen a los objetos e individuos en general de agentes del medio externo, como la humedad y la corrosión, he aquí la necesidad de desarrollar nuevos materiales poliméricos que favorezcan la innovación de recubrimientos en el área biomédica así como en la ingeniería tisular.

Gran parte de la sociedad ha sufrido accidentes dejando como secuela la amputación de una de sus extremidades que con el transcurrir del tiempo dichas partes han sido remplazadas por extremidades protésicas, permitiendo así la intervención de la ingeniería tisular y la biomedicina, mediante la investigación de diferentes métodos y medios para las prótesis en sí y para el desarrollo recubrimientos de las mismas, aspirando ofrecer un aspecto estético aceptable.

Cabe mencionar que una de las áreas más investigadas y de gran auge está relacionada principalmente con recubrimientos o tejidos de piel. Los importantes avances en el desarrollo de sustitutos de piel, hacen énfasis en el estudio de las propiedades mecánicas, propendiendo a imitar la resistencia natural de ciertos tejidos. Debido a que los polímeros son materiales muy versátiles se pueden obtener múltiples configuraciones químicas para compuestos con propiedades sinérgicas.

Por tal razón, la finalidad de este proyecto es desarrollar un material compuesto con base en los polímeros polidimetilsiloxano y politetrafluoruro de etileno y evaluar la propiedad mecánica de

resistencia a la tracción y las propiedades físicas de solubilidad y permeabilidad, de tal manera que el material satisfaga los requerimientos de una prótesis humana, mejorando su apariencia y estética. Adicionalmente, la durabilidad, estabilidad y impermeabilidad al agua contribuirán a satisfacer las necesidades de los seres humanos para mejorar su calidad de vida.

Es importante considerar una adecuada adquisición de los precursores poliméricos (polidimetilsiloxano hidroxilado, politetrafluoruro de etileno, tetraetil ortosilicato y dilaurato de dibutil estaño), haciendo énfasis en las características físico – químicas y las propiedades mecánicas que aporta cada uno de ellos. De este modo el propósito será desarrollar un material compuesto con base en los polímeros polidimetilsiloxano /Politetrafluoruro de etileno para su uso en recubrimientos de prótesis humanas.

1.3. Justificación e importancia

La continua innovación de diferentes tecnologías ha contribuido que gran parte de científicos trabajen en investigaciones con materiales poliméricos en el área biomédica, ingeniería tisular y cosmética experimentando y desarrollando de manera enfática nuevos dispositivos biomédicos, manipulando diferentes materiales poliméricos interviniendo dentro de ellos los recubrimientos de tipo biomédico ya que estos además de proteger de agentes externos como la corrosión, la humedad, también contribuyen a mejorar la apariencia estética de las prótesis humanas, ofreciendo un mejor aspecto físico a personas que llevan consigo una prótesis, además de una estabilidad emocional equilibrada que les permita interactuar con la sociedad.

Vallet M. (2003), indica que más de cincuenta millones de personas en todo el mundo tienen implantado algún tipo de prótesis, este es un hecho conocido en nuestra humanidad, con el transcurrir del tiempo el avance tecnológico con materiales poliméricos y biomateriales han potenciado

investigaciones basados en las propiedades físico-químicas y de biocompatibilidad, fomentado un crecimiento acelerado del diseño, la sintetización y el proceso de; prótesis, implantes, sistemas y aparatos ya sean transitorios o indelebles, con la finalidad de favorecer a la sociedad. A nivel nacional no se dispone de polímeros o precursores para el desarrollo de recubrimientos para prótesis humanas. Además, el costo de adquisición de la misma es alto, por tal razón este proyecto aportará información importante para el desarrollo tecnológico y servicio social.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Desarrollar un material compuesto con base en los polímeros polidimetilsiloxano (PDMS)/Politetrafluoruro de etileno (PTFE) para su uso en recubrimientos de prótesis humanas

1.4.2. Objetivo Específicos

- Identificar una combinación de dos factores: factor 1 (proporción másica de la capa principal) y factor 2 (proporción másica del material compuesto) que permita obtener las propiedades físicas y mecánicas requeridas para prótesis humanas.
- Desarrollar una metodología para elaborar láminas homogéneas del material compuesto que garantice la repetibilidad de los ensayos mecánicos de acuerdo a las especificaciones de la normativa ASTM – D638 “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”.
- Evaluar la influencia de la proporción másica de la capa principal (PDMS: TEOS:DBTL) y la proporción másica del material compuesto (PDMS:PTFE) en las propiedades de

resistencia a la tracción, solubilidad y permeabilidad del material compuesto mediante ensayos mecánicos y físicos respectivamente.

- Determinar la factibilidad de elaborar recubrimientos para prótesis humanas mediante un estudio económico del producto obtenido.

1.5. Hipótesis

A partir de los polímeros polidmetilsiloxano/politetrafluoruro de etileno se desarrollara un material compuesto para su uso en recubrimientos de prótesis humanas.

1.6. Variable Dependiente

Resistencia a la tracción, solubilidad y permeabilidad.

1.7. Variable Independiente

Proporción másica de la capa principal: PDMS:TEOS:DBTL

Proporción másica del material compuesto: PDMS:PTFE

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Introducción a la síntesis de polímeros

Hoy por hoy resultaría difícil imaginar que alguno de los sectores de nuestra vida diaria, de la economía o de la técnica, pudiera prescindir de los polímeros sintéticos. Sólo basta con observar nuestro alrededor y analizar cuántos objetos son fabricados a partir de polímeros, pues estos constituyen la base para la fabricación de diversos materiales teniendo así, un sinnúmero de aplicaciones en diversas áreas. Generando una enorme importancia que se refleja en la innovación tecnológica, puesto que las investigaciones científicas han estudiado profundamente a los polímeros y dependiendo de la estructura han desarrollado numerosos e innovadores polímeros sintetizados que sin lugar a duda son de gran utilidad y están acordes a las necesidades actuales de la humanidad, pues son los más utilizados en casi todos los sectores industriales como consecuencia de las buenas propiedades que poseen.

2.1.1. Polímero

El término polímero descende de las palabras griegas poly y mers que significan muchas partes, son productos químicos que están formados por macromoléculas construidas a partir de la unión o enlace de un gran número de moléculas pequeñas (molécula individual) nombradas monómeros y las reacciones a través de las cuales se combinan son conocidas como polimerización (Askeland, 1998). La unión de todas estas pequeñas moléculas dan lugar a una estructura de constitución

repetitiva en el polímero y la unidad que se repite regularmente a lo largo de toda la molécula, se conoce con el nombre de unidad monomérica, en un determinado (ver figura 1), si todas las unidades estructurales son idénticas este se llama homopolímero, pero si este procede de dos o más monómeros recibe el nombre de copolímero. (Carrasquero F., 2004).

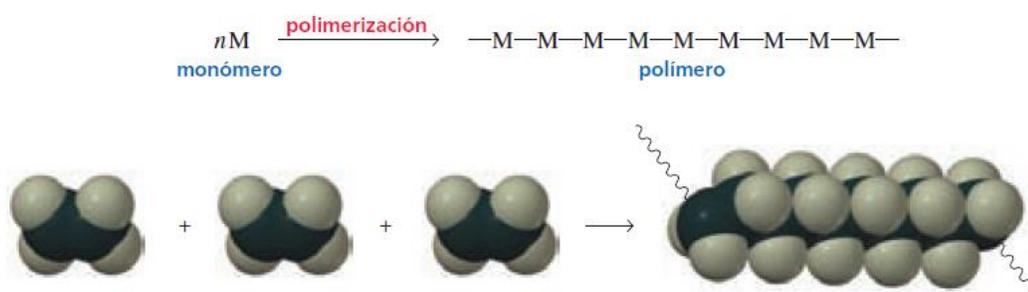


Figura 1. Esquema de la formación del polímero.

Fuente: (Yurkanis, 2008)

En una macromolécula de polímero pueden existir un sinnúmero de monómeros enlazados, están formados principalmente por estructuras de carbón y por tanto se consideran compuestos orgánicos, además las largas cadenas polimerizadas se complementan con otros elementos en menor proporción como hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, cloro, azufre, fósforo, etc. (Askeland, 1998). Aunque la mayoría de los polímeros son orgánicos con un esqueleto basado fundamentalmente en átomos de carbono, los hay también inorgánicos basados en átomos de silicio como es el caso de las Siliconas que serán descritas posteriormente. (García, 2009)

2.1.2. Historia

Los polímeros naturales fueron utilizados desde sus inicios por la humanidad, para beneficiar sus necesidades mediante la manipulación aprendieron a hilar fibras naturales formando hebras y a tejer los hilos para fabricar prendas de vestir, además en épocas precolombinas en algunos lugares ocupaban polímeros para confeccionar pelotas para jugar. (Yurkanis, P. 2008) Según transcurría el tiempo en 1839 el Norteamericano Charles Goodyear accidentalmente descubrió como convertir la savia polimérica pegajosa del árbol de caucho en un material resistente y elástico mediante la vulcanización con azufre (Wade Leroy, 2011) por otro lado en 1846 Christian Schönbein descubrió la nitrocelulosa, el mismo año se descubrió el colodión, material a partir del cual se pudo obtener el celuloide contribuyendo así la fabricación de peines, películas fotográficas, bolas de billar (Carrasquero F., 2004).

El conocimiento científico siguió avanzando en 1907 Leo Baekeland descubre una resina termoestable producida a partir de la combinación de fenol y formaldehído a la que denominó bakelita, la superación de este científico dio hincapié al desarrollo de nuevos y distintos materiales, pese a esta investigación no se establecía una definición clara sobre los polímeros ya que conceptuaban que los polímeros eran uniones atómicas de diminutas moléculas. Posterior a estas indagaciones en 1920 el investigador Staudinger define el termino polímero como una cadena macromolecular constituida por enlaces covalentes, ganado como merito a su investigación el premio Nobel en 1953. (Carrasquero F., 2004).

El químico Suizo Jacques Edwin Brandenberger en 1908 a partir de celulosa de madera inventó el celofán elaborado con la finalidad de aplicarlo como recubrimiento para que las telas sean resistentes a las manchas, más tarde y según diversas investigaciones y configuraciones, el científico Brandenberger comenzó la producción de celofán en 1920 para su comercialización con

fines industriales. (Reynoso, 2018). Como la innovación tecnológica seguía creciendo el químico de Du Pont Wallace Hume Carothers y su equipo de investigación en 1934, descubrieron una fibra sintética fuerte y flexible, la cual fue registrada como nylon, además este equipo de trabajo utilizó como base la investigación química del profesor Julius Aloysius (Arthur) Nieuwland para desarrollar el neopreno, a partir de estas invenciones la perseverancia de los investigadores dieron resultados óptimos ya que plantearon procesos de síntesis de otros materiales poliméricos. Por otra parte una de las más significativas investigaciones dejó el científico Roy J. Plunkett, ya que en 1938 descubrió accidental el politetrafluoroetileno mejor conocido como Teflon® el cual fue patentado en 1941 y la marca Teflon® quedó registrada en 1945 contribuyendo de esta manera la comodidad y el bienestar de la especie humana. (Todo en polímeros, 2018)

En 1955 gracias a los trabajos combinados de Karl Ziegler y Giulio Natta se obtuvo un polipropileno cristalino y surgió el concepto de estereo regularidad que les valió la concesión del premio Nobel en 1974 por su laborioso trabajo. (Carrasquero F., 2004). Siendo estos los descubrimientos más importantes y representativos de los polímeros se manifiesta que a partir de aquello se realizaron diferentes investigaciones explotando recursos útiles para la creación de nuevos materiales poliméricos, ocupando todos los campos de investigación, sustituyendo materiales como la madera, los metales y los materiales cerámicos por los polímeros y sus combinaciones debido a la versatilidad que presentan los mismos y de esta manera obtener múltiples configuraciones químicas para generar materiales con propiedades sinérgicas. (Delgado Osorio, y otros, 2017)

Según el análisis de la historia se considera que nos encontramos con un avance imponente en la actualidad ya que se ha promovido investigaciones para lograr el desarrollado de nuevas técnicas experimentales y fomentar de esta manera nuevos conocimientos siendo estos aportes elementales

para la ciencia y la tecnología brindando beneficios favorables para la vida, además de impulsar el progreso de la ciencia de los materiales. Las distintas necesidades del mercado han originado una gran variedad de materiales poliméricos que son de gran consumo (polietileno, polipropileno, poliestireno, cloruro de polivinilo, etc.) y productos de alto rendimiento (poliamida, poliéster, politetrafluoro etileno, polisulfona, polietercetona, etc.) (Beltran & Marcilla, 2012).

Teniendo en cuenta este antecedente y que actualmente los polímeros han tenido una imagen negativa puesto que son asociados con contaminación al medio es fundamental conocer el uso y aplicaciones de los materiales poliméricos debido a su crecimiento diario no solo por los beneficios que nos brindan sino también por los inconvenientes que originan debido a su acumulación cuando ya no nos son útiles.

2.1.3. Clasificación

Según el origen se clasifican en: polímeros naturales (lana, seda, madera, algodón,) y polímeros sintéticos (polietileno, polipropileno, etc.) Los polímeros naturales denominados biopolímeros se producen a partir de fibras de algodón o madera, por otra parte las largas cadenas repetitivas constituidas por monómeros, que suelen pertenecer al grupo de polímeros sintéticos, se fabrican a partir de materias primas petroquímicas (petróleo crudo o gas).

2.1.4. Polímeros Naturales

Como su nombre lo señala son polímeros naturales o biopolímeros pues son producidos por la naturaleza, presentan estructuras complejas y son polimerizados en los seres vivos, ya sean animales, vegetaciones, microorganismos u hongos, y posteriormente aislados para su uso. Este tipo de polímeros y sus derivados tienen la ventaja de poseer alta biocompatibilidad, buenas

interacciones de huésped in vivo, funcionalidad y durabilidad: estos polímeros pueden clasificarse en proteínas, poliésteres naturales y polisacáridos (Osorio D. Andres, 2017)

Sin embargo las propiedades que brindaban estos polímeros no satisfacían sus necesidades, por ello el hombre puso empeño despertando así su interés de investigación encontrando de esta manera polímeros naturales como el ámbar, el gas natural, la goma y la gutapercha. (Garcia, 2009)

2.1.4. Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos son generados en laboratorios o industrias mediante procesos de polimerización mismos que están controlados por el ser humano, debido a su versatilidad tienen múltiples aplicaciones, regularmente poseen de uno a tres diferentes unidades monoméricas en su larga cadena de polimerización y sus innumerables propiedades físicas, químicas y mecánicas hacen que se integren el campo de la manufactura dando como resultado asombrosas aplicaciones. (Beltras & Marcilla, 2012)

Como se mencionó anteriormente su exuberancia hace que se lo ocupe en diversas áreas de investigación, el objetivo propuesto en esta investigación fue desarrollar un material compuesto a base de polímeros por lo que nos integremos dentro del área de las aplicaciones biomédicas, en esta área los polímeros han tenido una acogida significativa contribuyendo con el desarrollado lentes de contacto, vehículos farmacéuticos, materiales odontológicos, sustratos para ingeniería de tejidos, revestimientos, entre otros. No obstante es necesario mencionar que si bien es cierto que los polímeros aportan inmejorablemente con la creación de nuevos dispositivos se les considera como contaminantes debido a su tiempo de degradación por tanto los investigadores Kumbar y Hollinger mencionan que se deben realizar avances tecnológicos sobre polímeros que puedan

descomponerse con el transcurso del tiempo in vivo y en el medio, es decir que se debe crear polímeros sintéticos biodegradables y/o bioadsorbibles dentro de los cuales están los poliacrilatos, polisiloxanos, poliamidas, policarbonatos, poliésteres, poliuretanos, poliestirenos, polipéptidos sintéticos, poli alquenos y polioles (Carrasquero F., 2004) por lo que en nuestro proyecto se trabajó con polidimetilsiloxano y politetrafluoruro de etileno.

- **Clasificación de los polímeros sintéticos**

Debido a la enorme familia que comprenden los polímeros se los clasifica según los siguientes parámetros:

- La estructura
- El tipo de monómero
- El tamaño
- La tacticidad
- El método de polimerización
- El comportamiento frente a la temperatura

Cabe mencionar que la clasificación de polímeros sintéticos abarca una gran cantidad de tópicos específicos e importantes, no obstante se hace énfasis en la clasificación según el método de polimerización y según la estructura con la finalidad de familiarizar los fundamentos que rigen el comportamiento de macromoléculas que forman las cadenas de los polímeros.

Existen diversos procesos para unir moléculas pequeñas con otras para formar moléculas grandes. La polimerización puede efectuarse por distintos métodos a saber:

La polimerización por adición de moléculas pequeñas de un mismo tipo unas a otras por apertura del doble enlace sin eliminación de ninguna parte de la molécula (polimerización de tipo vinilo). Adición de pequeñas moléculas de un mismo tipo unas a otras por apertura de un anillo sin eliminación de ninguna parte de la molécula (polimerización tipo epóxido). Adición de pequeñas moléculas de un mismo tipo unas a otras por apertura de un doble enlace con eliminación de una parte de la molécula (polimerización alifática del tipo diazo.).

Polimerización por condensación, formación de poliésteres, poliamidas, poliéteres, polianhidros, etc., por eliminación de agua o alcoholes, con moléculas bifuncionales, como ácidos o glicoles, diaminas, diésteres entre otros (polimerización del tipo poliésteres y poliamidas.).

2.1.5. Propiedades generales de los polímeros

En general los polímeros son muy versátiles siendo una de las propiedades más básicas su flexibilidad, por lo tanto se puede realizar diferentes combinaciones estudiando sus propiedades de acuerdo a la aplicación que se lo vaya a emplear. Además debido a sus propiedades físicas, químicas y mecánica, destacan su comportamiento como aislantes, resistencia a la corrosión (Askeland Donal, 1985), las propiedades más importantes son:

- Rígidos o maleables
- Cristalinos u opacos
- Duros o blandos
- Resistentes al medio externo o biodegradables
- Invulnerables a temperaturas bajas y altas

2.1.6. Organosiloxano - Siliconas

Los Organosiloxano conocidos comúnmente como siliconas son polímeros que en su estructura poseen átomos de silicio y oxígeno (ver figura1), por esta razón son muy flexibles además su biocompatibilidad está formulada por completo con la FDA Biocompatibility Guidelines (food and drug administration). La producción está fundamentada en polimerización por adición de radicales y debido a su estructura se consiguen materiales técnicos y estéticos difíciles de originar. (Juárez David., 2013)

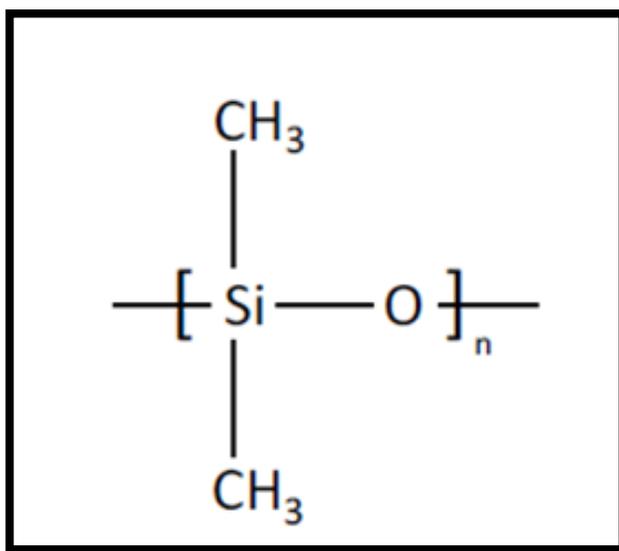
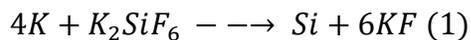


Figura 2. Estructura monomérica de la silicona.

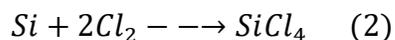
Fuente. (Juarez, 2013)

2.1.7. Origen

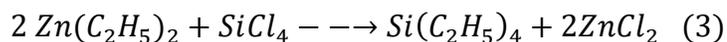
En 1824 el investigador Berzelius descubrió el silicio mediante la reducción de fluorosilicato de potasio (ver reacción 1).



Al reaccionar el silicio con cloro da como producto un compuesto volátil llamado tetraclorosilano (ver reacción 2).



Más tarde en 1863 los químicos Friedel y Craft, realizaron la síntesis del primer compuesto orgánico de silicio denominado tetrametilsilano (ver reacción 3).



Posteriormente en 1871, el investigador Ladenburg observó que, el dietildietoxisilano, $(C_2H_5)_2Si(OC_2H_5)_2$ en presencia de un ácido diluido proveía un aceite que se descompone en alta temperatura. Con el avance investigativo el químico Kipping fomentó conocimientos sobre la química organosilícica además de la preparación de varios silanos por medio de las reacciones de Grignard y la producción de moléculas grandes mediante la hidrólisis de los clorosilanos, fortaleciendo posteriormente la naturaleza polimérica de las siliconas por el trabajo de Stock. Obteniendo un resultados significativos en 1940 pues se convirtieron en materiales productivos después de que Hyde of Dow Corning indicó la estabilidad térmica y la alta resistencia eléctrica de las resinas de silicona, y Rochow de General Electric encontró un método directo para preparar siliconas a partir de Si y MeCl. (Colas André, 2005).

a. Propiedades

Una de las propiedades más específicas de la familia de las siliconas es la flexibilidad por esta razón componen buenos elastómeros (ver figura 4), esta propiedad se debe a su estructura ya que permite que su cadena formada por enlaces de un átomo de silicio y los dos de oxígeno se abran y se cierren sin inconvenientes.

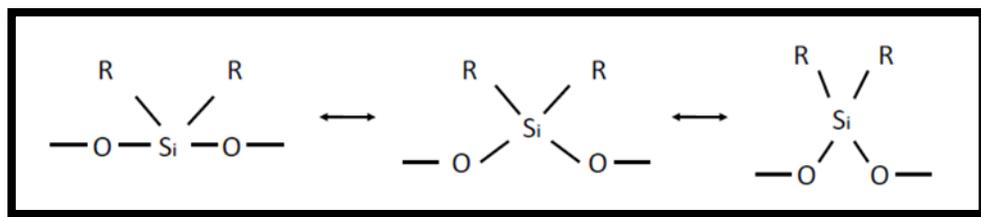


Figura 3. Esquema de la flexibilidad de la silicona.

Fuente. (Juarez, 2013)

Respecto a la resistencia química, la silicona resiste algunos químicos, incluyendo algunos ácidos, oxidantes químicos, amoníaco y alcohol isopropílico. La silicona se hincha cuando se expone a solventes no polares como el benceno y el tolueno, retornando a su forma original cuando el solvente se evapora (Juárez, 2013).

b. Tipos de siliconas

El beneficio de los polímeros es que pueden ser creados para compensar necesidades específicas, por ende es necesario añadir subproductos que atribuyan la formación de nuevos materiales poliméricos con propiedades mejoradas, por lo cual cabe mencionar que las siliconas comprenden una formidable familia de resinas, aceites y gomas aplicables a diferentes áreas de investigación

como por ejemplo en las áreas de biomedicina (destaca el polidimetilsiloxano), ingeniería tisular, cosmetología. En función a la terminación de los extremos de las siliconas se clasificaban en:

- **Polidimetilsiloxano**

Son altamente utilizados especialmente para la fabricación de compuestos líquidos, de recubrimiento y de calafateado, poseen la terminación de grupos hidroxilo. Los grupos terminales de estos polímeros son vulcanizados a temperatura ambiente con agentes de curado polifuncionales de bajo peso molecular.

- **Polimetilvinilsiloxanos**

Constituyen el grupo más común dentro de la familia de las siliconas ya que contienen un 0,2% de peso molecular de grupos vinilo, generando la mayoría de los compuestos de caucho para su posterior extrusión y moldeo. Se vulcanizan mediante calor con peróxidos orgánicos, originando materiales permanentes con baja deformación permanente.

- **Polimetilfenilvinilsiloxanos**

Forman productos aplicables a bajas temperatura, los polímeros con proporciones altas de terminaciones fenilo se emplean para vulcanizados resistentes a las radiaciones. Son destinados para la producción de compuestos invulnerables a disolventes y combustibles para proyectiles. Además se aprovechan sus propiedades para el diseño de para materiales adhesivos y aislantes eléctricos autoadhesivos.

Alvarado Santiago en 2009, manifiesta que los dispositivos manufacturados a partir de materiales polímeros son factibles tanto en tiempo y diseño de fabricación como en su bajo costo,

uno de los polímeros flexibles más eficaces y de utilidad es el polidimetilsiloxano debido a las esenciales perspectivas de mercado para el futuro cercano y del que más aplicaciones se han reportado en la literatura, debido a esto según el análisis de la revisión documental bibliográfica se consideró al Polidimetilsiloxano como materia prima básica para el desarrollo de una de las capas del material compuesto.

2.1.8. Polidimetilsiloxano

El polidimetilsiloxano es el polímero inorgánico, su cadena principal está formado por oxígeno y silicio (- Si- O-), casualmente lo citan como dimeticona y pertenece a un grupo de la familia de las siliconas. (Wong Zhixin., 2011.) La fórmula química del polidimetilsiloxano es $(\text{H}_3\text{C})_3\text{SiO}[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, donde n es el número de unidades de monómero $[\text{SiO}(\text{CH}_3)_2]$ que se repiten, la síntesis industrial se inicia a partir de los reactivos dimetilclorosilano y agua, su estructura se muestra a continuación (ver figura 3). El material formado por polímero de Polidimetilxiloxano se forma mediante la reticulación de estas cadenas de polímero. (Wong Zhixin., 2011).

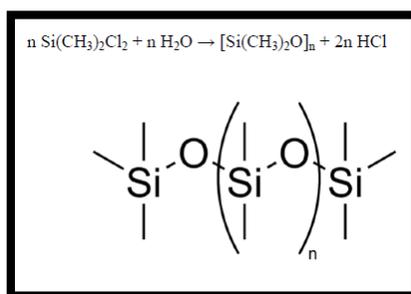


Figura 4. Estructura química de Polidimetilsiloxano.

Fuente: (Wang , Volinsky, & Gallant, 2014)

a. Propiedades y aplicaciones

El Polidimetilsiloxano es un polímero extremadamente versátil (Duffo Gustavo, 2011), es ópticamente transparente y generalmente se considera inerte, no tóxico y no inflamable (Todo Polímeros, 2017). Debido a sus propiedades físico-químicas, eléctricas, mecánicas (elastómero) y de biocompatibilidad producen siliconas elastómeras hidrófobas y bioestables sin necesidad de plastificantes (Maitz Manfred. 2015). Es inodoro, no permite el crecimiento bacteriano, es resistente a la corrosión de la sangre y permeable al oxígeno. (Wong Zhixin., 2011) Este polímero puede ser entrecruzado de tal forma que sus propiedades puedan imitar tejidos suaves como implantes mamarios, maxilofaciales, catéteres y articulaciones, bombas de sangre y marcapasos. (Chamorro, 2011). También se encuentra en los champús (la dimeticona hace que el cabello se vea brillante y resbaladizo), enmasillado, lubricante, aceites y baldosas resistentes al calor. (Todo en Polímeros, 2017).

Además su alta permeabilidad a los gases soporta la difusión de gases como el oxígeno y el dióxido de carbono, sin embargo su hidrofobicidad no permite la adhesión celular por lo que se han utilizado diferentes enfoques, como el tratamiento con plasma y el tratamiento con láser, para modificar la superficie de la silicona y mejorar su capacidad de humectación y su propiedad de adhesivo celular no obstante, estas técnicas no forman una propiedad de adhesivo celular estable debido a la reorganización de la superficie por esta razón, las proteínas celulares-adhesivas como la fibronectina, la laminina y el colágeno se han revestido sobre la superficie polidimetilsiloxano para una propiedad celular-adhesiva de larga duración (Anuradha Subramaniam & Swaminathan Sethuraman.,2014).

b. Resinas de Polidimetilsiloxano

Para formar resinas de polidimetilsiloxano resistentes, reaccionan entre sí, la silicona, un agente reticulante y un catalizador a temperatura ambiente o con la intervención de calor (Todo en polímeros, 2017) esto se da debido a la intromisión de los precursores de silano mismos que contribuyen con la formación de ramificaciones o sitios de entrecruzamiento en la cadena del polímero, cabe mencionar que la diversificación de la densidad del precursor (reticulante) en la red de polímeros permite configurar las propiedades mecánicas en un rango similar al de los tejidos vivos. (Wong Zhixin. 200). Debido a esta reticulacion exhiben una superficie hidrofóbica con un aspecto metálico y brillante, esto hace que los solventes como el agua no puedan humedecer la superficie del polidimetilsiloxano (Reynoso, 2018)

2.1.9. Fluoropolímeros

Son polímeros formados por carbón y flúor son conocidos también como fluoroplásticos, conservan su estabilidad frente al entorno químico ya que son muy inertes. Además los fluoropolímeros parecen ser muy intrigantes debido a sus propiedades de inercia a la mayoría de los solventes y productos químicos.

2.1.10. Politetrafluoruro de etileno

Polímero sintético conocido comercialmente como Teflón®, es considerado como uno de los materiales más inertes y biocompatibles, su cadena se encuentra formada por etileno con enlaces covalentes (Maitz Manfred., 2015) Posee un estructura similar al del polietileno pero sus átomos de hidrógeno son sustituidos por átomos flúor (ver figura 1). (Guerrero G., 2013)

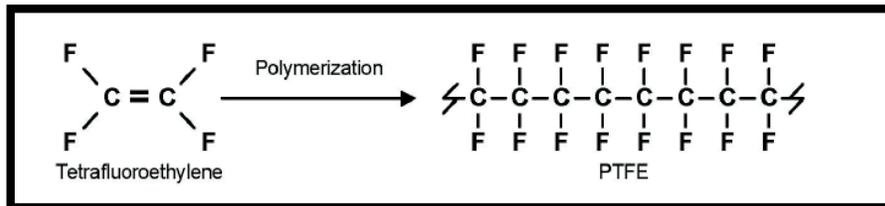


Figura 5. Formación del Politetrafluoruro de etileno.

Fuente. (Duffo, 2011)

La cualidad más cualificada de este polímero es su resistencia debido a los enlaces entre C-C y C-F que poseen, además poseen una alta cristalinidad y producen una inercia y estabilidad química debido a su estructura lineal, además no se disuelve en ningún solvente, el flúor es el responsable de su bajísima energía superficial y su bajo coeficiente de fricción. (Guerrero G., 2013).

Actualmente existen dos variantes:

- El politetrafluoruro de etileno expandido (PTFE-e)

Conocido comercialmente con los nombres, Gore-Tex® Mycromesh, Gore-Tex® Dual Mesh, Gore-Tex® Mycromesh, posee un tamaño de poro de 20 μ de diámetro lo que imposibilita el ingreso de bacterias (Camacho Ramírez, y otros, 2013).

- El politetrafluoruro de etileno condensado (PTFE-c)

Destacado comercialmente por la denominación (Omyra Mesh®), de estructura mono laminar macroporosa, el tamaño de su poro es mayor a 2000 μ lo que evita el desarrollo bacterias (Camacho Ramírez, y otros, 2013).

a. Descubrimiento

El politetrafluoruro de etileno fue descubierto accidentalmente por el químico Roy J. Plunkett en 1938, cuando el desarrollaba un nuevo refrigerante de cloro-fluoro-carbono para DuPont en Nueva Jersey, el gas de tetrafluoroetileno (TFE) en el contenedor de presión dejó de fluir antes de que el contenedor marcara “vacío”. Fue entonces que Plunkett, curioso, separó el contenedor y al abrirlo encontró un material blanco con consistencia de cera y extrañamente resbaladizo. Según sus estudios demostró que el TFE se polimerizó con el hierro del contenedor, el cual funcionó como catalizador a alta presión, posteriormente el politetrafluoruro de etileno se patentó en 1941 y la marca Teflon® quedó registrada en 1945. (Reynoso, 2018)

b. Propiedades y Aplicaciones

Este polímero es altamente hidrófobo (repelle el agua), debido a su baja energía superficial (superficie muy hidrofóbica), no degradable (Maitz Manfred., 2015), posee una gran estabilidad ante solventes, ácidos y bases, agentes oxidantes y radiación (Silva R. & Nakamatsu J., 2000). Es biocompatible, también tiene un alto peso molecular y un elevado punto de fusión entre 320 °C a 342 °C. Químicamente y térmicamente considerado como estable ya que es inerte, por ello, no se absorbe, no provoca alergias, tiene una respuesta inflamatoria mínima, resistente a la tracción, posee un módulo de elasticidad bajo. (Guerrero G., 2013). Con respecto a la permeabilidad se sabe que los gases y vapores se difunden a través del mismo de forma más lenta que en otros polímeros. El mayor grado de cristalinidad influye de forma negativa pues disminuye la tasa de permeabilidad, además la permeabilidad aumenta con la temperatura. En cualquier caso la “hinchazón” de las resinas y recubrimientos de PTFE es muy baja por fenómenos de permeabilidad (Drobny, 2005).

Estas excelentes propiedades permiten que se lo aplique en el desarrollo de materiales para injertos vasculares artificiales, catéter y suturas. Se aplica principalmente como injerto vascular. (Maitz Manfred., 2015)

2.1.11. Reticulación

La reticulación es un enlace cruzado de una cadena polimérica a otra, es decir que se refiere principalmente al uso de enlaces cruzados para promover una diferencia en las propiedades físicas de los polímeros (Gordillo J., 2017).

Cuando se promueve el enlace de entrecruzamiento los polímeros disipan la capacidad de movimiento es decir que un líquido mediante su reticulación puede convertirse en sólido o gel, esto ocurre básicamente porque toda la masa del polímero ha sido ostentada al procedimiento de reticulación originando de esta manera la transformación del polímero generando mejores propiedades mecánicas. Teniendo en cuenta la densidad del reticulante el entrecruzamiento con bajas densidades reducen las viscosidades de las masas del polímero, el entrecruzamiento con densidades intermedias transforman los polímeros ahulados en materiales que tienen propiedades elastoméricas y potencialmente alta resistencia en cambio el entrecruzamiento de polímeros con altas densidades pueden hacer que los materiales se vuelvan muy rígidos. (Todo en Polímeros, 2018)

Los enlaces cruzados pueden ser formados por reacciones químicas que se inician por calor, presión, cambio de pH o radiación. Por ejemplo, la mezcla de una resina no polimerizada o parcialmente polimerizada con productos químicos específicos llamados reactivos de reticulación da como resultado una reacción química que forma enlaces cruzados. La reticulación también

puede ser inducida en materiales que son normalmente termoplásticos a través de la exposición a una fuente de radiación, tal como exposición a un haz de electrones, radiación gamma o luz UV. Por ejemplo, el procesamiento de haz de electrones se utiliza para reticular polietileno. (Reynoso, 2018)

La reticulación se ilustra esquemáticamente en la Figura 6, los enlaces de los reticulados son, como los enlaces en la cadena de polímeros, covalentes. Estos fuertes de los eslabones cruzados tienen el efecto de unir las cadenas. Restringiendo el movimiento de las cadenas de polímeros y, por lo tanto, aumenta la temperatura de transición vítrea por encima de la temperatura ambiente. En consecuencia, los termoestables son frágiles a temperatura ambiente y tienen valores de resistencia a la fractura bajos, de típicamente 0,5 a 1,0 MPa. Además, debido a los enlaces cruzados, los termoestables no pueden ser remodelados por el recalentamiento: los termoestables sólo se degradan al recalentar, y en algunos casos puede arder, pero no se ablandan lo suficiente para la remodelación.

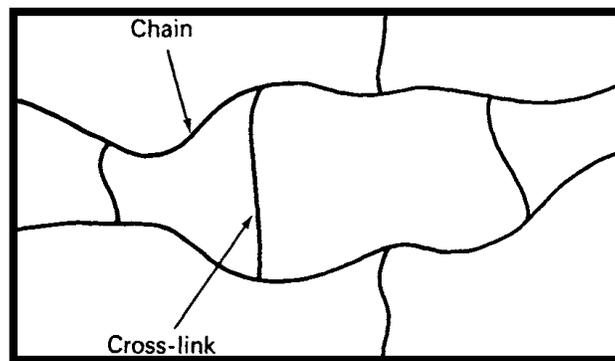


Figura 6. Estructura reticulada.

Fuente. (L.G.Wade)

Por otra parte, la presencia de los eslabones cruzados aporta muchas ventajas, como lo demuestran los datos sobre la propiedad presentados en el cuadro 5.1. La rigidez aumenta a medida que la débil unión de van der Waals entre las cadenas de polímeros es reemplazada por los fuertes enlaces cruzados. Además, los termoestables pueden utilizarse a temperaturas más altas, ya que tienen temperaturas de ablandamiento más altas y mejores propiedades de fluencia que los termoplásticos. Finalmente, son más resistentes al ataque químico que la mayoría de los termoplásticos.

a. Agente reticulante – Ortosilicato de tetraetilo

Ortosilicato de tetraetilo (TEOS) es un líquido incoloro, insoluble en agua con un contenido de sílice del 28,8 %, y un punto de ebullición de 168 °C, es el principal material precursor para las síntesis de zeolitas y dióxido de silicio, que se utilizan en la industria de los semiconductores. Se usa ampliamente como agentes de enlace cruzado en polímeros de silicio y en preparaciones de aerogeles, se degrada en el agua, se debe mantener el recipiente bien cerrado en un lugar seco y bien ventilado (Alfa, 2018)

2.1.12. Curado

Curado es un término en química de polímeros e ingeniería de procesos que se refiere al endurecimiento o endurecimiento de un material polimérico mediante la reticulación de cadenas de polímeros, provocada por haces de electrones, calor o aditivos químicos. El curado implica la aplicación de calor y presión o la adición de un catalizador conocido como agente de curado o endurecedor.

a. Agente de curado - Dilaurato de dibutil estaño

El dilaurato de di butilestaño (DBTL) se utiliza como catalizador para la producción de poliuretanos así como para las reacciones de transesterificación. Está involucrado en la vulcanización de siliconas y actúa como estabilizante en el cloruro de polivinilo (PVC). Interviene como inhibidor de herrumbre para poliuretanos, polioles, siliconas y como aditivo de combustible, además es incompatible con fuertes agentes oxidantes y bases fuertes (Alfa Aesar, 2018).

2.2.Métodos de preparación de láminas de pdms/ptfe

A fin de obtener nuevos materiales se ha desarrollado combinaciones entre polímeros mediante la modificación de sus propiedades con el incremento de aditivos, pigmento, rellenos de partículas, agentes químicos, entre otros, en la figura 7 se ilustra un mapa conceptual donde expone el tipo de materiales que se puede obtener en función de la técnica de su preparación.

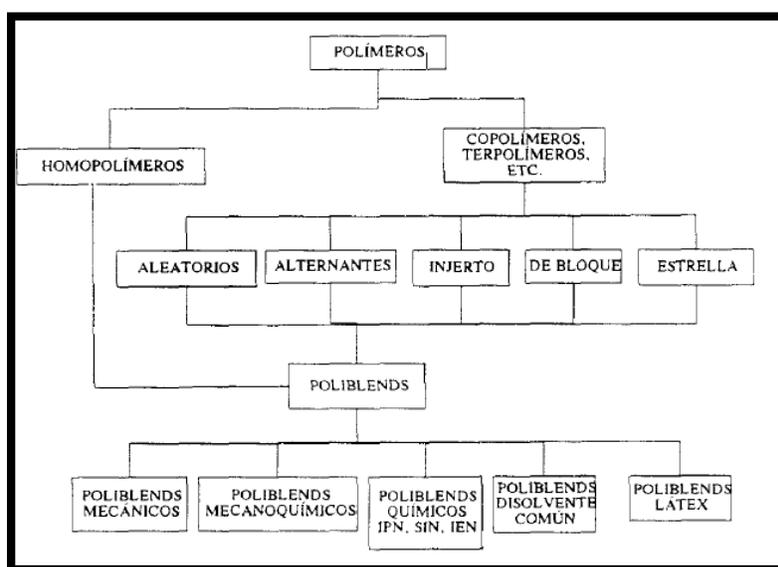


Figura 7. Clasificación de los polímeros en función de la técnica de preparación.

Como se puede observar en la figura se puede preparar por medio de Mezcla polimérica mecánica, mecano química y química. La mezcla polimérica mecánica trabaja con los polímeros en estado fundido es decir que tiene que der directamente con la temperatura durante el proceso, por la razón consideran tanto la temperatura de transición vítrea (t_g) de cada polímero debido a que la mezcla sería amorfa y su temperatura de fusión (T_m) pues su mezcla resulta cristalina. La mezcla mecánica se basa se promueve debido a las cizalladura lo que inicia una degradación generando radicales libres que reaccionan ante la presencia de otros polímeros debido a su estructura, por otra parte el método químico se basa en al polimerización in situ y el resultado es la red polimérica de entrecruzamiento interpenetrada de polímeros que poseen estructura diferente dentro de los cuales se encuentran las redes de polímeros interpenetrada (IPN), redes de polímeros simultáneos (SIN) y redes de eletomericas interpenetradas (IEN) (Luengo G, 1999).

(Qian-Zhi , y otros, 2015) Realizan una membrana compuesta de láminas planas PDMS mediante la técnica de colada en solución dicha solución se preparó disolviendo PDMS, silicato de etilo reticulado y el agente de curado dilaurato de dibutilestano en n-heptano la relación de masa era PDMS:TEOS:DBTL (10:1:0,5) y se agitó magnéticamente durante unas 3 horas. Para preparar las membranas de PTFE-PDMS, diferentes cantidades de partículas de PTFE secas se dispersaron en la anterior solución de colada PDMS bajo agitación durante 3h y las membranas compuestas de PTFE-PDMS con diferentes contenidos de PTFE (0 % en peso de PTFE-PDMS, 10 % en peso de PTFE) PTFE-PDMS, 20 % en peso PTFE-PDMS, 30 % en peso PTFE-PDMS, y 40 % en peso de PTFE-PDMS, según el PTFE). Este material compuesto es sometido pruebas de solubilidad en acetona durante 48 horas.

(Zhang, wei, Yang , & Zhong-qi , 2010) Ejecutan la preparación de la membrana con PDMS, el agente reticulante TEOS y el dilaurato de dibutilestano (mezcla), de acuerdo con los siguientes criterios una relación de peso de 100/10/2 en n-heptano. Antes del recubrimiento, la membrana de PTFE fue colocada y sobre la superficie de la placa de plexiglás (polimetilmetacrilato), luego la solución de PDMS fue vertida sobre la superficie de la placa de plexiglás A la superficie rápidamente. El sistema de membrana compuesta se mantuvo a temperatura ambiente durante 48 h para completar la reacción de reticulación. Como la membrana de PTFE era muy delgada, la solución de PDMS penetró en la membrana y se integró con la membrana de PTFE. Espesor del material compuesto La membrana preparada para este trabajo fue de aproximadamente 50 μm La figura 1 es fotografías SEM de la membrana compuesta PDMS/PTFE.

2.3.Materiales compuestos

El material compuesto es un material que está formado por dos materiales a menudo de propiedades muy diferentes, combinados de modo tal que se puedan trabajar juntos para dar al compuesto propiedades únicas. Sin embargo, dentro del compuesto se pueden distinguir fácilmente los diferentes materiales, ya que no se disuelven ni se mezclan entre sí.

Un ejemplo típico de material compuesto es el plástico reforzado con fibras. Entre estos el más común es la fibra de vidrio, que está formado por pequeñas fibras de vidrio encapsuladas por medio de una resina de poliéster. Las fibras de vidrio son muy duras, pero al doblarse se quiebran con facilidad, el poliéster es muy flexible y fácil de deformar. Cuando los dos materiales se combinan, el plástico que sostiene a las fibras evita que éstas se doblen y quiebren, mientras que las fibras no permiten que el conjunto se deforme (Duffo, 2011).

Los materiales de matriz más comunes para los compuestos son los poliméricos debido a que las propiedades mecánicas de los polímeros son inadecuadas para muchos propósitos estructurales, en particular, su resistencia y rigidez son bajas en comparación con los metales y la cerámica. Esto significaba que se obtenía un beneficio considerable al reforzar los polímeros, además de que el procesamiento de la matriz de polímeros no necesitan altas presiones y no requieren altas temperaturas. Por estas razones se han desarrollado compuestos de matriz polimérica rápidamente y pronto fueron aceptados para aplicaciones estructurales.

2.3.1. Materiales compuestos naturales

Los compuestos naturales existen tanto en animales como en plantas. La madera es un compuesto - está hecha de larga Fibras de celulosa (un polímero) mantenidas juntas por una sustancia mucho más débil llamada lignina. La celulosa es también se encuentra en el algodón, pero sin la lignina para unirlo es mucho más débil. El hueso en tu cuerpo también es un compuesto. Está hecho de un material duro pero quebradizo llamado hidroxiapatita (que es principalmente fosfato de calcio) y un material suave y flexible llamado colágeno (que es una proteína).

2.4. Ensayos mecánicos

El análisis mecánico permite determinar las propiedades características de un material para establecer el control de la calidad de los mismos para su uso en el diseño y la construcción acorde a la aplicación. Las propiedades mecánicas que adquieren los materiales son fundamentales, ya que al sintetizarlos se crean nuevos materiales y por ende desarrollan nuevas propiedades por tal motivo son capaces de sustituir a otros materiales en varias aplicaciones. Dependiendo la aplicación es necesario fijar si un material es fuerte, rígido, elástico, etc., de modo que soporte una carga o fuerza, expresando como resultado la relación entre la fuerza aplicada y la deformación. (Smith, 1998).

Existen diferentes métodos experimentales para llevar a cabo las pruebas mecánicas de materiales de ingeniería como pruebas de tensión, flexión por compresión o torsión. Una fuente verídica que ostenta métodos experimentales para el desarrollo de las pruebas mecánicas mencionadas es la American Society for Testing and Materials (ASTM), dicha organización establece normativas confiables para materiales, productos, sistemas, y servicios acreditadas por su alta calidad técnica, las normas ASTM desempeñan un importante papel en la infraestructura de la información que orienta el diseño, la fabricación y comercialización en la economía internacional. El ensayo mecánico de tracción se utiliza con frecuencia con el fin de obtener información sobre la resistencia y especificaciones de los materiales.

2.4.1. Ensayo de resistencia a la tracción

El ensayo mecánico de resistencia a la tracción es uno de los más importantes que se realizan sobre cualquier material, ya que representan la capacidad de los materiales a oponerse a un esfuerzo y se define como la máxima carga de tensión por unidad de área que resiste antes de deformarse. La American Society for Testing and Materials establece la normativa ASTM – D638 “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics” para materiales que tengan hasta 14 mm de espesos, además establece rigurosamente las especificaciones del ensayo de tracción, que mide la fuerza requerida para romper un material, las pruebas de tracción producen un diagrama de tensión-deformación, que se utiliza para determinar el módulo de tracción. Los datos proporcionados por dicha prueba se utilizan a menudo para especificar un material, para diseñar piezas que resistan la fuerza de aplicación y como un control de calidad de los materiales (ASTM D638, 2013).

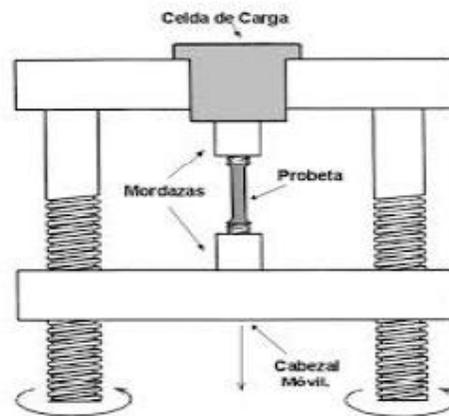


Figura 8. Esquema del ensayo de la resistencia a la tracción.

En la figura 8. se muestra un esquema del ensayo a la tracción, para el desarrollo del mismo es necesario seguir las especificaciones de la normativa ASTM-D638.

2.4.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad conocido también como módulo de Young es la relación de tensión (σ) a la deformación (ϵ) correspondiente por debajo del límite proporcional de un material, expresa la rigidez de un material, es decir mide cuánto se puede extender un material. (ASTM D638, 2013). El límite de esta proporción corresponde al esfuerzo más alto que se puede aplicar sin que la deformación sea permanente (ver figura 9). En la zona plástica se produce una deformación permanente del material. La sección final de la curva se denomina fuerza de tensión máxima o esfuerzo máximo y se atribuye la máxima fuerza que se puede aplicar al material antes de que se produzca la rotura. (Dricoll, 1998)

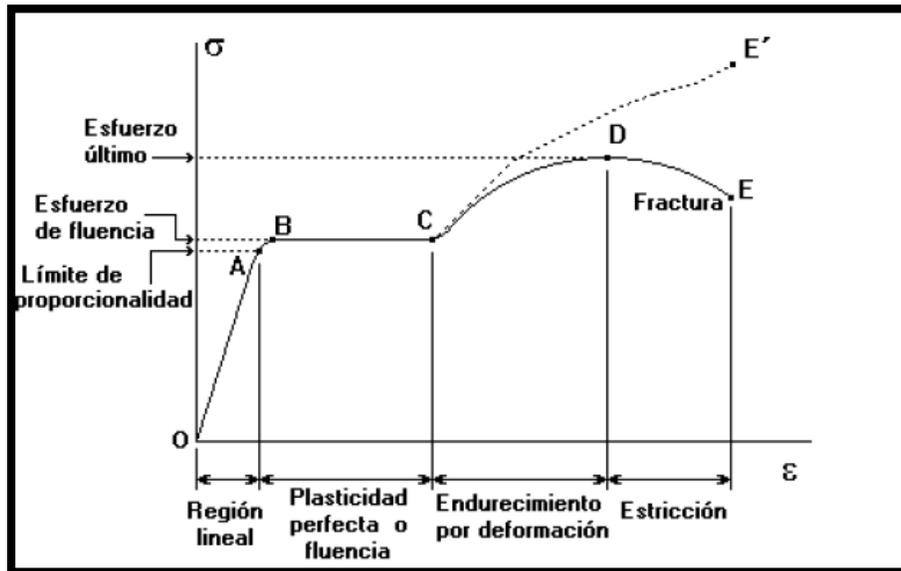


Figura 9. Curva de esfuerzo deformación.

2.5. Ensayos físicos

Al igual que las propiedades mecánicas es importante conocer las propiedades físicas, ya que garantizan que el material actúe como barrera, además los ensayos físicos proporcionan datos que se utilizan a menudo para especificar un material, para diseñar piezas que resistan frente a agentes externos como la corrosión.

2.5.1. Solubilidad

La solubilidad es la resistencia que el material compuesto tiene frente a los agentes químicos, la resistencia frente a los disolventes se define como pruebas de solubilidad y pretende conocer en qué líquidos se produce un proceso de compatibilidad entre el líquido y el polímero. El ensayo físico de solubilidad del líquido en los polímeros se basó en la investigación desarrollada por (Cocchi G, M.G. De Angelis & Doghieri F., 2015) y (Zamudio, Villegas Gasca, Cervantes Jáuregui, & Meléndrez Amavizca, 2015) mediante un método gravimétrico.

La solubilidad de un polímero varía en función de su estructura química y del peso molecular, siendo más fácilmente solubles las fracciones de bajo peso molecular. Por tanto no es extraño que durante un proceso de disolución o de extracción de los aditivos se disuelvan las fracciones más ligeras de polímeros, quedando insolubles las de alto peso molecular. El polímero puede bien disolverse, permanecer inalterado o bien permanecer hinchado formando un gel.

Cuando el polímero permanece inalterado se hace una relación directa con el ángulo de contacto este se refiere al ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido. El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido y las fuerzas cohesivas del líquido. Cuando las fuerzas adhesivas con la superficie del sólido son muy grandes en relación a las fuerzas cohesivas, el ángulo de contacto es menor de 90 grados, teniendo como resultado que el líquido moja la superficie.

Cabe mencionar que la solubilidad está relacionado directamente con el ángulo de contacto por lo que la literatura reporta que en los polímeros, el ángulo de contacto con una superficie limpia esta entre $0 - 75^\circ$, es decir que el aumento de la mojabilidad es menor, como es en el caso del polietrafluoruro de etileno, pasando de 90° grados a $70^\circ-90^\circ$.

2.5.2. Permeabilidad

La permeabilidad es el proceso de transferencia de masa y energía en el cual se produce el paso de moléculas a través del material polimérico. Este proceso por tanto puede ser descrito por dos mecanismos, por un lado el flujo capilar, que implica el paso de moléculas a través de poros o bien defectos propios del material de envase, y el proceso de permeabilidad por difusión.

Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua se define como la tasa del tiempo de vapor de agua que se trasfiere a través de la superficie unitaria del material plano, inducida por la diferencia de presión de vapor unitario entre dos bajo condiciones específicas de temperatura y humedad relativa. La American Society for Testing and Materials establece métodos para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua siendo esta la ASTM E96 “Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials”, dicha normativa tiene como objetivo obtener, por medio de aparatos simples, valores fiables de transferencia de vapor de agua a través de materiales permeables y semipermeables. Estos valores son para el uso en el diseño, fabricación y comercialización de materiales, las condiciones de prueba deben seleccionarse según las circunstancias de uso que más se acerquen a la utilidad, puesto que el vapor de agua es importante como en el papel, material de plástico, lamina, entre otros cabe recalcar que la normativa se encuentra limitada para muestras superiores a 32 mm de espesor.

Dicha normativa propone dos métodos: El método del desecante, donde expone que el espécimen de ensayo se sella a la boca abierta de un plato de ensayo que contiene un desecante y el conjunto se coloca en una atmosfera controlada, los pesajes regulares determinan la velocidad del movimiento del vapor de agua a través de las muestras hacia el desecante, la prueba se pesa periódicamente y el peso se representa gráficamente como una función de tiempo. El método del agua, ostenta que el plato de ensayo contiene agua destilada y los pesajes determinan la velocidad de movimiento del vapor a través de la muestra desde el agua hasta la atmosfera controlada (ASTM E96-94, 2000). La transmisión de vapor de agua se toma como la pendiente de la curva (en la región lineal) dividida por el área de apertura y, para obtener finalmente el valor que representa la

permeabilidad al vapor de agua, es necesario hacer una serie de cálculos, los cuales se detallan en el procesamiento de la información en el diseño metodológico.

a. Técnica de desecante

Se rotula el tubo ensayo en concordación con el número de lámina del material compuesto para colocar Cloruro de calcio (CaCl_2) hasta 6mm por debajo del borde de la boca del tubo, previamente secado a 200 °C hasta que tenga un peso constante, a continuación cubrir la boca del tubo de ensayo con la lámina del material compuesto y sellar con bandas de hule o cinta aislante, material adecuado altamente resistente al vapor de agua, inmediatamente forrar los espacios sobrantes de la película y el tubo con papel aluminio como indica el método. Una vez terminado este proceso se debe registrar el peso inicial y colocar la muestra en una cámara ambiental con una atmosfera controlada, bajo condiciones de humedad relativa (68% - 84%) y temperatura (28 – 35°C). Se debe supervisar la ganancia o pérdida de peso mediante prolongaciones de tiempo, detener el peso de las muestras cuando el peso registrado exceda el 10% del peso inicial del desecante o se alcance un peso constante.

b. Técnica de agua

Llenar el tubo de ensayo con agua destilada hasta un nivel de 6mm por debajo del borde del tubo de ensayo, el aire así permitido tiene una pequeña resistencia al vapor, sin embargo es necesario tener en cuenta esto, con la finalidad de que el agua no toque el espécimen cuando se manipula tubo, puesto que la prueba quedaría anulada, así también se debe tener en cuenta que el nivel del agua no será inferior a 3mm respecto a la superficie del material compuesto (10ml) para mantener una humedad relativa de 100%, posteriormente cubrir la boca del tubo con la muestra del material compuesto e inmediatamente sellar y cubrir los espacios sobrantes con papel aluminio. A continuación registrar el peso inicial de la muestra y colocar en un desecador, cámara con atmosfera

controlada, bajo condiciones de humedad relativa (0%) y temperatura ($25 - 0$ °C) ocupando sílica gel como indiador de humedad. Se debe supervisar la ganancia o pérdida de peso mediante prolongaciones de tiempo durante 3 horas.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

El presente trabajo de titulación se sustenta en el método de investigación bibliográfica/documental en el cual se ha podido verificar que existe información sobre el desarrollo de materiales compuestos en base a polímeros. A través de una revisión bibliográfica se seleccionaron los polímeros adecuados para usarlos como recubrimientos de prótesis humanas. Entre los parámetros evaluados se estudió las propiedades mecánicas y físicas como resistencia a la tracción e hidrofobicidad. Por lo tanto el material compuesto está constituido por politetrafluoruro de etileno que será la capa externa y polidimetilsiloxano la capa interna.

3.2. Materiales, equipo y reactivos

A continuación se desglosa los materiales, equipos y reactivos utilizados para el desarrollo del método experimental del material compuesto.

3.2.1. Materiales

- 10 vasos de precipitación de 100 ml
- 1 Termómetro de mercurio de -10 a -100 ° C
- 1 Agitador magnético (pequeño)
- 3 Varilla de agitación de vidrio
- 1 pipeta volumétrica de 25 ml
- 1 pipeta graduada de 10 ml
- 3 pipeta graduada de 5 ml

- 2 pipeta graduada de 2 ml
- 3 pipeta graduada de 1 ml
- 2 pipeta graduadas de 0.5 ml
- 2 pera de succión
- 1 propipeta
- 1 Mortero
- 1 Reloj de vidrio
- 45 Tubos de ensayo
- 1 Gradilla plástica
- 1 Molde de polimetilmetacrilato (plexiglás)
- Films stretch
- Papel aluminio
- Papel filtro
- Cuchara metálica
- 1 picnómetro de 10 ml
- Toallas absorbentes

3.2.2. Equipos

- Agitador Magnético con Plancha de Calentamiento Análogo, marca Boeco.
- Estufa de secado al vacío 23 L, modelo 14-00308, marca Binder.
- Balanza electrónica digital 750 g, marca Boeco.
- Estufa de secado 115 L, marca Esco.
- Sorbona de Extracción, marca Esco, velocidad de extracción 30 metros por minuto.

3.2.3. Reactivos

- Polidimetilsiloxano hidroxilado terminado, marca Alfa Aesar ® Thermo Fisher Scientific, proveniente de Estados Unidos, 750 ml.
- Politetrafluoruro de etileno, marca Alfa Aesar ® Thermo Fisher Scientific, proveniente de Estados Unidos, 300 gr.
- Tetraetil orto silicato (98%), marca Alfa Aesar ® Thermo Fisher Scientific, proveniente de Estados Unidos, 100 ml.
- Dilaurato de dibutil estaño, marca Alfa Aesar ® Thermo Fisher Scientific, proveniente de Estados Unidos, 25 ml.
- Tolueno, pureza 99.9%, marca Merck KGaA, usado del laboratorio N° 3 Ingeniería y Separación del complejo de Laboratorios de la Carrera de Ingeniería Petroquímica, 175ml.
- Etanol, pureza 96% usado del laboratorio N° 3 Ingeniería y Separación del complejo de Laboratorios de la Carrera de Ingeniería Petroquímica, 900ml.
- Agua destilada, usado del laboratorio N° 3 Ingeniería y Separación del complejo de Laboratorios de la Carrera de Ingeniería Petroquímica 1000ml.

3.3. Parte Experimental

Según el objetivo general expuesto, se pretende desarrollar un material compuesto con base en los polímeros polidimetilsiloxano/politetrafluoruro de etileno para su uso en recubrimientos de prótesis humanas que como se mencionó en la sección anterior es un material integrado por una capa principal y un refuerzo.

Tabla 1

Propiedades físico-químicas de los polímeros experimentados.

Propiedad	Polidimetilsiloxano PDMS	Politetrafluoruro de etileno PTFE
Resistencia Máxima (MPa)	5 – 9	7 – 28
Elasticidad (GPa)	0,36 – 0,87	4,1
Punto de fusión °C	-	320-330
Tamaño de partícula Um	-	15-25
Densidad g/cm ³	0.97	0.3 – 0.5*
Resistencia a la Tracción MPa	0.5 - 9.7*	20 - 35*
Enlongacion %	220-1,600*	300 – 550*
Solubilidad	Tetracloruro de carbono, benceno, cloroformo, dietil éter, tolueno.	perfluorokerosene a 350 °C*
Insoluble	agua y etanol	Agua, alcohol, esteres, cetonas, álcalis. *

Fuente: (Alfa,
2018) *
(Wypych, 2016)

3.4. Diseño experimental

El diseño
experimental
en esta
investigación
es de tipo
factorial
misma que
consiente en
plantear
tratamientos
en función de
sus factores y

Color	Líquido claro	Polvo blanco	niveles. Con el objetivo de
-------	---------------	--------------	-----------------------------

evaluar la influencia de la proporción másica de la capa principal (PDMS: TEOS: DBTL) y la proporción másica del material compuesto (PDMS: PTFE) en las propiedades de resistencia a la tracción, solubilidad y permeabilidad del material compuesto, se desarrolló una metodología para elaborar laminas homogéneas del material compuesto con la ayuda de un diseño experimental 3k factorial como se observa en la tabla 2 y 3 con una adecuada combinación de factores para su posterior análisis mediante ensayos mecánicos y físicos.

Tabla 2

Niveles de las variables independientes.

FACTORES	NIVELES		
	Bajo	Medio	Alto
Variable A			
Matriz PDMS/TEOS/DBTL	33:1:0.5	25:1:0.5	10:1:0.5
proporción másica PDMS	CONTINÚA 		
Variable B			
Compuesto PTFE/PDMS	1:9	1:1	2:3
Proporción másica PTFE			

Tabla 3

Combinación del diseño experimental

N°	Variable A	Variable B
Experimento		
1		1:9

2	33:1:0.5	1:1
3		2:3
4		1:9
5	25:1:0.5	1:1
6		2:3
7		1:9
8	10:1:0.5	1:1
9		2:3

3.5. Procedimiento

El material compuesto se obtuvo a través del siguiente procedimiento:

3.5.1. Acondicionamiento de la materia prima

Secar las partículas de politetrafluoruro de etileno durante 24 horas en la Estufa de secado al vacío 23 L, marca Binder, a 80 °C (De Sun., Bing-Bing Li, & Zhen-Liang Xu., 2013) para eliminar toda la humedad posible, una vez cumplido las 24 horas retirar de la estufa de secado y colorar en el desecador.

3.5.2. Preparación de la capa interna

Considerando la biocompatibilidad de polidimetilsiloxano se procede a construir la capa interna mediante el método químico de colada en solución que consiste en realizar una reacción de entrecruzamiento (reticulación) entre la silicona, agente de reticulación y agente de curado. Se preparó en un vaso de precipitación una solución que contenía polidimetilsiloxano-hidroxi-

terminado, tetraetilortosilicato (98%, Alfa Easer) y dilaurato de dibutil estaño (DBTL) con una relación másica de 33:10:0,5 (ver figura 5) Cabe mencionar que la preparación de la mezcla se debe efectuar en la Sorbona de extracción con una velocidad de extracción de 30 metros por minuto.

A continuación agitar durante 2 horas a temperatura ambiente la mezcla con la ayuda de un agitador magnético y una plancha de calentamiento análoga. Controlando que no se formen burbujas de aire durante el desarrollo de la mezcla, además se debe cubrir la muestra con stretch film para trabajar en un ambiente estéril.

El proceso de entrecruzamiento se forma entre los reactivos ya que los grupos etóxi del tetraetilortosilicato al hidrolizarse a silanoles (Si-OH), estos se sintetizan con los grupos silanoles terminales de la cadena del polidimetilsiloxano hidroxil terminado estableciendo así puntos de entrecruzamiento como se visualiza en la figura 1.

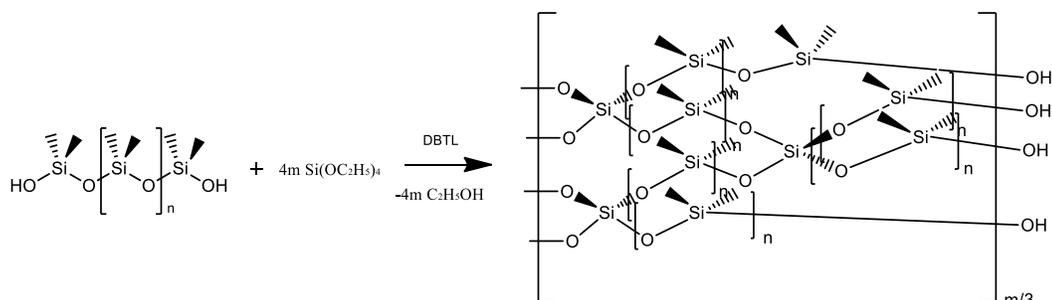


Figura 10. Esquema de reacción de formación de elastómeros.

Fuente: (Zamudio, Villegas Gasca, Cervantes Jáuregui, & Meléndrez Amavizca, 2015)

Dicho proceso debe realizarse para todas las proporciones másicas que se observa en la tabla 2 del diseño experimental, donde se muestra el límite superior e inferior. El límite superior permitirá obtener un compuesto flexible 33:1:0.5 (Wang, Polydimethylsiloxane Mechanical Properties Measured by Macroscopic Compression and Nanoindentation Techniques, 2011) y es importante

no sobrepasar el límite inferior porque nuestro material compuesto puede volverse quebradizo 10:1:0.5 (Zamudio, Villegas Gasca, Cervantes Jáuregui, & Meléndrez Amavizca, 2015).

3.5.3. Preparación del politetrafluoruro de etileno

Pesar y colocar en un vaso de precipitación la cantidad necesaria de las partículas secas de politetrafluoruro de etileno para la formación de la capa externa del material compuesto. Añadir 10 ml de tolueno como solvente y agitar la mezcla con la ayuda de un agitador magnético durante 30 minutos en ambiente estéril y a una temperatura de 18 °C. (Yonghao Xiu, 2006); cabe recalcar que la agitación de la capa interna debe ir a la par con esta solución es decir que las agitaciones deben coincidir en respecto al tiempo de agitación para su posterior coalición.

3.5.4. Preparación del material compuesto

Una vez que la mezcla de PDMS ha cumplido 1 hora y 30 minutos de agitación mezclar con la muestra disuelta de PTFE, empleando un agitador magnético para homogenizar la mezcla hasta completar las dos horas de agitación; luego verter la mezcla sobre el molde de polimetilmetacrilato (plexiglas) se recomienda que este proceso dure 15 segundos (Sun De., Li Bing-Bing Li & Xu Zhen-Liang, 2013) con el propósito de garantizar la distribución homogénea de la colada en la lámina. Una vez realizado el vaciado de la colada compuesta por PDMS y PTFE sobre las láminas plexiglas se deja reposar durante 48 horas dentro de una sorbona para evaporar el tolueno y permitir la combinación del PDMS y el PTFE a fin de generar una lámina homogénea. Este procedimiento se repite para cada una de las combinaciones expuestas en el diseño experimental (ver tabla 3), a

temperatura ambiente y en un medio estéril durante 48 horas. El producto obtenido mostro una morfología de una de elastómero identificado por dos capas, la capara principal formada por PDMS: TEOS: DBTL era incolora y la adición de PTFE a la misma mostro la segunda capa de color blanquecino, además se observó a simple vista un amento en la viscosidad, además de ser flexible y de fácil deformación. Finalmente las láminas A4 del material compuesto se troquelaron (ver figura 1) para realizar el ensayo mecánico de tracción, según la norma ASTM D638. También se realizaran los ensayos físicos de solubilidad y permeabilidad al vapor de agua según la normativa ASTM E96 expuestos posteriormente.

3.6. Evaluación del material compuesto

3.6.1. Resistencia a la tracción

Las pruebas de tracción se realizaron en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP) y se siguió rigurosamente las especificaciones de la normativa ASTM – D638, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”. El ensayo de tracción consiste en someter el material compuesto con dimensiones normalizadas a un estiramiento creciente hasta que se produce la rotura de la probeta, es decir que la prueba de tracción determina la resistencia del material sometido a una simple operación de estiramiento.

Para llevar a cabo la prueba de tracción se troquelaron 5 probetas, halterio o conocidas también como probetas tipo corbata (ver figura 11), de cada combinación expuesta en la tabla 3 del diseño experimental, bajo las especificaciones de la norma ya citada.

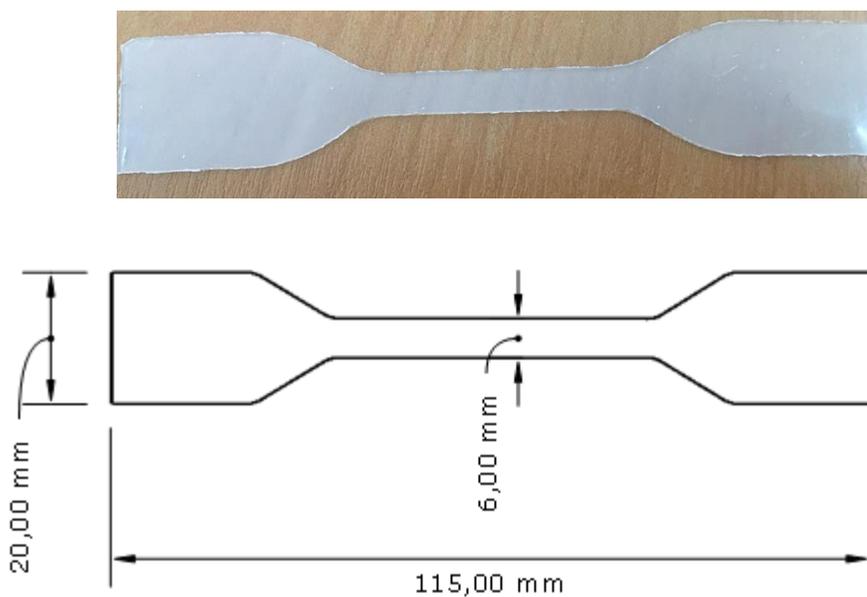


Figura 11. Troquelacion de probetas tipo halterio.

A continuación las probetas planas con 115 mm de largo, 20 mm de ancho, 6 mm de ancho en la sección más estrecha y con un espesor que oscila entre 0.7 – 1 mm, se colocan en las mordazas del equipo de ensayo Instron, modelo 3365 (ver figura 12), mismas que someten la muestra a tensión. Según la normativa ASTM D638 la velocidad de prueba está determinada por la naturaleza del material, por esta razón, la velocidad para medir la resistencia y el alargamiento para probetas de PDMS es de 30 mm/min, cabe mencionar que la velocidad debe ser uniforme (Seghir R. & Arscott S.)

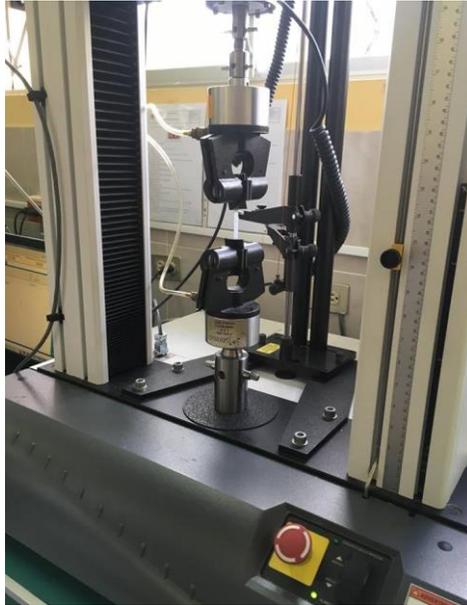


Figura 12. Máquina de ensayo Instron.

De acuerdo con las especificaciones de la normativa ASTM-D638-02 se realizó las pruebas de resistencia a la a cinco probetas de tipo halterio por cada combinación del diseño experimental, teniendo en cuenta que todas las probetas tengan la misma particularidad simétrica, como se mencionó en la sección anterior la prueba de resistencia a la tracción evalúa la carga aplicada y su deformación, cuando se da la ruptura del material compuesto (ver figura 13).

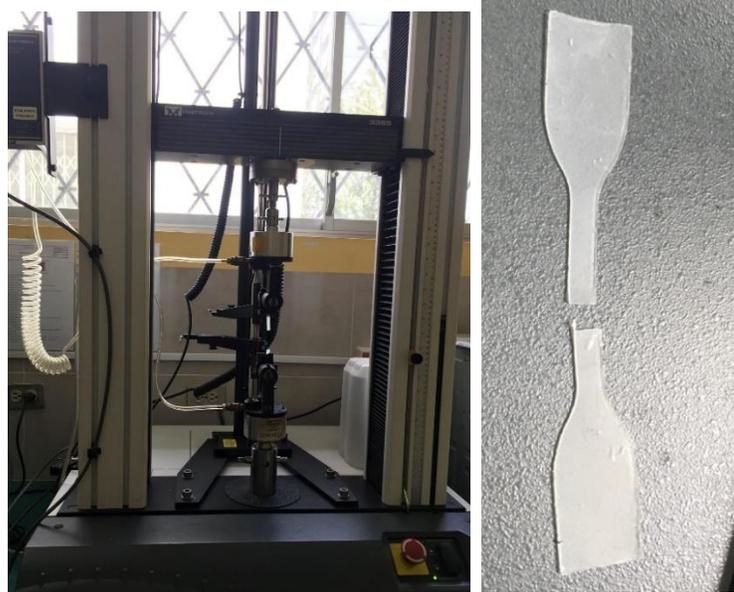


Figura 13. Ruptura de la probeta durante el ensayo de tracción.

Los datos obtenidos se muestran en un esquema tensión – deformación (ver figura 14), misma que permite articular la ductilidad, integridad y durabilidad del material compuesto para posteriores aplicaciones.

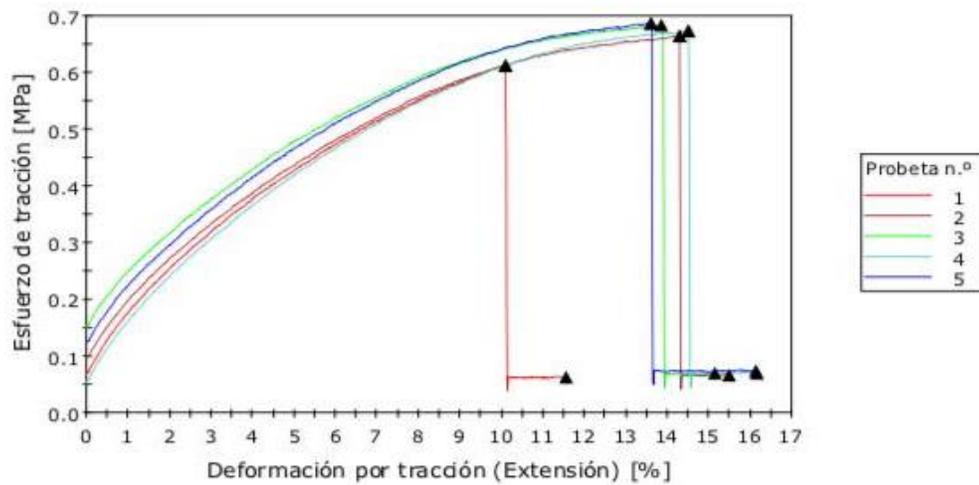


Figura 14. ASTM D-638 Curva de tensión – deformación.

Durante el desarrollo de la prueba de tracción la ruptura del material compuesto se concentra en la zona estrecha de la probeta, el equipo mide la carga aplicada súbitamente y su elongación mediante un extensómetro, mientras se desarrolla el ensayo el equipo emite resultados de la carga aplicada a la probeta y la deformación registrándolos automáticamente en el equipo y esquematizando una curva de tensión vs deformación (ver figura 14), los principales parámetros que describen dicha curva obtenida durante la prueba de tensión son la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de alargamiento. (ASTM D638, 2013).

3.6.2. Cálculo del rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad.

El ensayo de solubilidad se determinó mediante un método gravimétrico que permite conocer el rendimiento de entrecruzamiento del material compuesto. El método se fundamenta en la densidad del material compuesto, propiedad que se relaciona directamente proporcional con el entrecruzamiento.

Sumergir el material compuesto en un vaso de precipitación o caja petri que contenga disolvente en nuestro caso agua y etanol, durante 24 horas, de esta manera se extraen las cadenas que no participaron dentro del proceso de entrecruzamiento. Para llevar a cabo el método gravimétrico se realiza varios pesos del material compuesto a diferentes períodos de tiempo, entonces; primero se pesó el material compuesto antes de ser sumergido en el disolvente (P_i), luego se pesó el material compuesto sumergido en el disolvente (P_h) y finalmente se pesó el material compuesto cuyo exceso de disolvente fue eliminado con la ayuda de una toalla absorbente (P_s), posteriormente la muestra vuelve a ser re-sumergida en el solvente para determinar la capacidad de masa en función del tiempo y se determina mediante las ecuaciones (1,2 y 3). Es importante pesar el material compuesto en una balanza analítica 750 g, BPS PLUS Boeco (452309/15), precisión de 10 mg; para verificar el rendimiento de entrecruzamiento.

$$A = (P_h - P_s)/P_s \quad (1)$$

$$X_y = P_s/P_i \quad (2)$$

$$L_w = (P_i - P_s)/P_i \quad (3)$$

Donde:

A = Absorción del disolvente dentro del material compuesto.

X_y = Rendimiento de entrecruzamiento

L_w = Pérdida de peso (cantidad de cadenas que no participaron dentro del proceso de entrecruzamiento)

3.6.3. Permeabilidad al vapor de agua

Las pruebas gravimétricas son usualmente ocupadas para determinar la permeabilidad a vapor de agua por lo que se siguió la técnica de la normativa ASTM E96 “Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials” (ASTM E-96 -00, 2000), dicha normativa posee dos métodos: en la que emplea desecante y otra agua destilada. En esta investigación se ocupó la técnica del agua destilada y se realizó cinco pruebas.

Rotular el tubo de ensayo o tubo de hemolisis en coordinación con la lámina del material compuesto, luego llenar el tubo de ensayo con agua destilada hasta un nivel de 6mm por debajo del borde del mismo, con la finalidad de que el agua no toque el material compuesto cuando se manipula el tubo, así también se debe considerar que el nivel del agua no será inferior a 3mm, es decir un volumen aproximado de 10ml, a fin de mantener una humedad relativa del 100%, a continuación se seccionaron moldes de 11 mm de diámetro y se cubrió la boca del tubo de ensayo

(10 mm de diámetro) con la muestra del material compuesto e inmediatamente se selló con bandas de hule y cinta aislante, luego se cubrió en su totalidad la superficie del tubo con papel aluminio.

Una vez terminado este proceso se registró el peso inicial de la muestra y colocó en una cámara con atmosfera controlada, desecador adaptado a un termhigrometro marca boeco, serio BOE 327, bajo condiciones de temperatura 22.6°C y 32% de humedad relativa, ocupando sílica gel como indicador de humedad. Por último se debe superviso la ganancia o pérdida de peso mediante prolongaciones de tiempo durante 3 horas a partir del momento en que el sistema alcance el equilibrio (1 hora). Se calculó la permeabilidad al vapor de agua mediante la siguiente ecuación:

$$WVP = \frac{WVTR}{Sx(R_2 - R_1)} * Z$$

En el cual:

WVP: permeabilidad al vapor de agua ($g * s^{-1} * m^{-1} * MPa^{-1}$)

WVTR: pendiente de la curva (g/h) sobre el área expuesta de la película ($g/s*m^2$).

S: presión de vapor de agua a la temperatura de ensayo (MPa)

T: temperatura de ensayo (22.6°C)

R2: humedad relativa de la cámara, desecador (32%)

R1: humedad relativa en el interior de la celda (100%)

Z: espesor (1 mm)

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos con sus respectivos análisis de acuerdo a los objetivos específicos planteados en el capítulo I de esta investigación.

4.1. Resistencia a la tracción bajo especificaciones de las Norma ASTM – D638.

La resistencia a la tracción mide la deformación de la probeta que se da al someterla a una carga, y este ensayo puede ser utilizado para determinar varias propiedades de los materiales como resistencia la tracción, módulo de elasticidad entre otras.

4.1.1. Análisis del diseño experimental aplicado a la resistencia a la tracción

En el diseño factorial 3^k con cinco réplicas se evaluó la mejor resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad del material compuesto, aplicadas a los nueve tratamientos (combinaciones) de los factores independientes, con la finalidad de determinar los parámetros más significativos para la el desarrollo del material compuesto, además de las interacción en función de la variable de respuesta (resistencia a la tracción). Los tratamientos y las repeticiones experimentales (ver tabla 4) se realizaron de forma aleatoria para garantizar la reproctividad y reducir el error estándar.

Tabla 4

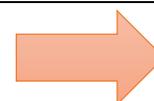
Combinaciones experimentales del diseño 3k factorial con cinco replicas respecto a la resistencia a la tracción.

N° Experimento	Capa principal		Material compuesto		Resistencia a la tracción MPa
	proporción PDMS:TEOS:DBTL	másica	proporción PTFE/PDMS	másica	
1	33:1:0,5		1:9		0,045
2	33:1:0,5		1:1		0,310
3	33:1:0,5		2:3		0,247
4	25:1:0,5		1:9		0,094
5	25:1:0,5		1:1		0,231
6	25:1:0,5		2:3		0,321
7	10:1:0,5		1:9		0,579
8	10:1:0,5		1:1		0,641
9	10:1:0,5		2:3		0,535
10	33:1:0,5		1:9		0,047
11	33:1:0,5		1:1		0,239
12	33:1:0,5		2:3		0,276
13	25:1:0,5		1:9		0,102
14	25:1:0,5		1:1		0,267

CONTINÚA

15	25:1:0,5	2:3	0,277
16	10:1:0,5	1:9	0,580
17	10:1:0,5	1:1	0,640
18	10:1:0,5	2:3	0,604
19	33:1:0,5	1:9	0,045
20	33:1:0,5	1:1	0,267
21	33:1:0,5	2:3	0,282
22	25:1:0,5	1:9	0,083
23	25:1:0,5	1:1	0,228
24	25:1:0,5	2:3	0,315
25	10:1:0,5	1:9	0,429
26	10:1:0,5	1:1	0,563
27	10:1:0,5	2:3	0,598
28	33:1:0,5	1:9	0,046
29	33:1:0,5	1:1	0,215
30	33:1:0,5	2:3	0,265
31	25:1:0,5	1:9	0,085
32	25:1:0,5	1:1	0,216
33	25:1:0,5	2:3	0,304
34	10:1:0,5	1:9	0,414

CONTINÚA



35	10:1:0,5	1:1	0,568
36	10:1:0,5	2:3	0,560
37	33:1:0,5	1:9	0,052
38	33:1:0,5	1:1	0,293
39	33:1:0,5	2:3	0,221
40	25:1:0,5	1:9	0,088
41	25:1:0,5	1:1	0,217
42	25:1:0,5	2:3	0,244
43	10:1:0,5	1:9	0,436
44	10:1:0,5	1:1	0,583
45	10:1:0,5	2:3	0,660

4.1.2. Análisis de varianza

Con la ayuda de los resultados conseguidos de la prueba de resistencia la tracción se realizó un análisis de varianza (ANOVA) (ver tabla 5) mediante la ayuda del software mintab. En la tabla de análisis de varianza se expresa los datos de los grados de libertad (GL), suma de cuadrado (SC), suma de cuadrados medios (MC), el valor F y el valor P, los cuales me permiten verificar la significancia de los efectos de los factores de estudio (proporción másica de la capa principal PDMS) y proporción másica del material compuesto (PTFE/PDMS) con respecto a la variable de respuesta, resistencia a la tracción, además de la interacción entre los mismos ilustrada mediante el diagrama de Pareto.

Tabla 5

Resultados del ANOVA de la resistencia a la tracción propuesto por el diseño 3k factorial.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	8	1,61109	0,201386	125,21	0
Lineal	4	1,5842	0,39605	246,24	0
Capa Principal PDMS	2	1,3116	0,6558	407,73	0
Material Compuesto PTFE/PDMS	2	0,2726	0,1363	84,74	0
Interacciones de 2 términos	4	0,02689	0,006722	4,18	0,007
Capa Principal PDMS*Material Compuesto PTFE/PDMS	4	0,02689	0,006722	4,18	0,007
Error	36	0,0579	0,001608		
Total	44	1,66899			

		R-cuad.	R-cuad.
		R-cuad. (ajustado)	(pred)
0,0401050	96,53%	95,76%	94,58%

La tabla ANOVA expresa que los resultados obtenidos fueron significativos, en el caso del factor capa principal PDMS*Material Compuesto PTFE/PDMS posee un valor-p menos a 0,05 lo que demuestra la significancia de los efectos de cada variable independiente con un nivel de confianza del 95%, por otra parte el R- Cuadrado (96, 53%) señala que el modelo ajustado, con 95,76% de variabilidad es aceptable.

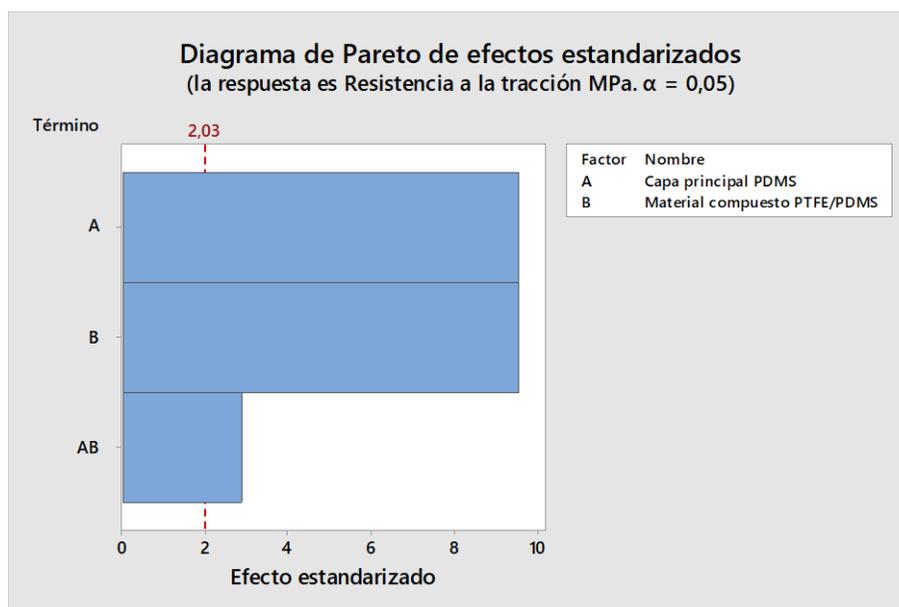


Figura 15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

La figura 15 esquematiza el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados con un nivel de confianza del 95%, donde se observa que el factor A, que corresponde a la proporción másica del PDMS (capa principal) y el factor B, que corresponde a la proporción másica PTFE/PDMS (material compuesto), poseen la misma importancia por ende los dos son significativos, es decir que la relación entre las proporciones mencionadas de los dos factores al combinarse generan mayor efecto, además se visualiza que la línea roja punteada que se encuentra dentro del histograma por lo indica que los factores tienen un impacto significativo con respecto a la resistencia a la tracción.

Análisis de los efectos estandarizados

El análisis de los efectos estandarizados estudia los efectos de cada factor y su interacción con respecto a la resistencia a la tracción.

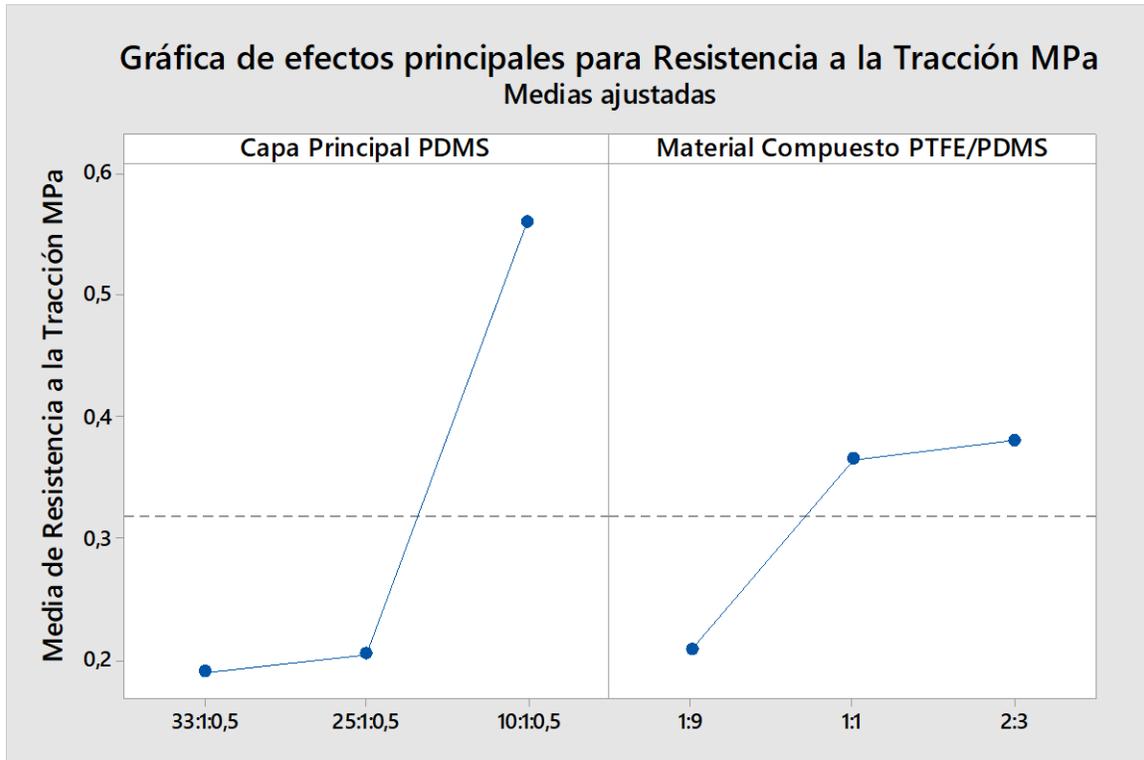


Figura 16. Grafica de efectos principales de la resistencia a la tracción.

La grafica de efectos principales se ilustra en la figura 16, donde se observa que para la capa principal PDMS cuando se disminuye proporcionalmente el peso de PDMS la resistencia a la tracción aumenta, es decir cuando se tiene una relación de 33:1:0,5 se obtiene como resultado una resistencia a la tracción estimada de 0,19 MPa y cuando se tiene una relación de 10:1:0,5 se obtiene como resultado un aumento de la resistencia a la tracción estimada en 0,58 MPa aproximadamente,

el efecto proporción másica ya sea para la formación de la capa principal como para el material compuesto es directamente proporcional a la resistencia a la tracción.

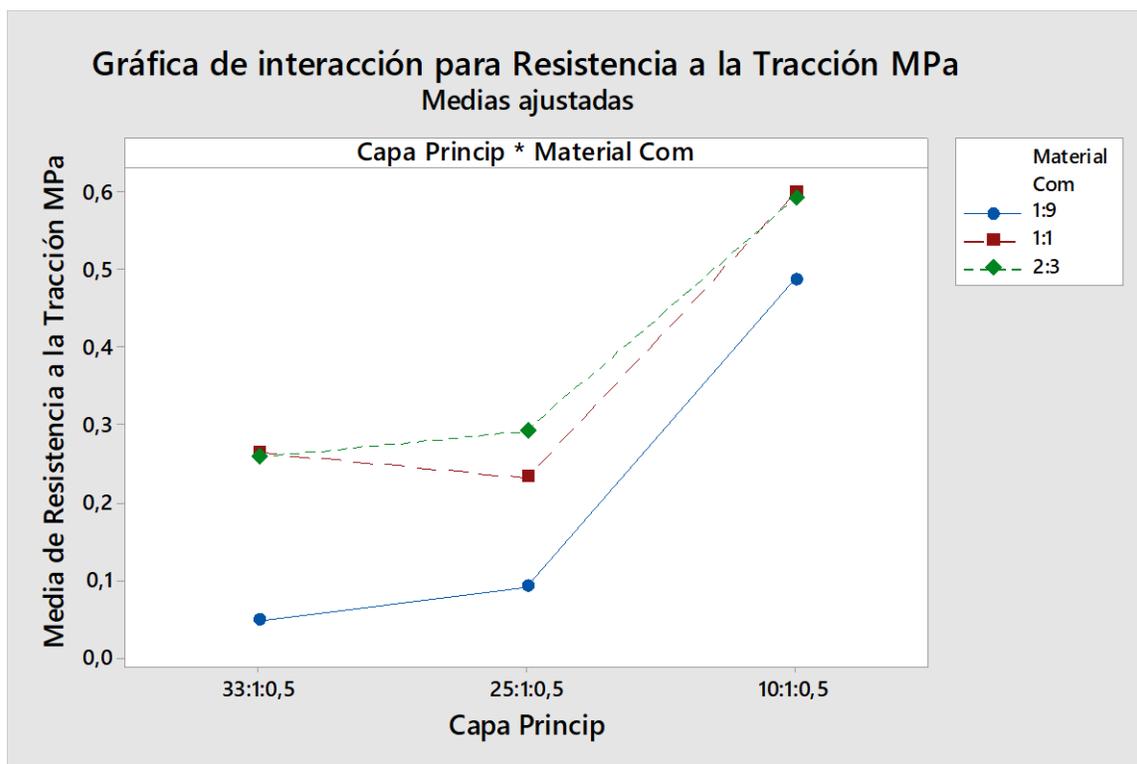


Figura 17. Grafica de interacción de resistencia a la tracción.

El esquema 17. Ilustra las interacciones de los pesos de los componentes en la capa principal, vs los pesos del material compuesto con respecto la resistencia a la tracción. Donde se puede observar que a medida que se disminuye la el peso de PDMS en la capa principal la resistencia a la tracción aumenta; cuando se tiene una relación de 33:1:0,5 para la capa principal y 1:9 para el material compuesto se tiene una resistencia de 0,085 MPa y cuando se tiene una relación de 10:1;0,5 para la capa principal y de 1:9 para el material compuesto se tiene una resistencia de 0,48 MPa, no obstante se observa que la relación de 10:1:0,5 para la capa principal y 1:1 para el material

compuesto emite una resistencia superior siendo esta 0,62 MPa por esta razón se sabe se tiene una mejor la resistencia a la tracción cuando el peso de polidimetilsiloxano disminuye y el peso de politetrafluoruro de etileno aumenta por lo que existe una mejor resistencia a la tracción cuando se trabaja con una relación 1:1 de politetrafluoruro de etileno y polidimetilsiloxano. Haciendo énfasis a la resistencia que brinda el politetrafluoruro de etileno se verifica lo mencionado en la investigación de (Qian-Zhi , y otros, 2015), quienes manifiestan que con el aumento del contenido de PTFE, las superficies de las membranas compuestas de PTFE-PDMS se vuelven cada vez más duros proveyendo de resistencia la material.

4.2. Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad de un material es la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria, se representa con la letra E y es una indicación de la rigidez del material. Dicho de otra manera es la carga requerida para estirar una muestra de una unidad de área de sección transversal por unidad de cantidad. Se expresa como el cociente incremental de la carga en la porción recta inicial de la curva tensión - elongación el grado de cristalinidad y orientación, las condiciones de producción y proceso, temperatura y humedad tienen una influencia notoria en el módulo de elasticidad.

En la tabal 6 se exponen los resultados obtenidos con respecto al módulo de elasticidad para los tratamientos realizados con sus respectivas replicas.

Tabla 6

Combinaciones experimentales del diseño 3k factorial con cinco replicas respecto al módulo de elasticidad. .

N°	Capa principal	proporción	másica	Material compuesto	Módulo de elasticidad
Experimento	PDMS:TEOS:DBTL			proporción	MPa
				másica	
				PTFE/PDMS	
1	33:1:0,5			1:9	2,17
2	33:1:0,5			1:1	4,35
3	33:1:0,5			2:3	2,98
4	25:1:0,5			1:9	3,16
5	25:1:0,5			1:1	2,17
6	25:1:0,5			2:3	2,90
7	10:1:0,5			1:9	4,35
8	10:1:0,5			1:1	3,50
9	10:1:0,5			2:3	4,69
10	33:1:0,5			1:9	2,09
11	33:1:0,5			1:1	4,23
12	33:1:0,5			2:3	3,18
13	25:1:0,5			1:9	3,17
14	25:1:0,5			1:1	2,31
15	25:1:0,5			2:3	2,08
16	10:1:0,5			1:9	4,23
17	10:1:0,5			1:1	3,10
18	10:1:0,5			2:3	4,80
19	33:1:0,5			1:9	2,13

CONTINÚA



20	33:1:0,5	1:1	4,69
21	33:1:0,5	2:3	2,98
22	25:1:0,5	1:9	3,09
23	25:1:0,5	1:1	2,53
24	25:1:0,5	2:3	2,49
25	10:1:0,5	1:9	4,28
26	10:1:0,5	1:1	3,36
27	10:1:0,5	2:3	3,98
28	33:1:0,5	1:9	2,15
29	33:1:0,5	1:1	4,62
30	33:1:0,5	2:3	3,09
31	25:1:0,5	1:9	3,12
32	25:1:0,5	1:1	2,48
33	25:1:0,5	2:3	2,25
34	10:1:0,5	1:9	4,33
35	10:1:0,5	1:1	3,98
36	10:1:0,5	2:3	4,40
37	33:1:0,5	1:9	2,19
38	33:1:0,5	1:1	4,32
39	33:1:0,5	2:3	3,15
40	25:1:0,5	1:9	3,20
41	25:1:0,5	1:1	2,15
42	25:1:0,5	2:3	2,83
43	10:1:0,5	1:9	4,20
44	10:1:0,5	1:1	4,37
45	10:1:0,5	2:3	4,62

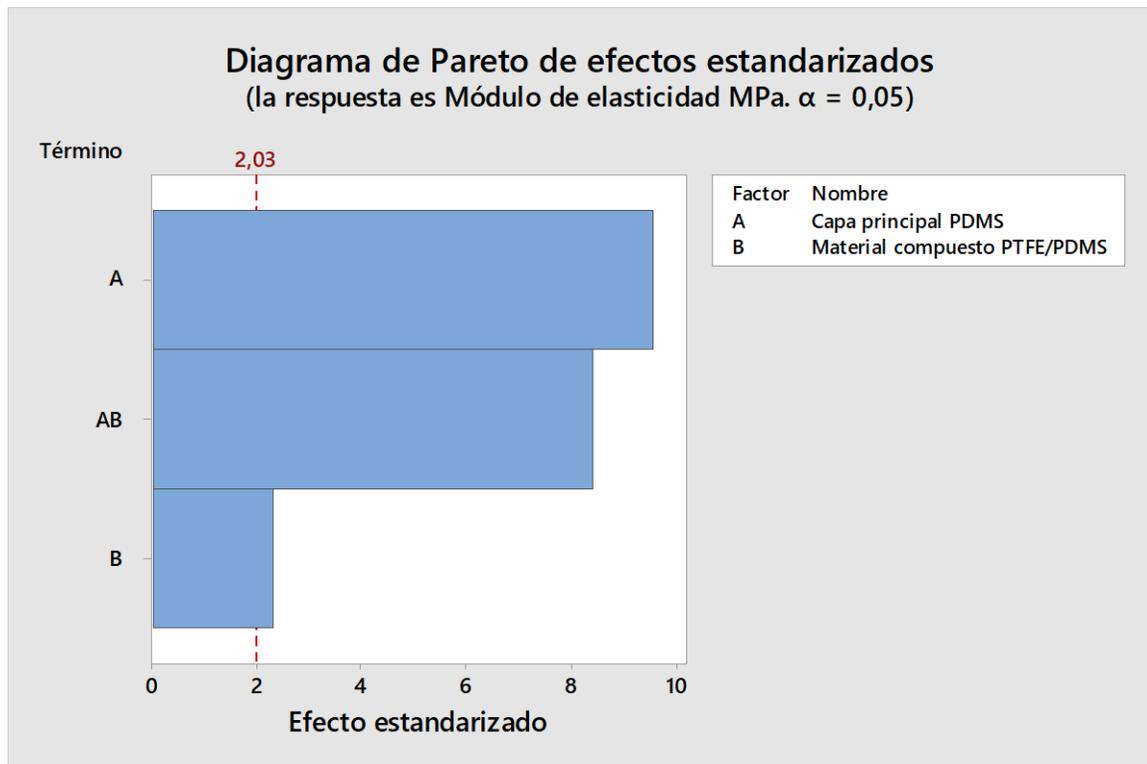


Figura 18. Diagrama de Pareto, módulo de elasticidad.

En la figura 18 se ilustra el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados con un nivel de confianza del 95%, donde se observa que el factor capa principal (PDMS: TEOS: DBTL) presenta un mayor efecto debido a la propiedad de flexibilidad que posee el polidimetilsiloxano y el factor B tiene un menor efecto. Se comparó el módulo de elasticidad el material compuesto obtenido con las propiedades de la piel humana, se verificó que cumple propiedades similares.

(Van Kuilenburg, Masen , & Van , 2012) Manifiestan que la variación de la elasticidad se explica por la variación en la composición y propiedades de las diferentes capas de la piel (ver tabla 11).

Tabla 7

Módulo de elasticidad de las diferentes capas en la piel humana.

Capa de piel, tejido	Módulo de elasticidad (MPa)	Espesor mm
Estrato córneo Seco	500(3.5-1000)	0.025 (0.01–0.04)
Húmedo	30(10-50)	
Epidermis viable	1,5	0.095(0,04-0,015)
Dermis	0.02 (8-35kPa)	1.4 (0.8-2)
Hipodermis	2×10^{-3}	0.8

En la tabla 7 se observa el módulo de elasticidad para diferentes capas y tejidos de la piel humana. En función del espesor del material compuesto desarrollado se determina que se encuentra funcionando como una dermis.

El módulo elástico de las muestras de PDMS más rígidas está por debajo de 5 MPa, y las más blandas están muy por debajo de 1 MPa, medido utilizando la prueba de tracción. (Wang , Volinsky, & Gallant, 2014)

Los resultados del módulo elástico de las muestras de PDMS analizadas se enumeran en la Tabla I. Está claro que el módulo elástico del PDMS está relacionado con la relación entre la base del elastómero y el agente de curado, es decir, los grados de reticulación. El módulo elástico medido de la red del PDMS varía linealmente con la cantidad de reticulante para el material de curado ensayado. Basado en el estudio de Fuard et al., que utilizó las verdaderas curvas de tensión-

deformación, el módulo de Young de la red PDMS con la relación peso base/agente de 10: 1, 20: 1, y 33: 1 es 3 MPa, 0,6 MPa, y 0.15 MPa, respectivamente.

Mejor combinación

Con la finalidad de verificar la homogeneidad del material compuesto que garantice la repetibilidad de los ensayos mecánicos se desarrolló réplicas de la mejor combinación material (10:1:0,5 y 1:9) dando como resultado las curvas de esfuerzo deformaciones similares expuestas en la figura 6.

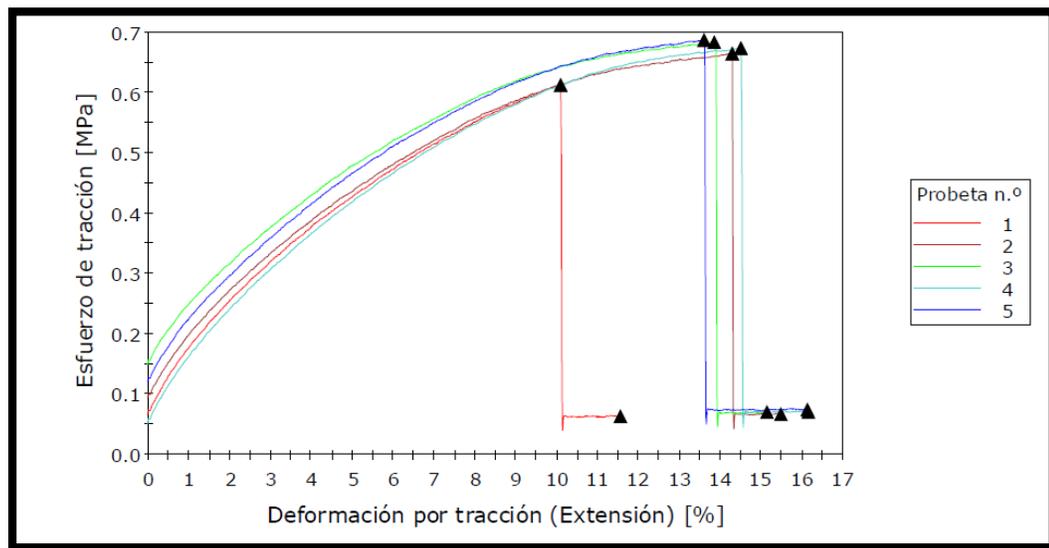


Figura 19. ASTM D-638 Curva de tensión – deformación del material compuesto.

Fuente: (CIAP, 2018)

En la figura 19 se observa que las curvas de deformación por tracción son idénticas y su promedio de resistencia a la tracción es de 0,654 MPa. Con un módulo de elasticidad de 5,54 MPa.

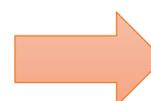
Tabla 8*Datos referenciales de Módulo de elasticidad de las capas de la piel.*

Capa de piel, tejido	Módulo de elasticidad (MPa)	Espesor mm
Estrato córneo Seco	500(3.5-1000)	0.025 (0.01–0.04)
Húmedo	30(10-50)	
Epidermis viable	1,5	0.095(0,04-0,015)
Dermis	0.02 (8-35kPa)	1.4 (0.8-2)
Hipodermis	2×10^{-3}	0.8

Tabla 9*Datos referenciales de módulo de elasticidad de acuerdo a la edad.*

Estudio	Sujetos	Edad años	Dato modulo de elasticidad
Jachowicz et al.	4 hombres	28-65	28.6
Paillier Mattei et al.	6 mujeres	28-65	24 KPa 13.7 KPa 11.2 KPa
Paillier Mattei et al.	10 hombres	Sobre 30	18 KPa
	1 mujer	30	8.8KPa
	1 mujer	60	5.2KPa

CONTINÚA



Zahovani et. al	20 mujeres	55 - 70	8.3KPa 3.44 Mpa
Geerlings et al.	3 mujeres	43	1.46 MPa

Relacionando las propiedades obtenidas del material compuesto con respecto a las tablas 8 y 9 se determinó que mejor combinación del material compuesto que permite alcanzar las propiedades mecánicas que se son similares a la piel humana es: 10:1:0,5 – 1:1 ya se obtuvo una resistencia a la tracción promedio de 0,65 MPa, un módulo de elasticidad promedio de 5, 54MPa, similar a la dermis de una persona de una edad de 43 años.

4.3. Cálculo Rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad.

Generalmente la reticulación promueve el entrecruzamiento entre las cadenas poliméricas forjando una diferencia en las particularidades físicas de los nuevos materiales (Reynoso Sara L., 2018). Por esta razón es importante conocer el rendimiento de entrecruzamiento que posee el material compuesto, de esta manera se determina si el método químico empleado aporta elocuentemente en el desarrollo del material compuesto, es decir que dependiendo de la densidad del material compuesto se conoce la cantidad de puntos reticulados dentro del material; teniendo una relación inversamente proporcional con la solubilidad en agua y etanol, solventes de estudio considerados con respecto a la orientación que se le da al material compuesto obtenido.

4.3.1. Cálculo Rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad.

En la tabla 10 se expone los resultados de los promedios de absorción del disolvente, pérdida de peso y porcentaje de rendimiento de entrecruzamiento, de los tratamientos desarrollados mediante pruebas de solubilidad en agua destilada.

Tabla 10

Calculo de rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad en agua.

	Proporción másica PDMS	Proporción másica PTFE/PDMS	Tiempo h	Absorción del disolvente A (gr)	Pérdida de peso Lw (gr)	Rendimiento de entrecruzamiento Xy en Agua destilada (%)
Lamina 1	33:1:0.5	1.9	24 h	0.0537	0,0032	97,67
Lamina 2	25:1:0.5	1.9	24 h	0,0310	0	100
Lamina 3	10:1:0.5	1.9	24 h	0,0472	0.0062	99,37
Lamina 4	33:1:0.5	1.1	24 h	0.0361	0	100
Lamina 5	25:1:0.5	1.1	24 h	0,0415	0	100
Lamina 6	10:1:0.5	1.1	24 h	0,0373	0,0030	99,62
Lamina 7	33:1:0.5	2.3	24 h	0,0631	0,0063	99,36
Lamina 8	25:1:0.5	2.3	24 h	0,0332	0	100
Lamina 9	10:1:0.5	2.3	24 h	0,0220	0,0060	99,37

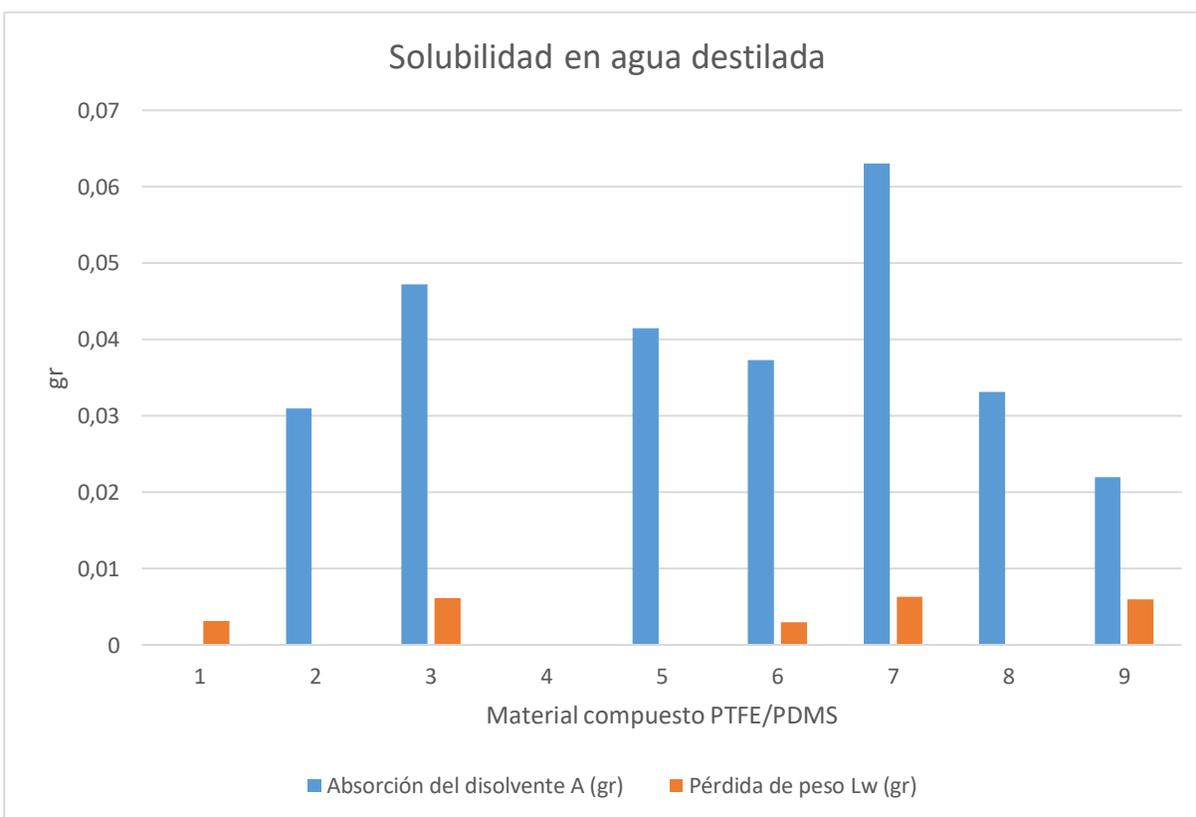


Figura 20. Pruebas de solubilidad del material compuesto obtenido en agua destila.

En la figura 20 se observa que material compuesto de las láminas 2,4 y 8 expuesto a las pruebas de solubilidad durante 24 horas no presentan pérdida de peso y las sobrantes presentan una pérdida peso muy pequeña (0,01 gr), Con respecto al resultado obtenido para la pérdida de peso, resulta que entre mayor rendimiento de entrecruzamiento exista menor será la pérdida de peso, ya que esto indica que se están extrayendo una menor cantidad de cadenas no entrecruzadas cuando se sumerge el material compuesto en el disolvente, siendo indicación de que el proceso de entrecruzamiento es eficiente. El desarrollo del material compuesto debido a sus propiedades genera un recubrimiento de tipo hidrofóbico formado por moléculas de polidimetilsioxano y politetrafluoruro de etileno (moléculas apolares) que experimentan repulsión al agua. Con este criterio se conoce que las superficies hidrofóbicas son de gran interés, ya que no solo son interesantes por el principio de

funcionamiento, sino también tiene por el gran impacto en aplicaciones que requiere superficies anti suciedad o repelentes al agua. (Tropmann, Tanguy, Koltay, Zengerle, & Riegger, 2012).

Comúnmente se dice que una sustancia es hidrofóbica no es miscible con el agua, es decir que desde el punto de vista químico, las moléculas del material hidrofóbico no son capaces de interactuar con las moléculas de agua, ni por puentes de hidrógeno ni mediante interacciones ion-dipolo. Por tal motivo se corrobora que nuestro material compuesto es hidrófobo, combinación de rugosidad en los rangos micrométricos y nanométricos y una energía superficial intrínsecamente baja, ya que además se sabe que el politetrafluoruro de etileno tiene baja energía superficial, es decir que en el material compuesto las moléculas de agua se encuentran desordenadas alrededor del material compuesto, pero no la atraviesan gracias a la hidrofobicidad.

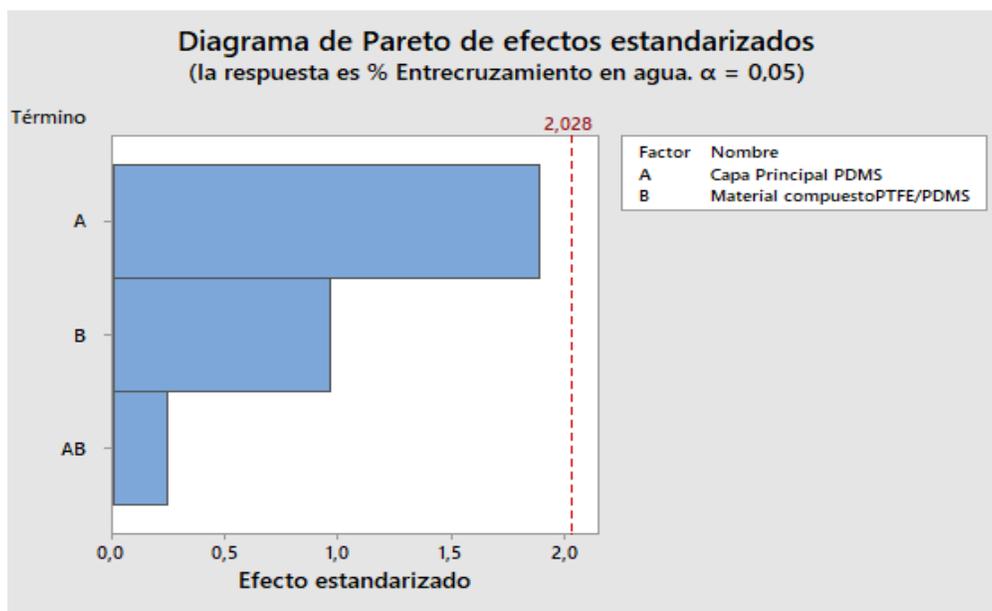


Figura 21. Diagrama de Pareto. Rendimiento de entrecruzamiento en agua.

Con respecto al proceso de entrecruzamiento el diagrama de Pareto muestra los efectos estandarizados con un nivel de confianza del 95% donde se observa los factores analizados y la

interacción. En consecuencia se observa que factor A, capa principal, formada por PDMS, TEOS y DBTL genera un mayor efecto y el factor B, material compuesto, genera menor efecto. El mayor efecto generado por el factor A se da debido a la cantidad de puntos entrecruzados, que se forman cuando el agente de curado Dilaurato de dibutil estaño promueve la formación de los grupos etoxi, ya que el DBTL actúa como un catalizador de poli condensación neutro. (Salazar Hernández , Salazar Hernadez, Pérez Gonzáes, Juárez Rios , & Carrera Rodríguez, 2014). Los etoxi del agente de entrecruzamiento, tetraetil de ortosilicato, se hidrolizan a silanoles y se condensan con los grupos silanoles terminales de la cadena polimérica del polidimetilsiloxano formando así puntos de entrecruzamiento (Zamudio, Villegas Gasca, Cervantes Jáuregui, & Meléndrez Amavizca, 2015).

El factor B polietrafluoruo de etileno posee un menor efecto debido a la propiedad de resistencia e inercia que aporta. Además en el diagrama de Pareto se observa que la línea roja punteada se encuentra alejada de las barras del histograma lo que indica que ningún factor tiene impacto significativo con respecto al solvente aplicado en este caso agua es decir que el solvente no extrajo ninguna de las cadenas que no participaron en el proceso de entrecruzamiento, teniendo una relación inversamente proporcional con la solubilidad en agua, con lo que se verifica que el material compuesto es insoluble. Por lo tanto haciendo énfasis a la hidrofobicidad, una de las propiedades más trascendentales de los polímeros estudiados en esta investigación, se establece que el material compuesto obtenido es insoluble en agua.

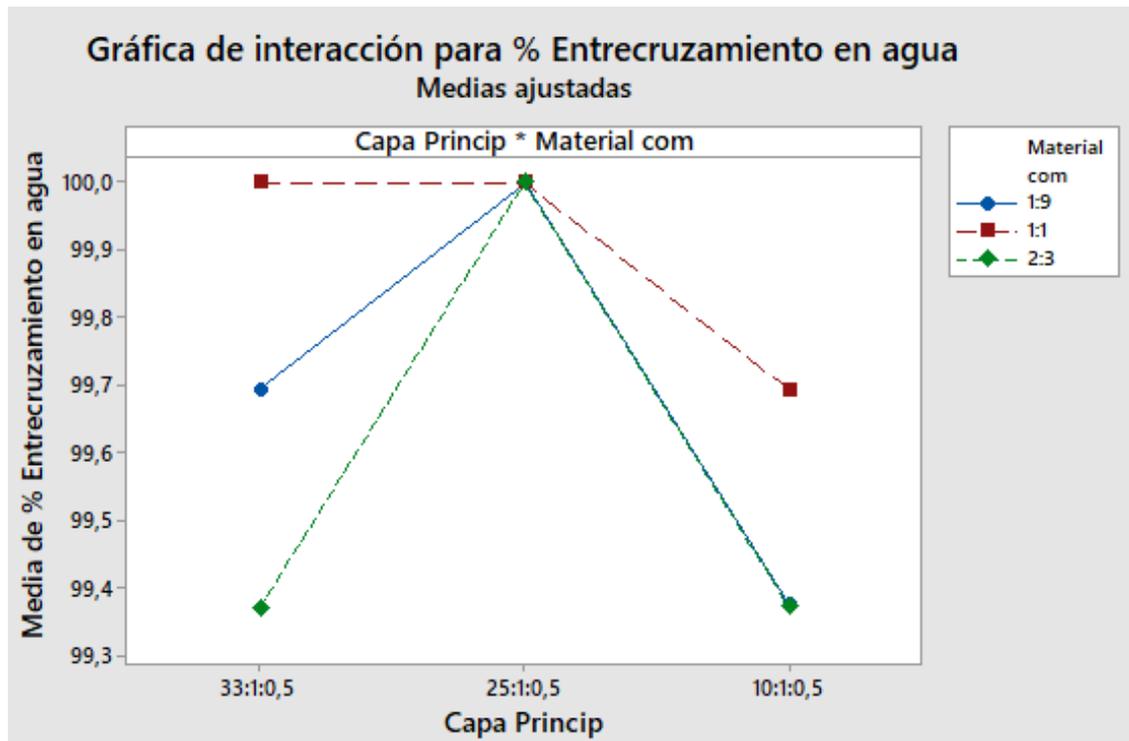


Figura 22. Grafica de interacción para rendimiento de entrecruzamiento en el agua.

La figura 22 ilustra la interacción que existe entre los pesos de la capa principal y el material compuesto donde se observa que todas las combinaciones poseen un porcentaje de rendimiento de entrecruzamiento superior al 99 % por lo tanto el método de solución en colada ocupado para el desarrollo del material compuesto es un proceso de entrecruzamiento eficiente. En consecuencia cuanto menor sea el grado de reticulacion (entrecruzamiento) menor será la rigidez del material compuesto y cuando mayor es el grado de reticulacion mayor será la rigidez del material compuesto (Wang , Volinsky, & Gallant, 2014).

4.3.2. Calculo del rendimiento de entrecruzamiento en el etanol al 96%

En la tabla 11 se expone los resultados de los promedios de absorción del disolvente, pérdida de peso y porcentaje de rendimiento de entrecruzamiento, de los tratamientos desarrollados mediante pruebas de solubilidad en etanol.

Tabla 11

Calculo Rendimiento de entrecruzamiento mediante pruebas de solubilidad en etanol.

	Proporción másica PDMS	Proporción másica PTFE/PDMS	Tiempo h	Absorción del disolvente A (gr)	Pérdida de peso Lw (gr)	Rendimiento de entrecruzamiento Xy en Etanol (%)
Lamina 1	33:1:0.5	1.9	24 h	0,049	0,011	98,8
Lamina 2	25:1:0.5	1.9	24 h	0,073	0,031	97,52
Lamina 3	10:1:0.5	1.9	25 h	0,061	0,028	97,17
Lamina 4	33:1:0.5	1.1	26 h	0,055	0,015	98,41
Lamina 5	25:1:0.5	1.1	27 h	0,078	0,006	99,39
Lamina 6	10:1:0.5	1.1	28 h	0,046	0,012	98,74
Lamina 7	33:1:0.5	2.3	29 h	0,061	0,009	99,04
Lamina 8	25:1:0.5	2.3	30 h	0,079	0,024	97,52
Lamina 9	10:1:0.5	2.3	31 h	0,037	0,015	95,89

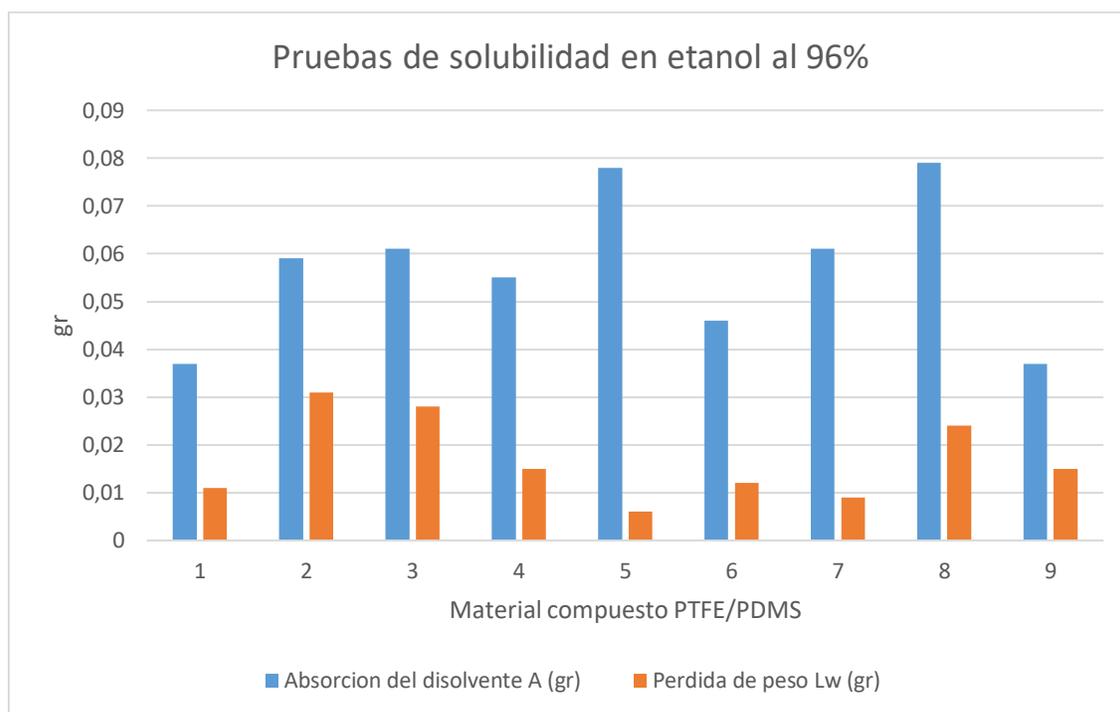


Figura 23. Pruebas de solubilidad del material compuesto obtenido en agua destilada.

La figura 23 esquematiza la pérdida de peso y la absorción de solvente que se obtuvo durante el desarrollo de las pruebas de solubilidad en durante 24 horas en etanol al 96%, donde se observa que existe una pérdida de peso de hasta 0,03gr y una absorción de solvente de hasta 0,07 gr. Con respecto al resultado obtenido para la pérdida de peso, resulta que entre mayor rendimiento de entrecruzamiento exista menor será la pérdida de peso, ya que esto indica que se están extrayendo una menor cantidad de cadenas no entrecruzadas cuando se sumerge el material compuesto en el disolvente, siendo indicación de que el proceso de entrecruzamiento es eficiente. Por otra parte la absorción del disolvente se da debido al ángulo de contacto que forma la superficie del solvente al impregnarse o al estar en contacto con un sólido, debido a la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido y las fuerzas cohesivas del líquido. La literatura reporta que en los polímeros, el ángulo de contacto con una superficie

limpia esta entre $0 - 75^\circ$, es decir que el aumento de la mojabilidad es menor, como es en el caso del polietrafluoruro de etileno, pasando de 90° grados a 70° , esto se debe a que las fuerzas adhesivas con la superficie del sólido son muy grandes en relación a las fuerzas cohesivas, teniendo como resultado que el líquido moja la superficie del material por tal motivo se va a tener una pérdida de peso debido al método de secado (eliminación del solvente, material seco) ya que el secado se realizó con toallas absorbentes mismas que pudieron ocasionar pérdida de peso. La absorción de agua fue mucho menor que el etanol para todas las muestras del material compuesto. Se demostró que las muestras del material compuesto PTFE/PDMS con respecto al ángulo de contacto del solvente tenían mayor afinidad al alcohol que con el agua. (Qian-Zhi, y otros, 2015)

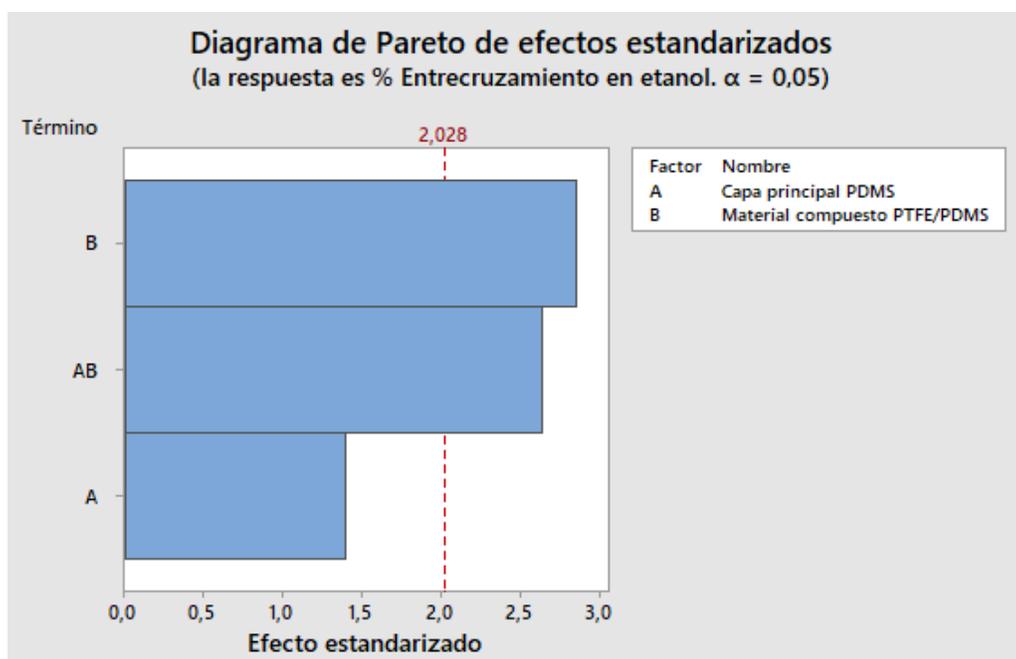


Figura 24. Diagrama de Pareto de rendimiento de entrecruzamiento en etanol.

La figura 24. Ilustra el diagrama de Pareto que muestra los efectos estandarizados con un nivel de confianza del 95% donde se observa los factores analizados y la interacción. Se observa que el factor que tiene mayor efecto es el peso de la capa principal (PDMS) y el de menos efecto es el factor B que corresponde al peso del material compuesto (PTFE/PDMS). En este caso se observa además que la línea roja punteada se encuentra dentro de las barras del esquema lo que indica que los factores tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta en este caso rendimiento de entrecruzamiento (98% -99%) relacionado inversamente proporcional con la solubilidad. Esto se da debido a la inercia que atribuye cada uno de los polímeros al ser combinados, relacionándolo directamente con la propiedad de repelencia que posee el polidimetilsiloxano y el politetrafluoruro de etileno.

4.4. Permeabilidad al vapor de agua

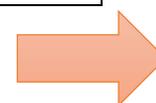
Lo valores de permeabilidad al vapor de agua fueron medidos mediante la técnica del método del agua descrita en la normativa ASTM E96, la permeabilidad de moléculas a través del material compuesto se puede calcular mediante la cantidad de masa intercambiada entre el material compuesto y el medio externo.

Tabla 12

Resultados obtenidos de permeabilidad al vapor de agua.

Material compuesto	Proporción másica PTFE/PDMS	WVP Gr/Pa. S.m ²	Desviación estándar
1	33:1:0.5 - 1:9	2,10E-06	0,07

CONTINÚA



2	25:1:0.5 - 1:9	2,10E-06	0,005
3	10:1:0.5 - 1:9	3,15E-06	0,007
4	33:1:0.5 - 1:1	1,05E-06	0,003
5	25:1:0.5 - 1:1	2,36E-06	0,003
6	10:1:0.5 - 1:1	5,24E-07	0,001
7	33:1:0.5 - 2:3	1,84E-06	0,004
8	25:1:0.5 - 2:3	1,57E-06	0,003
9	10:1:0.5 - 2:3	1,57E-06	0,003

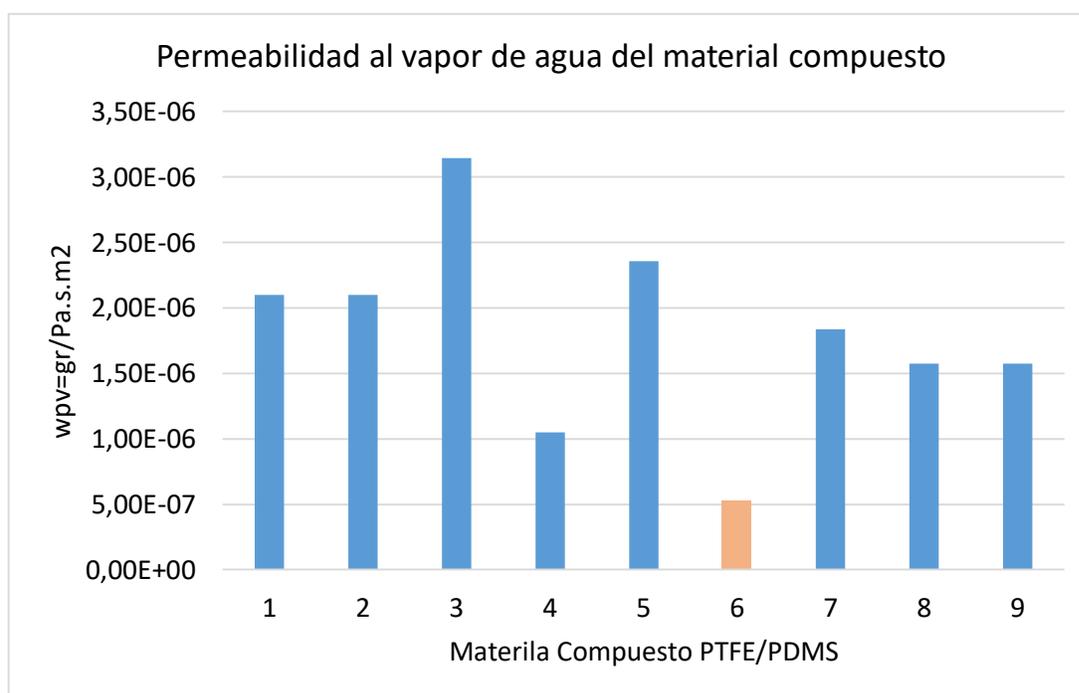


Figura 25. Diagrama de permeabilidad del vapor de agua bajo.

En la figura 25 se ilustra la permeabilidad que tiene cada lámina de material compuesto obtenido en función de las proporciones másicas de la capa principal y material compuesto PDMS/PTFE, donde se observa que el material compuesto, con la combinación de las proporciones másicas de

10:1:0,5 (capa principal) y 1:1 (PTFE/PDMS), es la que tiene menos permeabilidad al vapor de agua ($5,24 \times 10^{-7}$). Además el uso de polidimetilsiloxano PDMS fue defendido por los investigadores como un material excepcional en el área de la biomedicina porque el oxígeno podría difundirse fácilmente en ella. Por otro lado con la finalidad de orientar al material compuesto a su aplicación como recubrimiento de prótesis humana, se consideró que el material compuesto debe simular a la piel humana siendo esta una capa de separación (defensa) entre el medio ambiente y el sistema circulatorio funcionando como una barrera protectora, es decir que impida el paso a cualquier tipo de microorganismos por ello se consideró que la capa externa será la capa de Politetrafluoruro de etileno debido, a que posee un tamaño de poro de 20μ de diámetro, (Camacho Ramírez, y otros, 2013) esto no permite el paso del vapor de agua debido a que los espacios intermoleculares son más pequeño, considerado esto debido a que la piel ha sido apreciada debido a la protección que brinda frente a los elementos dañinos del medio exterior (Berti y Lipsky, 1995; Wester y Maibach, 1992; Litter, 1996).

Además se tuvo en cuenta que la permeabilidad es una de las propiedades más importantes de los medios porosos, representan la capacidad del fluido que fluye a través de ella. Aunque la permeabilidad intrínseca es uno de los atributos esenciales de los medios porosos, la permeabilidad medida en el laboratorio depende en gran medida de los fluidos utilizados varía con diferentes experimentos. En medios porosos de baja permeabilidad, la trayectoria libre media del gas es compatible con el tamaño de la garganta del poro y la permeabilidad aparente del gas es mayor que la permeabilidad intrínseca debido al efecto de deslizamiento del gas. (Berti y Lipsky, 1995; Wester y Maibach, 1992; Litter, 1996).

4.5. Análisis de viabilidad económica

El análisis de viabilidad económica permite determinar los costos de producción del material compuesto para evaluar si el diseño propuesto es o no factible.

Tabla 13

Datos referenciales de reactivos para el desarrollo del material compuesto

ITEM	REACTIVOS	CANTIDAD	COSTO
		ESTIMADA ml	UNITARIO
1	Polidimetilsioxano	750	\$ 257,75
2	Politetrafluoruro de etileno	300	\$ 364,13
3	Tetra etil de Orto Silicato	100	\$ 43,92
4	Dilaurato de dibutil estaño	25	\$ 163,36
5	Tolueno	200	\$ 16,80
		Total	\$ 845,96

Tabla 14

Datos referenciales de equipos para el desarrollo del material compuesto.

ITEM	EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA
		EJECUTADA horas	MAXIMA [KW]
1	Agitador Magnético con Plancha de Calentamiento Análogo	2,50	0,75

En la tabla 13 y 14 se expone los costos unitarios totales de los reactivos y equipos ocupados para el desarrollo del material compuesto, cabe mencionar que los reactivos incluyen un costo adicional por importación.

La adquisición de los reactivos para el desarrollo de este proyecto es de \$ 845,96 dólares americanos. En virtud de ello y en base a la resistencia a la tracción que evidencio cada lámina de material compuesto diseñada se decidió realizar el análisis de costo unitario de producción para las láminas que presentaron mayor resistencia, definidas en proporciones de peso de 10:1:0,5 (PDMS/PTFE) combinadas con (1:1) politetrafluoruro de etileno como refuerzo y 10:1:0,5 con 2:3, sustentado en los cálculos previos de los costos totales unitarios ya citados. Además se sabe también que el precio unitario de 1KW hora tiene un costo de 0,04 ctvs por lo que las 2:30 que se ocupa el Agitador Magnético con Plancha de Calentamiento Análogo para el desarrollo del material compuesto tiene un costo de 0,08 ctvs.

Tabla 15

Costo unitario de producción del material compuesto.

ITEM	REACTIVOS	CANTIDAD ESTIMADA ml	CANTIDAD EJECUTADA	COSTO DE
			Lamina 10:1:0,5 - 1:1 (6) ml	CANTIDAD EJECUTADA Lamina 10:1:0,5 - 1:1
1	Polidimetilsioxano	750	27,13	\$ 9,32
	Politetrafluoruro			
2	de etileno	300	24,94	\$ 30,27

CONTINÚA



	Tetra etil de Orto			
3	Silicato	100	2,8	\$ 1,23
	Dilaurato de			
4	dibutil estaño	25	1,24	\$ 8,10
5	Tolueno	200	25	\$ 2,10
			Total	\$ 51,11

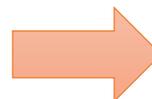
Por lo tanto el costo de producción unitario teniendo en cuenta un volumen de 62,37 cm³ con la mejor combinación que es de 10:1:0,5 (capa principal PDMS) - 1:1 material compuesto (PTFE/PDMS) tiene un costo de producción unitario de \$51,10 dólares americanos como se puede observar en la tabla 15.

Tabla 16

Costo unitario de producción del material compuesto de menor resistencia.

ITEM	REACTIVOS	CANTIDAD ESTIMADA ml	CANTIDAD EJECUTADA	COSTO DE CANTIDAD EJECUTADA
			Lamina 10:1:0,5 - 2:3 (9) ml	Lamina 10:1:0,5 - 1:1
1	Polidimetilsioxano	750	32,55	\$ 11,19
	Politetrafluoruro			
2	de etileno	300	19,958	\$ 24,22
	Tetra etil de Orto			
3	Silicato	100	3,367	\$ 1,48

CONTINÚA



Dilaurato de				
4	dibutil estaño	25	1,496	\$ 9,78
5	Tolueno	200	19,958	\$ 1,68
			Total	\$ 48,42

Así también se realizó un costo unitario de producción para un volumen de 62.37 cm^3 con una combinación 10:1:0,5 (capa principal PDMS) - 2:3 material compuesto (PTFE/PDMS) debido a que posee una resistencia a la tracción cercana a la de la mejor combinación, obteniendo como resultado que el costo de producción para la lámina mencionada es de \$ 48, 42 dólares americanos, con lo que se observa un ahorro de \$2,69 en el costo de producción, es decir si el material compuesto se produce a nivel industrial este genera el 5,56% de ahorro en función del volumen. Esto se da debido al precio del reactivo que mayor peso tenga como se puede observar en el tabal 10 el costo de adquisición del polietrafluoruro de etileno es el más costoso con respecto a los otros reactivos, no obstante es sumamente necesario considerar el costo en función de la cantidad como es el caso del dilaurato de dibutilestaño.

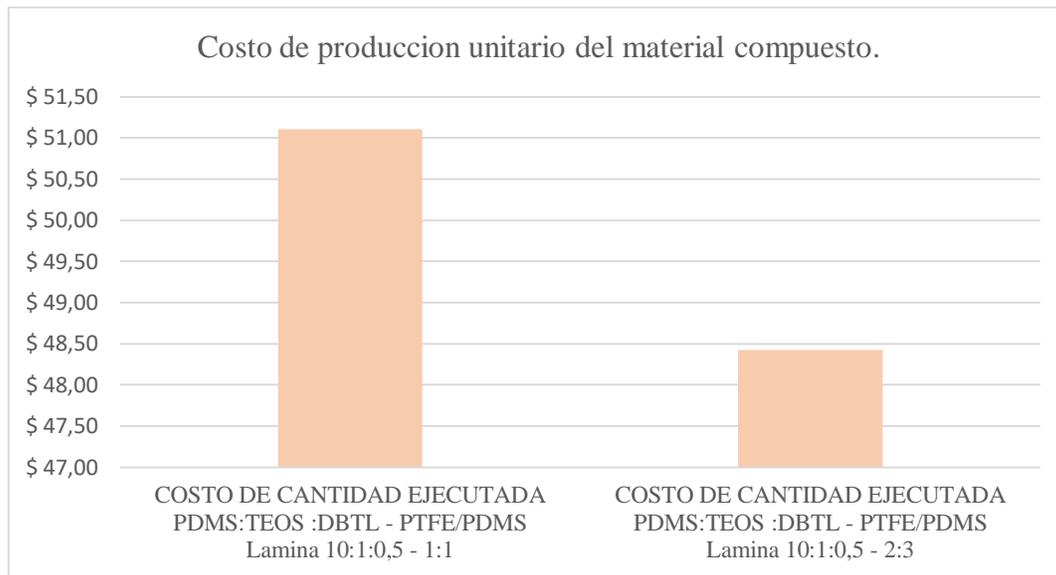


Figura 26. Costo de producción unitario del material compuesto.

Considerando que el valor está en función del volumen citado se sabe que cada cm^3 de material compuesto tiene un costo de \$ 0,82, por lo tanto los costos de producción expuestos en la tabla anterior evidencian la factibilidad del diseño propuesto ya que ya que en comparación a la investigación bibliográfica se sabe que de acuerdo con la cita dada por Magicfirm, LLC. En Hangzhou, China, el precio de fabricación es de \$ 2.2 por cm^3 utilizando el aparato de estereolitografía (SLA) de una impresora 3D (Yong He, Guang-huai , & Jian-zhong , 2014) lo que indica un costo de \$ 411.80 para un molde de oreja. Un producto protésico fabricado por impresión 3D de Fripp Design & Research en el Reino Unido cuesta alrededor de \$ 4,000 cada uno. Si dichas prótesis pudieran fabricarse en el hogar, el costo se reduciría drásticamente, beneficiando enormemente a los pacientes.

El material compuesto obtenido está orientado para su aplicación como recubrimiento de prótesis humanas por tal motivo se consideró a la piel sintética como base de comparación. La

ciencia biomédica y la ingeniería de tejidos desde tiempo atrás ha desarrollado distintos tipos de pieles sintéticas, debido a la necesidad de intervenirlos en injertos y reparaciones de pieles dañadas (Nassar J, 2017) Por otra parte Michael J. Lysagth director de centro de ingeniería biomédica de la facultad de Medicina de la Brown University y responsable de las estadísticas de la industria de ingeniería de tejidos menciona que las ventas con respecto a la ingeniería de piel aumentaron de 66 en el año 2000 a 99 en el año 2002, por lo que la inversión en esta rama aumento de un 14% a 675 millones. (Leventon W, 2002)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La mejor combinación del material compuesto que permite alcanzar las propiedades mecánicas que se son similares a la piel humana es: 10:1:0,5 – 1:1 ya que me permitio obtener una resistencia a la tracción promedio de 0,65 MPa, un módulo de elasticidad promedio de 5, 54MPa, similar a la dermis de una persona de una edad de 43 años.

El método de colada en solución que garantiza la homogeneidad de las láminas del material compuesto, es el de redes de polímeros interpenetradas y redes de elastómeros interpenetradas desarrolladas de forma secuencial, lo cual se evidencia con la desviación estándar de 0,03 que posee el material compuesto.

La resistencia a la tracción del material compuesto aumenta a medida que la proporción másica del polidimetilsiloxano disminuye y la proporción másica del politetrafluoruro de etileno incrementa.

El material compuesto obtenido es hidrófobo, no se disuelve en agua, la pérdida de masa es de 0,3% en este solvente y su porcentaje de entrecruzamiento es de 99,66% determinado en agua.

Por otra parte, el material compuesto en presencia de etanol, presenta una pérdida de masa del 1,2% y su porcentaje de entrecruzamiento es de 98,74% en este solvente.

El material compuesto presenta una permeanza mínima de $5,24 \times 10^{-7}$ (gr/Pa.s. m²)

El costo de producción por centímetro cúbico del material compuesto con la mejor combinación (10:1:1:0,5 – 1:1) es de \$0,82 dólares verificando la factibilidad del desarrollo del material compuesto mediante la técnica aplicada ya que el costo de producción según (Yong He, Guang-huai Xue & Jian-zhong Fu) de \$ 2,20 dólares para el año 2014.

5.2. Recomendaciones

Desarrollar una formulación de material compuesto variando el tipo de polímero que actúa como refuerzo, se sugiere emplear polímeros biodegradables como Polihidroxialcanoatos (PHA) ya que en los últimos años se han presentado problemas medioambientales derivados del elevado impacto que los materiales poliméricos procedentes del petróleo.

Sintetizar el material compuesto variando el agente de reticulación de modo tal que se disminuya los puntos entrecruzados y sea más flexible.

Realizar pruebas de solubilidad aplicando otro tipo de solventes o fluidos orgánicos, con la finalidad de observar el hinchamiento del material compuesto.

Realizar el secado del material compuesto por otra técnica más eficiente con el fin de no tener pérdidas de masa, debido a que la manipulación del material durante el secado generó desprendimientos involuntarios.

Realizar un análisis en microscopía electrónica de barrido para determinar el ángulo de contacto de las partículas de politetrafluoruro de etileno que se encuentran reforzando la capa principal de polidimetilsioxano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chamorro, V. V. (2011). *Acabado A Base De Microemulsión De Silicona Como Retardante De Fuego En Las Prendas De Vestir*. Universidad Técnica del Norte , Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Escuela De Ingeniería Textil, Ibarra, Ecuador.
- Camacho Ramírez, A.; Díaz Godoy, A.; Martínez Viera, A.; Calvo Durán, A.; de la Vega Olías, C.; Balbuena Carcía, M.; Nabjeb Alassad, A.; Vega Ruiz, V.;. (2013). Tipos de Biomateriales. Clasificaciones actuales. Tipos de prótesis actuales. *Girugía Andaluza*, 228 - 232.
- Delgado Marlon Andrés Osorio, Leydi Johanna Henao-Tamayo, Jorge Andrés Velásquez Cock, Ana Isabel Cañas Gutierrez, Luz Marina Restrepo Múnera, Piedad Felisinda Gañán Rojo, Robín Octavio Zuluaga Gallego, Isabel Cristina Ortiz Trujillo & Cristina Isabel Cas. (2017). Biomedical applications of polymeric biomaterials. *DYNA*, 241-252.
- Dilon, M. E. (2013). Silicone and Poly (tetrafluoroethylene) Interpenetrating Polymer Networks Brief History, Summary of Recent Developments, and Discussion of Applications. *American Chemical Society, Bio Med Sciences*. doi:10.1021/ba-1994-0239.ch019
- Duffo, G. (2011). Materiales y materia aprima. En G. Duffo, *Biomateriales* (págs. 31 - 44). Ciudad Autónoma de Buenos Aires., Buenos Aires , Argentina : Colección Encuentro Inet.

Escamilla, L. S. (2015). *Propuesta de elaboración a escala laboratorio de implantes tipo piel sintética*. Instituto Politecnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, México.

Garcia, S. (2009). Historia de los polímeros. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 72.

Gordillo, J. (30 de agosto de 2017). *Todo en Polímeros* . Obtenido de contacto@todoenpolimeros.com: recuperado el 12 de junio de 2018 <https://todopolimeros.wordpress.com/2017/08/30/la-reticulacion/>

Qian-Zhi , Z., Bing - Bing, L., Peng-Xian, L., Da-Yong , L., Ping , Y., & De , S. (28 de Diciembre de 2015). Pervaporation of acetone/water mixture by PDMS-PTFE/PVDF composite. *Desalination and Water Treatment*. doi: DOI: 10.1080/19443994.2015.1137785

L.G.Wade, J. (s.f.). Polímeros. En J. L.G.Wade, *Química Orgánica* (pág. 1222). PEARSON.

R. Seghir, S. Arscott. (2015). Extended PDMS stiffness range for flexible systems. *Elsevier*, 33-39. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.04.011>

R., V. (1995). Study of crosslinking density in polydimethylsiloxane networks by DSC. *Science*, 120.

Sierra, R. H. (2013). *Determinación de la Permeabilidad en empaques plasticos*. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de industrias alimentarias , Iquitos, Perú.

Sun, D., Bing-Bing Li, & Zhen-Liang Xu. (2013). "Preparation and characterization of poly(dimethylsiloxane)- polytetrafluoroethylene (PDMS-PTFE) composite membrane for

pervaporation of chloroform from aqueous solution”. *Science Korean J. Chem.*, 2059 - 2067. doi:10.1007/s11814-013-0147-z

Vaca, G. R. (2013). *Análisis comparativo de los procesos de eliminación de recubrimientos antiadherentes fluoropoliméricos en superficies metálicas.*”. Universidad de Málaga, Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación. Córdoba: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga.

Salazar Hernández , C., Salazar Hernadez, M., Pérez Gonzáes, E., Juárez Rios , H., & Carrera Rodríguez, M. (2014). Recubrimiento Antcorrosivo tipo ormisol empleando DBTL como catalizador de policondensación. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 53 - 64.

Sierra, R. H. (2013). *Determinación de la Permeabilidad en empaques plasticos.* Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de industrias alimentarias , Iquitos, Perú.

Tropmann, A., Tanguy, L., Koltay, P., Zengerle, R., & Riegger, L. (2012). Completely Superhydrophobic PDMS Surfaces for Microfluidics. *Lagmuir American Chemical Society*.

V. R, María, (2013). Biomateriales para sustitución y reparación de tejidos. *Departamento de Química Inorgánica y Bioinorganica. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense.*

Van Kuilenburg, J., Masen , M., & Van , E. (2012). Contact modelling of human skin: What value to use for the modulus of elasticity *Journal Engineering Tribology*.

Wang , Z., Volinsky, A., & Gallant, N. (2014). Crosslinking Effect on Polydimethylsiloxane Elastic Modulus Measured. *Journal of Applied Polymer Science*.

- Wang, Z. (2011). Polydimethylsiloxane Mechanical Properties Measured by Macroscopic Compression and Nanoindentation Techniques . *University of South Florida Scholar Commons, University of South Florida, zwang3@mail.usf.edu.*
- Yong He, H., Guang-huai , X., & Jian-zhong , F. (2014). Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer. *Scientific Reports*. doi:DOI: 10.1038/srep06973
- Wang, Z. (2011). *Polydimethylsiloxane Mechanical Properties Measured by Macroscopic Compression and Nanoindentation Techniques.*
- Wypych, G. (23 de Febrero de 2016). Handbook of Polymers. *Elsevier Copyrights 2016; ChemTec Publishing.*
- Yong He, H., Guang-huai , X., & Jian-zhong , F. (2014). Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer. *Scientific Reports*. doi:DOI: 10.1038/srep06973
- Yurkanis, P. (2008). *Fundamentos de Química Organica.* Parson Prentice Hall
- Zhang, W., wei, S., Yang , J., & Zhong-qi , R. (2010). The Study on Pervaporation Behaviors of Dilute Organic. *Appl Biochem Biotechnol Humana Press.*
- Zamudio, M. M., Villegas Gasca, J., Cervantes Jáuregui, J., & Meléndrez Amavizca, R. (2015). Polixiloxanos: Materiales para aplicaciones de alta tecnología. *XII encuentro, Participación de la mujer en la ciencia.* (págs. 1-6). Guanajuato, México: Division de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Química, Campus Guanajuato. .
- Zhang, Q.-Z., Bing-Bing Li, Peng-Xian Li, Da-Yong Li, & Ping Yang. (2016). Pervaporation of acetone/water mixture by PDMSPTFE/ PVDF composite membrane. *Desalination and Water Treatment*, 1-16. doi:10.1080/19443994.2015.1137785

Zhang, W.-d., Wei Sun , Jing Yang , & Zhong-qi Ren. (2010). The Study on Pervaporation Behaviors of Dilute Organic Solution Through PDMS/PTFE Composite Membrane. *Appl Biochem Biotechnol*, 160, 156 - 167. doi:10.1007/s12010-009-8582-3

ANEXOS



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA E PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita: **CHICAIZA SALAZAR.**

RITHA ISABEL

En la ciudad de Latacunga a los 29 días del mes de enero de 2019.

Ing. Caterine Donoso

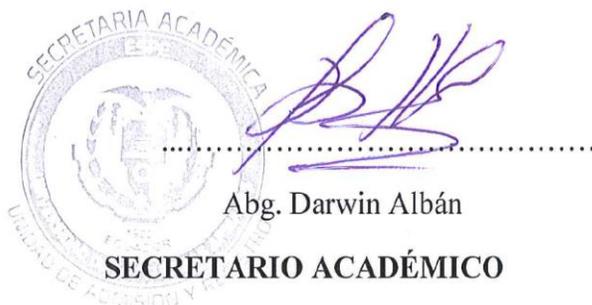
DIRECTORA DEL PROYECTO

Aprobado por:



Dr. Rer. Nat., PhD Roman Rodríguez

DIRECTOR DE LA CARRERA



Abg. Darwin Albán

SECRETARIO ACADÉMICO