

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Análisis y Diseño de Empaques Flexibles Laminados para
envasar alimentos”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Jorge Luis Quintana Pincay

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2007

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente en el Ing. Andrés Rigail Director de Tesis, y al Ing. Ángel Guevara por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANAS

A MI ABUELA

A MIS AMIGOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Eduardo Rivadeneira P.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Andrés Rigail C.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Fabiola Cornejo Z.
VOCAL

Ing. Ángel Guevara L.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Jorge Luis Quintana Pincay

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo determinar los requerimientos básicos de los envases flexibles laminados de polímeros, analizando estos parámetros en función de las propiedades mecánicas, propiedades de barrera al vapor de agua y la vida útil de los productos alimenticios a empacarse.

Esta tesis permitirá una comparación entre los análisis del procesamiento de películas coextruidas realizado por el Ing. Xavier Alarcón. Además se establecerán los ensayos y procedimiento para analizar las propiedades de las los laminados y su relación con los materiales que la conforman. Se analizaran los tipos de adhesivos en las películas utilizados en industria laminadora de empaques plásticos de productos alimenticios varios.

Los objetivos específicos se centran en determinar las propiedades físicas y de barrera básicas de las películas de mayor uso en laminaciones para productos alimenticios del mercado local. Se consideran condiciones ambientales locales para realizar el análisis de las propiedades mecánicas, y

se generan un ambiente adicional controlado para el análisis de las propiedades de barrera. Se realizará un análisis comparativo para encontrar relaciones entre las propiedades mecánicas y propiedades de barrera. También se determinará los tiempos de almacenamiento en condiciones locales de los alimentos locales en los empaques laminados estudiados.

En detalle los capítulos de esta tesis se resumen en lo siguiente:

Capítulo 1: Introducción teórica al mundo de los empaques plásticos, lo que incluye una breve reseña histórica y la metodología básica del diseño de empaque plásticos. Además se incluye los fundamentos teóricos del proceso de laminación, desde los materiales involucrados en el proceso, los adhesivos, los diversos tipos de laminación, las aplicaciones del diseño del empaque y las pruebas respectivas para medir los parámetros de calidad en el producto.

Capítulo 2: Se detalla los procedimientos utilizados para realizar los ensayos según las normas aplicadas, detallando los parámetros medidos y como se relacionan con las propiedades del producto final. Además se revelaran los resultados de las pruebas, los mismos que serán utilizados para el análisis comparativo del este estudio.

Capítulo 3: Se reporta finalmente los resultados obtenidos de los ensayos, analizando comparativamente los resultados con propiedades intrínsecas del material. Además se realizará el estudio comparativo entre el proceso de laminación y el proceso de coextrusión de multicapas, exponiendo las diferencias entre las propiedades básicas en los resultados. Como punto adicional se comparan los resultados con las necesidades de los alimentos que se empacan comúnmente en el medio, utilizando los datos experimentales de la Ing. Fabiola Cornejo.

Capítulo 4: Se concreta el estudio de la tesis con las conclusiones obtenidas de los ensayos, indicando los problemas que surgieron durante el desarrollo de los ensayos para poder sugerir recomendaciones en este tipo de estudios.

Los ensayos serán realizados en los laboratorios de la ESPOL y en la empresa PLÁSTICOS DE LITORAL. Además el Ing. Ángel Guevara de la empresa QUIMIPAC nos asesorará en el desarrollo de la investigación. Con esto se obtiene un estudio real, dejando establecido prácticas a realizarse a futuro en la facultad.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	IV
SIMBOLOGIA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. BASES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS EMPAQUES	5
FLEXIBLES LAMINADOS.....	5
1.1. Introducción Teórica.....	5
1.2. Plásticos de Mayor uso en Empaques.....	18
1.3. Sistemas de Adhesión.....	34
1.4. Conversión, Laminación y Recubrimientos.....	59
1.5. Diseño de Empaques Plásticos.....	70
1.6. Propiedades y Ensayos de las Películas.....	89

CAPÍTULO 2

2. ENSAYOS.....	97
2.1. Datos de los materiales utilizados.....	97
2.2. Ensayo de Tracción y Elongación	98
2.3. Ensayo WVTR.....	102
2.4. Ensayo COF.....	111
2.5. Ensayo de Impacto.....	115

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	121
3.1. Resultados del Ensayo de Tracción y Elongación.....	121
3.2. Resultados del Ensayo WVTR.....	127
3.3. Resultados del Ensayo COF.....	157
3.4. Resultados del Ensayo de Impacto.....	163
3.5. Aplicación del diseño de empaques flexibles laminados.....	164
3.6. Análisis comparativo entre laminación flexible y coextrusión de Polietilenos.....	185

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	203
--	-----

APENDICES

BIBLIOGRAFÍA

SIMBOLOGIA

ASTM	American Standard for Testing Materials
PLASTLIT	Plásticos del Litoral
PE	Poliétileno
PET	Poliéster
LDPE	Poliétileno de baja densidad
HDPE	Poliétileno de alta densidad
LLDPE	Poliétileno Lineal de baja densidad
PP	Polipropileno
PVC	Policloruro de vinilo
APET	Poliéster amorfo
CPET	Poliéster cristalino
PVC	Policloruro de Vinilo
BOPP	Polipropileno biorientado
Met	Metalizado
Plast/Plast	Plástico / plástico
Met C/T	Cara o tratamiento a metalizar
O ₂	Oxígeno
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂ O	Agua
Hg	Mercurio
WVTR	Water Vapor Transmisión Rate (Tasa de Transmisión de Vapor de Agua)
COF	Coefficiente de Fricción
MD	Machina direction (Dirección de la máquina)
TD	Transversal direction (Dirección transversal)
g	Gramo
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro cuadrado
cm ³	Centímetro cúbico
mm	Milímetro
µm	Micra o micrómetro
atm	Atmósfera
MPa	Mega pascal

Kgf	Kilogramo fuerza
kJ	Kilo joule
°C	Grado Celsius
HR	Humedad relativa
Resist	Resistencia
Recorr	Recorrido
Max	Máximo
Min	Mínimo
Prom	Promedio
Comp	Composición
T_g	Temperatura de Vitrificación
T_f	Temperatura de Fusión
t	Tiempo
P	Coefficiente de Permeabilidad
W_F	Peso de falla
E_P	Energía de activación
l	Espesor en micras
P_T	Coefficiente de permeabilidad total de la multicapa
A	Área del empaque
Q o q	Cantidad de H ₂ O ganada o perdida por el producto
Δp	Diferencia de presión en ambos lados del empaque
P_s	Presión de saturación de vapor de agua
HR_{out}	Humedad relativa del ambiente fuera del empaque
HR_{in}	Humedad relativa promedio del interior del empaque
w	Peso de alimento empacado
m_c	Actividad crítica de agua en alimentos
m_o	Actividad inicial de agua en alimentos

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Mayor uso de los plásticos.....	13
Figura 1.2	Familia de los polímeros del Etileno.....	19
Figura 1.3	Zonas en unión adhesiva.....	36
Figura 1.4	Meniscos formados por unión adhesiva.....	37
Figura 1.5	Variables que afectan la fuerza de adhesión.....	42
Figura 1.6	Conducción de calor en sellado por calor.....	47
Figura 1.7	Sellado térmico.....	50
Figura 1.8	Sellado por impulso.....	52
Figura 1.9	Sellado de banda.....	52
Figura 1.10	Sellado por inducción.....	56
Figura 1.11	Mandíbulas de sellado.....	58
Figura 1.12	Recubrimiento por extrusión (a) y Laminación por extrusión (b).....	61
Figura 1.13	Línea de Laminación por extrusión.....	61
Figura 1.14	Laminación Húmeda.....	63
Figura 1.15	Laminación seca.....	63
Figura 1.16	Tipos de Rodillos de recubrimiento.....	64
Figura 1.17	Laminación Térmica.....	66
Figura 1.18	Metalización de películas.....	68
Figura 1.19	Tipo de interacciones en la transmisión de gases.....	74
Figura 1.20	Ley de Henry.....	76
Figura 1.21	Esquema de cálculo de propiedades de barrera.....	80
Figura 1.22	Flujo de vapor de agua en multicapas.....	81
Figura 1.23	Curva de humedad relativa para producto empacado.....	86
Figura 1.24	Requerimientos para cálculo de Shelf Life.....	88
Figura 1.25	Ensayo de tensión / elongación.....	91
Figura 1.26	Ensayo de impacto.....	93
Figura 1.27	Ensayo COF.....	94
Figura 2.1	Máquina de tracción universal.....	99
Figura 2.2	Incubadora.....	103
Figura 2.3	Balanza analítica.....	103
Figura 2.4	Selladora de impulso.....	104
Figura 2.5	Higrómetro / Termómetro.....	104
Figura 2.6	Sellado de Pouches.....	108

Figura 2.7	Pouches sellados.....	108
Figura 2.8	Pouches en incubadora.....	109
Figura 2.9	Pouches en cuarto acondicionado.....	109
Figura 2.10	Esquema de equipo medidor de COF.....	112
Figura 2.11	Balanza analítica.....	117
Figura 2.12	Máquina de impacto al dardo.....	118
Figura 2.13	Abrazadera anular.....	118
Figura 2.14	Dardo y pesas.....	119
Figura 2.15	Configuración de dardo y pesas.....	119
Figura 2.16	Recipiente soporte con protector.....	120
Figura 3.1	Resistencia MD y TD.....	125
Figura 3.2	Elongación MD y TD.....	126
Figura 3.3	Curva Q/t para L1 @ 38° C.....	130
Figura 3.4	Curva Q/t para L2 @ 38° C.....	131
Figura 3.5	Curva Q/t para L3 @ 38° C.....	132
Figura 3.6	Curva Q/t para BOPP 20 @ 38° C.....	133
Figura 3.7	Curva Q/t para BOPP 30 @ 38° C.....	134
Figura 3.8	Curva Q/t para Nylon @ 38° C.....	135
Figura 3.9	Curva Q/t para L1 @ 21° C.....	136
Figura 3.10	Curva Q/t para L2 @ 21° C.....	137
Figura 3.11	Curva Q/t para L3 @ 21° C.....	138
Figura 3.12	Curva Q/t para BOPP 20 @ 21° C.....	139
Figura 3.13	Curva Q/t para BOPP 30 @ 21° C.....	140
Figura 3.14	Curva Q/t para Nylon @ 21° C.....	141
Figura 3.15	Curva Q/t para L1 @ 34.6° C.....	142
Figura 3.16	Curva Q/t para L2 @ 34.6° C.....	143
Figura 3.17	Curva Q/t para L3 @ 34.6° C.....	144
Figura 3.18	Curva Q/t para BOPP 20 @ 34.6° C.....	145
Figura 3.19	Curva Q/t para BOPP 30 @ 34.6° C.....	146
Figura 3.20	Curva Q/t para Nylon 25 @ 34.6° C.....	147
Figura 3.21	Curva Q/t para L1 @ 21° C.....	148
Figura 3.22	Curva Q/t para L2 @ 21° C.....	149
Figura 3.23	Curva Q/t para L3 @ 21° C.....	150
Figura 3.24	Curva Q/t para BOPP 20 @ 21° C.....	151
Figura 3.25	Curva Q/t para BOPP 30 @ 21° C.....	152
Figura 3.26	Curva Q/t para Nylon 25 @ 21° C.....	153
Figura 3.27	Coeficiente de permeabilidad (PX10 ⁷) @ 38° C.....	154
Figura 3.28	Coeficiente de permeabilidad (PX10 ⁷) @ 21° C.....	154
Figura 3.29	Coeficiente de permeabilidad (PX10 ⁷) @ 34.6° C.....	155
Figura 3.30	Coeficiente de permeabilidad (PX10 ⁷) @ 21° C.....	155
Figura 3.31	Coeficientes de fricción externos (Laminaciones).....	160
Figura 3.32	Coeficientes de fricción internos (Laminaciones).....	160
Figura 3.33	Coeficientes de fricción Plast / Plast (Material).....	161
Figura 3.34	Coeficientes de fricción Met C/T (Material).....	161

Figura 3.35	Impacto al dardo.....	163
Figura 3.36	Variación de permeabilidad con la temperatura L1.....	165
Figura 3.37	Variación de permeabilidad con la temperatura L2.....	166
Figura 3.38	Variación de permeabilidad con la temperatura L3.....	166
Figura 3.39	Variación de permeabilidad con la temperatura BOPP 20..	167
Figura 3.40	Variación de permeabilidad con la temperatura BOPP 30..	167
Figura 3.41	Variación de permeabilidad con la temperatura Nylon 25..	168
Figura 3.42	Isoterma de absorción para cereal de trigo.....	171
Figura 3.43	SHELF LIFE para cereal de trigo.....	178
Figura 3.44	Isoterma de absorción para galletas.....	179
Figura 3.45	SHELF LIFE para galletas.....	180
Figura 3.46	Isoterma de absorción para papas chips.....	181
Figura 3.47	SHELF LIFE para papas chips.....	182
Figura 3.48	SHELF LIFE para agua.....	184
Figura 3.49	COF vs. Permeabilidad.....	187
Figura 3.50	Resistencia vs. Permeabilidad.....	189
Figura 3.51	Elongación vs. Permeabilidad.....	190
Figura 3.52	Peso de falla vs. Permeabilidad.....	191
Figura 3.53	Propiedades Mecánicas.....	192
Figura 3.54	Impacto al Dardo.....	194
Figura 3.55	Resistencia MD y TD.....	195
Figura 3.56	Elongación MD y TD.....	196
Figura 3.57	Permeabilidad.....	197
Figura 3.58	Comparativo de SHELF LIFE para cereal de trigo.....	199
Figura 3.59	Comparativo de SHELF LIFE para galletas.....	200
Figura 3.60	Comparativo de SHELF LIFE para papas chips.....	201
Figura 3.61	Comparativo de SHELF LIFE para agua.....	202

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Fecha de introducción para algunos plásticos.....	10
Tabla 2	Propiedades del LDPE.....	20
Tabla 3	Rango de pesos moleculares para los Polietilenos Lineales.....	21
Tabla 4	Propiedades del HDPE.....	24
Tabla 5	Variación de propiedades de barrera con la densidad....	25
Tabla 6	Variación de propiedades generales con el peso, distribución molecular y densidad.....	26
Tabla 7	Diferencias entre el PP orientado y el PP no orientado...	28
Tabla 8	Propiedades del Nylon.....	31
Tabla 9	Propiedades del PET.....	32
Tabla 10	Propiedades de algunos plásticos.....	33
Tabla 11	Coefficientes de permeabilidad a 25° C y Energía de Activación.....	84
Tabla 12	Presión de saturación de vapor de agua.....	87
Tabla 13	Resumen de métodos de ensayo WVTR.....	95
Tabla 14	Temperaturas de ensayo WVTR.....	96
Tabla 15	Datos de los materiales utilizados.....	98
Tabla 16	Dimensiones de las muestras para ensayo de tensión...	100
Tabla 17	Dimensiones de los Pouches (Desecante en polvo).....	110
Tabla 18	Dimensiones de los Pouches (Desecante en granos).....	111
Tabla 19	Ensayo de Tracción y Elongación de L1.....	122
Tabla 20	Ensayo de Tracción y Elongación de L2.....	122
Tabla 21	Ensayo de Tracción y Elongación de L3.....	123
Tabla 22	Ensayo de Tracción y Elongación de BOPP 20.....	123
Tabla 23	Ensayo de Tracción y Elongación de BOPP 30.....	124
Tabla 24	Ensayo de Tracción y Elongación de Nylon 25.....	124
Tabla 25	Peso ganado (gramos) por el desecante en polvo debido a la permeación de vapor de H ₂ O @ condiciones 38° C, 42,75% HR.....	127
Tabla 26	Peso ganado (gramos) por el desecante en polvo debido a la permeación de vapor de H ₂ O @	128

	condiciones 21° C, 47.3% HR.....	
Tabla 27	Peso ganado (gramos) por el desecante en granos debido a la permeación de vapor de H ₂ O @ condiciones 34,6°C, 42,75% HR.....	128
Tabla 28	Peso ganado (gramos) por el desecante en granos debido a la permeación de vapor de H ₂ O @ condiciones 21°C, 42.75% HR.....	129
Tabla 29	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR).....	130
Tabla 30	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR).....	131
Tabla 31	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR).....	132
Tabla 32	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR).....	133
Tabla 33	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR)....	134
Tabla 34	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR).....	135
Tabla 35	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	136
Tabla 36	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	137
Tabla 37	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L3 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	138
Tabla 38	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)...	139
Tabla 39	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)...	140
Tabla 40	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	141
Tabla 41	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR).....	142
Tabla 42	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR).....	143
Tabla 43	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de L3 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR).....	144
Tabla 44	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR).....	145
Tabla 45	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR).....	146

	% HR).....	
Tabla 46	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR)..	147
Tabla 47	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	148
Tabla 48	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	149
Tabla 49	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua de L3 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	150
Tabla 50	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)...	151
Tabla 51	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)...	152
Tabla 52	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR).....	153
Tabla 53	Coefficientes de Fricción de L1.....	157
Tabla 54	Coefficientes de Fricción de L2.....	158
Tabla 55	Coefficientes de Fricción de L3.....	158
Tabla 56	Coefficientes de Fricción de BOPP 20.....	158
Tabla 57	Coefficientes de Fricción de BOPP 30.....	159
Tabla 58	Coefficientes de Fricción de Nylon 25.....	159
Tabla 59	Prueba de Impacto al Dardo.....	163
Tabla 60	Energía de Activación EP.....	165
Tabla 61	SHELF LIFE para cereal de trigo empacado en material L1.....	172
Tabla 62	SHELF LIFE para cereal de trigo empacado en material L2.....	173
Tabla 63	SHELF LIFE para cereal de trigo empacado en material L3.....	174
Tabla 64	SHELF LIFE para cereal de trigo empacado en material BOPP 20.....	175
Tabla 65	SHELF LIFE para cereal de trigo empacado en material BOPP 30.....	176
Tabla 66	SHELF LIFE para cereal de trigo empacado en material Nylon 25.....	177
Tabla 67	SHELF LIFE para cereal de trigo en días.....	178
Tabla 68	SHELF LIFE para galletas en días.....	181
Tabla 69	SHELF LIFE para papas chips en días.....	182
Tabla 70	SHELF LIFE para agua en días.....	183
Tabla 71	Composición de las películas plásticas coextruidas y laminadas.....	185
Tabla 72	Propiedades de películas laminadas.....	186
Tabla 73	Propiedades de materia prima.....	187
Tabla 74	Propiedades de películas coextruidas.....	193

Tabla 75	SHELF LIFE para cereal de trigo en días.....	198
Tabla 76	SHELF LIFE para galletas en días.....	199
Tabla 77	SHELF LIFE para papas chips en días.....	200
Tabla 78	SHELF LIFE para agua en días.....	201

INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como objetivo determinar los requerimientos básicos de los envases flexibles laminados de polímeros, analizando estos parámetros en función de las propiedades mecánicas, propiedades de barrera al vapor de agua y la vida útil de los productos alimenticios a empacarse, estableciendo una relación entre ellas. Esta inquietud nació de las necesidades de la industria alimenticia que utiliza un sinnúmero de materiales para empacar sus productos, los que necesitan cumplir con requisitos para poder mantener un producto apto para el consumo humano. Entre los materiales de mayor uso se encuentran los plásticos, los mismos que pueden ser procesados por coextrusión o por laminación, siendo el último proceso el motivo de estudio de la tesis. Esta tesis permitirá una comparación entre los análisis del procesamiento de películas coextruidas realizado por el Ing. Xavier Alarcón. Además se establecerán los ensayos y procedimiento para analizar las propiedades de los laminados y su relación con los materiales que la conforman.

La importancia de este estudio se centra en la falta de identidad de los procedimientos de embalaje para los productos alimenticios ecuatorianos. Las industrias ecuatorianas no diseñan el procesamiento de películas plásticas, simplemente optan por utilizar los diseños ya elaborados por los países desarrollados o acogen las sugerencias del proveedor de los equipos

utilizados para el embalaje. Este comportamiento afecta a calidad del producto, ya que ni las condiciones del medio ambiente, ni las características de los alimentos son generales alrededor del mundo. Cada región tiene su propio clima y alimentos con diferentes requerimientos para permanecer aptos al consumo, por lo que al utilizar parámetros ajenos a nuestro medio, ponemos en riesgo la calidad de los alimentos y consecuentemente la salud de sus consumidores. Adicionalmente este campo de investigación generará plazas de trabajo para el desarrollo de diseños de empaques aptos para los alimentos ecuatorianos, sin tomar en cuenta la optimización en el uso de materiales, la misma que genera una reducción de costos en la industria plástica y aseguran la conservación de los productos para la industria alimenticia.

La industria de embalaje plástico ha desarrollado varios métodos experimentales para medir las propiedades intrínsecas del material. Los métodos de medición de estas propiedades han sido desarrollados y actualizados por organizaciones como la ISO y ASTM. Estos métodos se los puede clasificar de acuerdo a las propiedades que miden en cada uno de los ensayos. Los ensayos de Envejecimiento, se mide el cambio de propiedades mecánicas con el paso del tiempo. Se somete las muestras a condiciones de desgaste y se compara los resultados con muestras sin tratamiento. Los ensayos mecánicos, de Dureza, Físicos, Termales y de Impacto son los más

comunes en el medio. Estos establecen los parámetros para que los empaque soporten la transportación y el manejo de los mismos antes de llegar a las manos del consumidor. Los ensayos mecánicos aportan también información para establecer un diseño económico del empaque, es decir, sólo se utiliza el material necesario para cumplir con los requisitos del mercado, sin sobredimensionar el empaque ni los costos de su fabricación.

Los ensayos ópticos, miden los parámetros de luminosidad, transparencia, entre otras propiedades, las mismas que destacan la imagen del empaque. Estas propiedades son importantes en el mercadeo y comercialización del producto. Un empaque visible y llamativo, que permita mostrar el contenido y como logra conservarse pueden ser características muy importantes para poder comercializar un producto. Otros ensayos importantes son los ensayos de transferencia a través del material de empaque. Ciertos productos necesitan la presencia y recirculación de componentes o elementos del ambiente, por lo que la transferencia de vapor o gases a través del empaque es un parámetro importante en el diseño. Otros productos necesitan un aislamiento de la mayor cantidad de elementos, donde la permeabilidad del material juega un rol importante en el diseño.

Finalmente existen ensayos eléctricos y químicos, los que varían las aplicaciones de los materiales utilizados para empacar diversos productos,

muy aparte de alimentos. La resistencia eléctrica y química pueden ser factores muy importantes a considerar durante el embalaje de materiales tóxicos o de riesgo eléctrico, por lo que estos ensayos ayudan a establecer medidas de seguridad para el manejo de estos productos. Los ensayos químicos pueden ser aplicados a la industria alimenticia, ya que no todos los productos tienen el mismo tipo de reacción química

Todos los ensayos están contemplados en las normas ASTM en la sección D y E. Utilizaremos las normas más comunes del medio para realizar los ensayos que nos permitan realizar el estudio comparativo de la industria de plásticos en el mercado local.

CAPÍTULO 1

1. BASES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS EMPAQUES FLEXIBLES

1.1. Introducción Teórica

Reseña Histórica:

Desde que el hombre se dio cuenta de la necesidad de preservar, transportar o proteger algunas de sus más preciadas posesiones, empezó a buscar diversas formas de hacerlo y para ello utilizó los materiales que estaban en ese entonces a su alcance como la madera, vejigas de algunos animales, pieles, cueros, hojas de árboles etc. Con el pasar de los siglos, nuevos avances y técnicas introdujeron otros materiales con los cuales se podían elaborar diferentes tipos de envases y embalajes, entre ellos son notorios el vidrio, telas y lienzos, cartón y papel y combinaciones entre madera, telas y cartones, para buscar otras características a sus nuevos embalajes.

El incremento en la población derivó en el nacimiento de las industrias necesarias para lograr producir una cantidad mucho mayor a la que se obtenía con la producción doméstica o artesanal, y poder así satisfacer las necesidades de un mayor número de personas. Esto aceleró el comercio entre ciudades vecinas y para intercambiar lo que las industrias vecinas producían, se buscaron mejoras en el transporte ya sea por tren, carretera, mar, ríos, lagos y últimamente por avión. El transporte pasó entonces a convertirse en uno de los factores más importantes a tener en cuenta, a fin de garantizar el abastecimiento, por lo que cada vez era de mayor necesidad, transportar con eficiencia y menor costo. El empaque tradicional era demasiado pesado y voluminoso, además no brindaba suficiente protección. Eran necesarios embalajes y empaques más livianos y resistentes.

En la era moderna, con la llegada de la industria petroquímica, se desarrollaron nuevos materiales que unido a nuevas técnicas en maquinarias y resinas dieron como resultado un universo de posibilidades para elaborar empaques más livianos, resistentes, económicos, adecuados para contener una enorme variedad de líquidos o sustancias secas, que cumplen con estrictas normas de

calidad. Esta nueva tecnología es la que se ha venido llamando Empaque Flexible.

La principal diferencia entre un empaque tradicional y un empaque flexible, radica precisamente en la cualidad de este último de no ser rígido, además por el tipo de materiales usados, se logra una mejor protección de sus contenidos. Entre los materiales rígidos y semi-rígidos que se usan actualmente encontramos al vidrio, el cual es en algunos casos, insustituible, ya sea por las características del contenido, o por cuestiones de imagen de producto. Otro importante material para envases rígidos es la hojalata, pero en muchos casos es sustituida por el aluminio y también por materiales compuestos y flexibles. Por último mencionaremos el cartón y a la madera que son aún bastante utilizados como material de embalaje y que tendrá todavía algunos usos que hacen que difícilmente puedan ser desplazados.

El envase flexible en la actualidad se encuentra constituido principalmente por los plásticos o combinaciones de estos materiales con otros. El primer plástico creado por el hombre, una forma de nitrato celuloso, fue preparado por A. Parker y mostrado en la Gran Exhibición Internacional en Londres en 1862. Inicialmente fue creado

para reemplazar materiales naturales como el marfil y fue llamado "Parkesina". En 1840, Goodyear y Hancock desarrollaron el procedimiento de "vulcanización" que eliminaba la superficie pegajosa y le brindaba mayor elasticidad al caucho natural. El cambio de propiedades del caucho natural fue obtenido al añadir polvos sulfurosos que producían enlaces químicos adicionales en el caucho bruto.

En 1851 se comercializó el caucho duro o Ebonita. En 1870 se emitió una patente por J. Hyatt, para el celuloide, un tipo de nitrato de celulosa con bajo contenido de nitrato, producido a elevada temperatura y presión. Este fue el primer plástico comercializado y el único hasta el desarrollo de la Bakelita en 1907. La Bakelita es el plástico sintético puro más antiguo, consistía de resinas obtenidas por la reacción de fenol y formaldehído.

La naturaleza exacta de los plásticos, cauchos y materiales similares no fue conocida sino hasta 1920, cuando H. Staudinger propuso la idea revolucionaria que relacionaban a todos los plásticos, cauchos y materiales como la celulosa, como polímeros o macromoléculas. La naturaleza de los plásticos, caucho y materiales similares era muy confusa, se consideraba que los pesos moleculares para estos

sistemas eran demasiado elevados, por lo que se los consideraba como sistemas coloidales que consistían de suspensiones estables de moléculas pequeñas. Staudinger propuso que todas las sustancias de peso molecular elevado conocidas como polímeros eran en realidad macromoléculas formadas por enlaces covalentes. La teoría de Staudinger proponía que los polímeros consistían de largas cadenas donde los monómeros (bloques de construcción) estaban conectados por enlaces covalentes. Esta propiedad única de los polímeros son la consecuencia de peso molecular alto y las largas cadenas de las macromoléculas. Esta teoría no fue aceptada en sus inicios pero le valió el premio Nóbel en 1953.

Después de 1930 el crecimiento en el número de polímeros y sus aplicaciones se incrementó de manera colosal. Fue durante esta década que las compañías de industrias químicas iniciaron las investigaciones en esta rama, que tendría un impacto tremendo en la sociedad. Un claro ejemplo fue el trabajo de la compañía DuPont & Nemours, que desarrollaron diversos materiales poliméricos de estructuras definidas e investigaron como la estructura de estos materiales cambiaban sus propiedades. En 1939 esta investigación resultó en la comercialización del Nylon.

En 1930 la Industria Química Imperial desarrollo un proceso comercial para la síntesis del polietileno. En 1955, K. Ziegler en Alemania y J. Natta en Italia, desarrollaron un proceso de producción de polietileno a bajas temperatura y presión usando una catálisis especial. Este desarrollo les significó el premio Nóbel en 1964 para Ziegler y en 1965 para Natta. En la tabla 1 se muestra la fecha de introducción de diversos materiales plásticos.

TABLA 1			
FECHA DE INTRODUCCIÓN PARA ALGUNOS PLÁSTICOS:			
Fecha	Polímero	Fecha	Polímero
1907	Resinas de Fenol-formaldehídos	1947	Epóxicos
1927	Policloruro de Vinilo (PVC)	1948	Resinas ABS
1927	Acetato de Celulosa	1952	Polietileno lineal
1930	Caucho de Estireno-Butadieno	1955	Polipropileno
1936	Polimetilo-Metacrilato	1957	Policarbonato
1936	Poliacetato de Vinilo (PVA)	1957	LLDPE
1938	Poliestireno	1964	Resinas de ionómeros
1938	Nylon 66	1965	Poliamidas
1939	Policloruro de Vinilideno	1970	Elastómeros moldeables
1941	Politetrafluoretileno	1972	Copolímeros Acrilonitrilo
1942	Poliéster sin saturar	1972	Etileno Vinilo Alcohol
1942	Polietileno ramificado	1974	Poliamidas aromáticas
1943	Caucho Butilo	1978	PET
1943	Nylon 6	1985	Polímeros de cristal líquido
1943	Fluoropolímeros	1992	Polímeros de metaloceno
1943	Siliconas	1994	PEN

Rol del Plástico en el Embalaje:

Se utiliza el término plástico en vez de polímero para indicar una categoría específica de materiales de alto peso molecular, que puede ser formado usando combinación de calor, presión y tiempo. Todos los plásticos son polímeros, pero no todos los polímeros son plásticos. A lo largo de esta investigación se discutirá la utilización de los plásticos en el embalaje de materiales, además del uso de adhesivos, que también son polímeros pero no necesariamente son plásticos, y su importancia en el embalaje.

El embalaje comenzó con materiales naturales como las hojas. A partir de esto, su progreso avanzó con la utilización de recipientes tejidos y alfarería. El vidrio y la madera han sido utilizados alrededor de 5000 años. En 1823, Durand en Inglaterra patentó el “cannister”, el primer recipiente metálico de estaño. La lata de 3 piezas con doble sello se utiliza desde 1900. A partir de este año se incrementó la utilización de papel y cartón. El uso de celofán, que es un polímero no plástico, desplazó el uso de algunos plásticos.

El uso de plásticos en embalaje comenzó luego de la segunda guerra mundial. El Polietileno se comercializó luego de su utilización en la guerra, donde se utilizaba como aislamiento para cables en radares y

equipos de radio de alta frecuencia. Pronto se encontró que era muy fácil dar formas variadas a este material, por lo que sus aplicaciones se expandieron y fueron reemplazando al papel y otros materiales de embalaje. El mayor factor que derivó su expansión fue la necesidad de obtener en paquete de embalaje transparente y de fácil cierre. Hoy en día sigue siendo el plástico de mayor uso para embalaje debido a su bajo costo, propiedades versátiles y facilidad de manufacturación.

El crecimiento del embalaje con plásticos se aceleró hacia el año 1970, debido a la principal característica de los plásticos, su baja densidad. Su baja densidad lo hace atractivo debido a los ahorros en peso, que se reflejan en disminución en los costos de transportación. Adicionalmente los plásticos son de menor espesor que los materiales de embalaje anteriores como el metal, vidrio, papel y cartulina. Aparte del ahorro que representa el uso de plásticos en el embalaje de materiales, otro factor importante para su uso es su baja temperatura de fundición, mucho menor a la del vidrio y el metal, por lo que se necesita menos energía para su producción. En la figura 1.1 se muestran los mayores usos para la industria de plásticos.

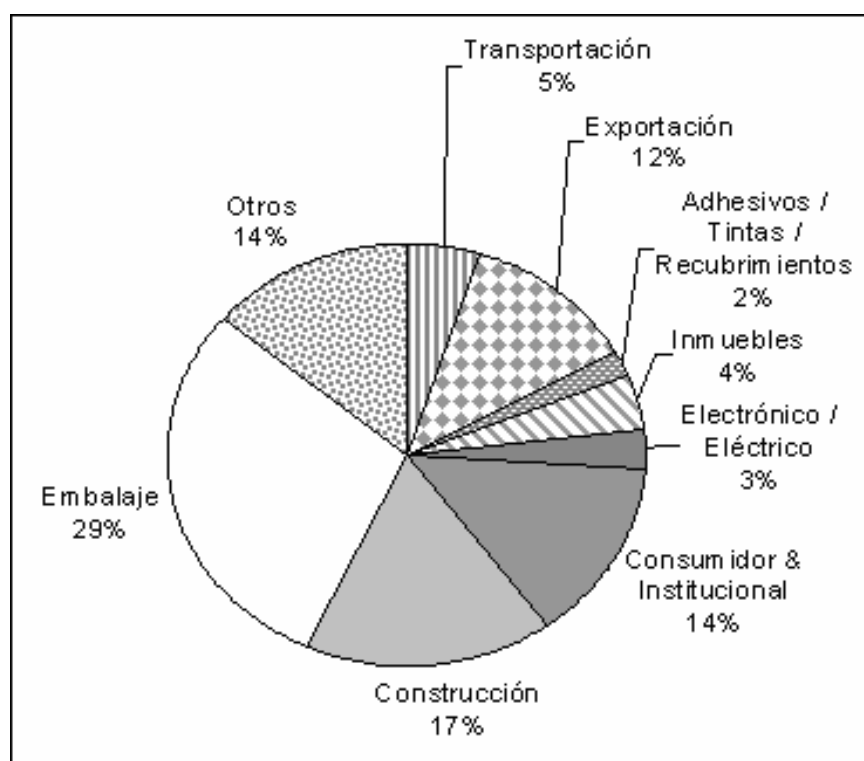


FIGURA 1.1. MAYOR USO DE LOS PLÁSTICOS.

Muchas de las primeras aplicaciones de los plásticos fue el empaque de alimentos. La sustitución del papel en los empaques flexibles dio como resultado el desarrollo y nuevas combinaciones de materiales, y el uso de diversos polímeros juntos para obtener el beneficio de muchos de sus atributos. El desarrollo del empaque flexible para alimentos tomo fuerza al final de la década de 1940, a medida que emergieron los alimentos preparados. El uso de materiales mixtos como cartón y polietileno en los empaques de leche sustituyendo al vidrio comenzó en la década de 1950. El factor principal de estos cambios fue la economía, debido que el vidrio es más costoso en muchos sentidos, como materia prima, fabricación y durabilidad.

Además la fragilidad del vidrio presenta la necesidad de limpieza cuidadosa, y los envases retornables pueden ser motivo de contaminación o la necesidad de limpieza con equipos especiales.

En el campo de embalaje industrial, los plásticos tuvieron su primera aparición con el uso de sacos de paredes múltiples en embarques para reemplazar los embarques en bruto. Una vez más el material predominante fue el polietileno, donde su mayor aplicación fue en la manufactura de sacos de 110 lb. (50 kg). El sello de polietileno protege el cemento de la humedad que puede causar la solidificación. Otro uso industrial de los plásticos es como amortiguamientos (cojines) para proteger bienes de vibraciones y golpes durante su transportación. El poliestireno, poliuretano y espumas de polietileno en conjunto con otros polímeros se utilizan como cojines, dejando de lado los amortiguamientos hechos de papel.

El área medicinal es otro campo importante para los plásticos. Las técnicas de conversión han avanzado a tal punto que se puede moldear productos quirúrgicos a precios muy bajos, por lo que desplazaron de gran manera el uso de vidrio en aplicaciones medicinales. Se utiliza también para crear contenedores

termoformados para varios instrumentos. Este uso gano importancia debido a la facilidad de esterilizar su contenido luego de estar sellados, sin correr riesgos de recontaminación después de la esterilización.

La crisis energética de la década de 1970 causó los primeros ataques a la utilización de los plásticos, ya que eran derivados del preciado petróleo, pero resultó en un factor que aumento su uso debido al ahorro de combustible en la transportación de materiales. Los empaques rígidos fueron desplazados por empaques plásticos flexibles, con el claro ejemplo de la botella plástica de bebidas.

Las preocupaciones medioambientales al final de la década de 1980 causadas por la acumulación de desperdicios, hizo dudar en el uso de plásticos en embalaje. Las compañías que utilizaban plásticos debieron defender su uso y justificar nuevas aplicaciones. Debido a esta recapitación en el uso de plásticos, las compañías y los gobiernos implementaron normas ambientales para la utilización de estos productos. Las decisiones para utilizar plásticos se basan considerando: requerimientos de protección del material, la imagen en el mercado, el costo, y los problemas medioambientales.

Funciones del Empaque Flexible:

Un empaque de ser capaz de **CONTENER**, evitando que el producto se pierda, ya sea por permeabilidad, o por vía de salida del mismo; debe aislar al producto del medio donde se encuentra, además de facilitar el medio de transportación.

El empaque además debe de **PROTEGER** el producto de contaminación alguna evitando el daño o degradación. Esto permite mantener en buenas condiciones físicas, químicas, así como su sabor, olor y color característico del producto por un tiempo determinado. El contener y proteger están orientados o hacia otra función que es **SUMINISTRAR** el producto al consumidor final un producto de igual calidad a la de los productos frescos o recién preparados.

El empaque debe **COMUNICAR**, las características del producto, facilitando así la identificación de su contenido tanto, informando datos como cantidad, tipo, modo de uso e instruye al consumidor la preparación del producto en caso de necesitar indicaciones especiales. Otra función relacionada con la comunicación es **DIFERENCIAR**, la misma que identifica al fabricante, su marca y calidad. Esto facilita las preferencias del consumidor, además

permite apreciar los beneficios del mercadeo. En la actualidad estas funciones son muy importantes debido a la fuerte competencia entre productos, la misma que desarrolla otros campos como el mercadeo y mejora también los estándares de calidad para atraer a los consumidores.

Para determinar la función del empaque debemos considerar los parámetros que requiere el producto, entre los cuales enumeramos los siguientes:

- Naturaleza del producto, es decir su composición y su forma de actuar ante agentes externos.
- El tamaño y la forma.
- El peso y la densidad.
- Su fragilidad
- Su dureza.
- Efecto de la humedad y la temperatura, como afecta al producto.
- Compatibilidad con el producto, evitando alteraciones por el tipo de material de empaque.

1.2. PLÁSTICOS DE MAYOR USO EN EMPACADO

A continuación se describen las características básicas de los plásticos de mayor uso en la industria del empaque.

Polietilenos Ramificados

El polietileno (PE) es el polímero de mayor uso en la industria del empaque, es miembro de la familia de poliolefinas. Olefina era un antiguo sinónimo de alqueno, y fue, originalmente, el nombre que se le dio al etileno. En la industria plástica olefina es un término común que se refiere a la familia de los plásticos basados en etileno y propileno. El término poliolefina se aplica estrictamente a polímeros hechos de alquenos, sean homopolímeros o copolímeros, esto incluye a la familia del polietileno y a la del polipropileno.

El Polietileno es la familia de adición de polímeros basados en etileno. En la figura se muestra un diagrama de la familia de los polímeros basados en el monómero de etileno.

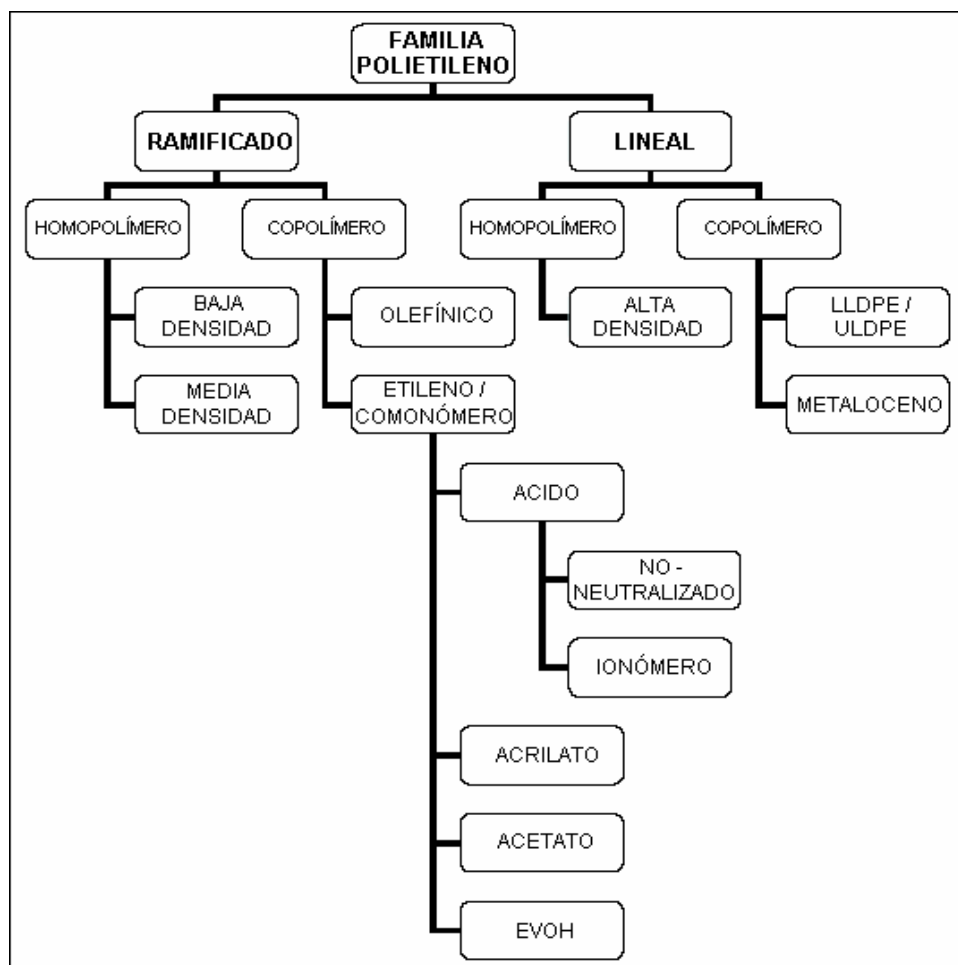


FIGURA 1.2. FAMILIA DE LOS POLÍMEROS DEL ETILENO

Polietileno de baja densidad (LDPE)

El polietileno de baja densidad tiene una estructura ramificada, parcialmente cristalina y es termoplástico, es fabricado bajo altas condiciones de presión y temperatura mediante un proceso de polimerización por radical libre. El LDPE tiene una baja cristalinidad entre 40 a 60% y consecuentemente una baja densidad entre 0.91 a 0.94 g/cm³. Las ramificación de las cadenas en el homopolímero de LDPE le brinda características

deseables como: claridad, flexibilidad, sellabilidad, y fácil procesado. El real valor de todas estas propiedades depende del balance entre su peso molecular, su distribución del peso molecular y ramificaciones. El LDPE es muy versátil, se adapta a todo tipo de procesamiento de extrusión, inyección, etc.; siendo su mayor aplicación y el más utilizado en la producción de películas para empaques, bolsas, fundas, etc. El LDPE se caracteriza por su excelente flexibilidad, buena resistencia al impacto, maquinabilidad, resistencia a aceites, resistencia a químicos, sellabilidad al calor, y bajo costo (cerca de \$1.6/Kg.). Se muestra las propiedades básicas del LDPE en la tabla 2.

TABLA 2	
PROPIEDADES DEL LDPE	
Densidad	0.910 – 0.925 g/cm ³
Tg	-120° C
Tfusión	105° – 115° C
Módulo de Tensión	172 – 517 MPa.
Elongación	100 – 965%
Resistencia al rasgado	200 – 300 g/25 μm
WVTR	375 – 500 gμm/m ² @ 37.8° C, 90% HR
Permeabilidad al O ² , 25° C	163000 – 213000 cm ³ gμm/m ² d atm.
Permeabilidad CO ² , 25° C	750000 – 1060000 cm ³ gμm/m ² d atm.
Absorción de agua	< 0.01%

Poliétilenos Lineales

Los polietilenos de alta densidad (HDPE) están en segundo puesto entre los plásticos de mayor uso en la industria de embalaje. Son producidos de la polimerización del etileno, pero tienen una estructura casi lineal, diferente a la estructura ramificada de los LDPE. Esta propiedad causa una mejor habilidad para cristalizarse, obteniendo un empaque más compacto de moléculas, motivo de la mayor densidad.

Los polietilenos lineales se pueden clasificar de la siguiente manera:

ULDPE – PE de ultra baja densidad (0.89 – 0.915 g/cm³)

LLDPE – PE lineal de baja densidad (0.916 – 0.940 g/cm³)

HDPE – PE de alta densidad (0.940 – 0.965 g/cm³)

HMW-HDPE – PE de alta densidad y alto PM (0.940 – 0.965 g/cm³)

El peso molecular (PM) de los polietilenos lineales se muestra en la tabla 3:

TABLA 3	
RANGO DE PESOS MOLECULARES PARA LOS POLIETILENOS LINEALES:	
Tipo	Peso molecular
Peso molecular medio	< 110000
Peso molecular alto	110000 – 250000
Peso molecular muy alto	250000 – 3500000
Peso molecular ultra alto	> 3500000

Polietilenos de Alta Densidad (HDPE)

El polietileno de alta densidad es un termoplástico no polar de color blanco. Su rango de densidad se encuentra entre 0.940 a 0.965 g/cm³, y tiene una temperatura de fundición que varía entre 128° - 138° C. Es uno de los polímeros más versátiles y el segundo en el uso de plásticos para embalaje.

El empaquetamiento compacto de las moléculas en los HDPE produce una cristalinidad del 65 – 90%, por lo que su nivel de transparencia es muy bajo, y sus propiedades de barrera a la humedad son buenas. El HDPE tiene alta resistencia a varios compuestos químicos. La fuerza de tensión puede llegar alcanzar los 45 MPa, y tiene buena maquinabilidad. Una desventaja del HDPE son las propiedades de barrera contra el oxígeno y compuestos orgánicos. En la tabla 4 se muestra un resumen de las propiedades del HDPE.

TABLA 4	
PROPIEDADES DEL HDPE:	
Densidad	0.940 – 0.965 g/cm ³
T _g	-120° C
T _f	128° – 138° C
Módulo de Tensión	620 – 1089 MPa.
Elongación	10 – 1200%
Resistencia al rasgado	20 – 60 g/25 μm
WVTR	125 gμm/m ² @ 37.8° C, 90% HR
Permeabilidad al O ² , 25° C	40000 – 73000 cm ³ gμm/m ² d atm.
Permeabilidad CO ² , 25° C	200000 – 250000 cm ³ gμm/m ² d atm.
Absorción de agua	< 0.01%

Como sucede con otros polímeros, sus propiedades se ven afectadas por el peso molecular y su distribución. A medida que el peso molecular aumenta, la fuerza de tensión, fuerza de impacto, y resistencia al agrietamiento de tensión, se incrementa.

Un serio problema para el HDPE es el agrietamiento de tensión medioambiental se define como la falla de un material que se encuentra bajo tensión y se expone a una sustancia química, donde ninguna de las condiciones alcanza un valor para afectar el material si es aplicada individualmente. Un alto nivel de cristalinidad aumenta la tendencia de agrietamiento de tensión medioambiental.

Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)

La presencia de comonómeros en la polimerización del etileno produce un polímero lineal, que se denomina Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), o Polietileno de densidad ultra baja (ULDPE), dependiendo de la densidad alcanzada a producirlo. Una presencia mayor de comonómeros durante la polimerización produce un material de menor densidad.

Las propiedades físicas del LLDPE son controladas por su peso molecular y su densidad (0.916 – 0.940 g/cm³). Al tener una estructura más regular y una distribución más estrecha de peso molecular, el LLDPE tiene mejores propiedades mecánicas comparadas con el LDPE, a la misma densidad. El LLDPE tiene mejor resistencia a la tensión, resistencia al rasgado, y mejor elongación que el LDPE, aunque el LDPE posee mejor claridad y brillo, además de mejores propiedades de sellado. El LDPE y el LLDPE son mezclados para optimizar los beneficios de ambos materiales, tales como la fuerza del LLDPE y la sellabilidad del LDPE.

La familia de los de los polietilenos tiene muchas propiedades en común. Las tablas muestran las relaciones entre las propiedades, pesos moleculares y densidades.

TABLA 5		
VARIACIÓN DE PROPIEDADES DE BARRERA CON LA DENSIDAD		
Densidad del polietileno	WVTR	Permeabilidad O ²
g/cm ³	g μm/m ² día	cm ³ μm/m ² día atm
0.910	0.866	275
0.915	0.779	256
0.920	0.685	225
0.925	0.579	201
0.930	0.465	165
0.935	0.366	137
0.940	0.276	205
0.945	0.244	91.3
0.950	0.208	76.4
0.955	0.185	70.1
0.960	0.145	61.0

TABLA 6	
VARIACIÓN DE PROPIEDADES GENERALES CON EL PESO, DISTRIBUCIÓN MOLECULAR Y DENSIDAD	
A medida que el peso molecular aumenta:	
Resistencia a la tensión	aumenta
Resistencia al impacto	aumenta
Claridad	aumenta
Elongación final	aumenta
Resistencia a la fundición	aumenta
Resistencia al rasgado	decrece
A medida que la distribución molecular se expande:	
Elongación final	decrece
Resistencia al rasgado	decrece
Resistencia al impacto	decrece
Presión de fundición	decrece
Resistencia a la fundición	aumenta
A medida que la densidad aumenta:	
Resistencia a la tensión	aumenta
Temperatura de fundición	aumenta
Claridad	decrece
Elongación final	decrece
Resistencia al rasgado	decrece
Resistencia al impacto	decrece
Bloqueo	decrece
Permeabilidad de gas	decrece

Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es producido por polimerización del propileno. El polipropileno se comercializa como PP homopolímero y PP copolímero. El PP copolímero se obtiene mediante una pequeña adición de etileno durante la polimerización (2% – 5%). Los polímeros termoplásticos de PP se caracterizan por su baja densidad (0.89 – 0.92 g/cm³), buena resistencia a los químicos y resistencia a

la fatiga mecánica, incluyendo el agrietamiento de tensión medioambiental.

PP Homopolímero

El PP Homopolímero tiene menor densidad, mayor rigidez y mayor temperatura de fundición que el LDPE y el HDPE. Estas propiedades determinan las aplicaciones del PP Homopolímero. Debido a su facilidad para orientar y alta rigidez, este tipo de PP se utiliza en aplicaciones de estiramiento; además de ser utilizado en contenedores para esterilizar por su alta resistencia a temperaturas elevadas.

El peso molecular del PP se promedia entre 200000 y 600000. Si lo comparamos con el PE, el PP es mucho más sensible a la oxidación causada por el calor y la iluminación. La degradación por oxidación puede causar una incisión en la cadena, reduciendo el peso molecular e incrementando la proporción en el flujo. Para controlar esto, se añaden agentes antioxidantes a la resina. También se utilizan agentes antiestáticos para disipar acumulaciones de cargas estáticas.

El PP tiene excelentes propiedades de barrera contra la humedad y una transparencia media. Su temperatura de fundición está entre 160° y 170° C. También tiene excelentes propiedades de fluidez en un amplio rango de proporciones de flujo, por lo que puede ser procesado con técnicas de soplado o vaciado. El procesamiento puede ser orientado para mejorar las características ópticas y la fuerza del material. En la tabla 7 se muestra las diferencias entre un PP orientado y no orientado.

TABLA 7		
DIFERENCIAS ENTRE EL PP ORIENTADO Y EL PP NO ORIENTADO		
Propiedad	PP no orientado	PP orientado
T _g ° C	-10	
T _f ° C	160 – 175	
WVTR @ 90 HR, 38° C g μm/m ² día	590	240
Resistencia a la tensión MPa	31 – 42	100 – 300
Módulo de tensión MPa	1140 – 1550	Alto
Resistencia al rasgado, g/25μm, film	50	Muy baja CD, Muy alta MD
Sellabilidad al calor	Si, T 177 - 232° C	No, se distorsiona
Densidad g/cm ³	0.902	0.902
Transparencia	Muy buena	Excelente
Adherencia superficial a tintas	Baja	Baja
WVTR g μm/m ² día @ 25° C	100 – 300	
Permeabilidad al O ² cm ³ μm/m ² día atm	146000	98000 50000 – 94000
Permeabilidad al CO ² cm ³ μm/m ² día atm		200000 - 320000
Absorción de agua %	0.01 – 0.03	

PP Copolímero

El PP copolímero contiene de 1.5 a 7% en peso de etileno, como comonómero. La estructura es similar al PP homopolímero con adiciones ramificadas de la inserción de los grupos de etileno. La presencia del etileno previene la alta cristalinidad obtenida en el PP homopolímero. Una menor cristalinidad resulta en una mejor claridad, flexibilidad y una temperatura de fundición menor. La densidad disminuye ligeramente ($0.89 - 0.90 \text{ g/cm}^3$). Este polímero tiene mejor dureza y resistencia al impacto a bajas temperaturas.

El PP copolímero muestra muy buena resistencia química y buenas propiedades de barrera a la humedad. Al igual que el PP homopolímero, el PP copolímero puede ser orientado durante su procesamiento, obteniendo mejora en sus propiedades. Un PP no orientado produce films suaves y fáciles de sellar. Films orientados de PP tienen mejor dureza, brillo y claridad que los films no orientados.

Nylon

El Nylon polímeros de condensación de termoplásticos poliamidas. Son claros, termoformables, fuertes en un amplio rango de temperaturas, con buena resistencia química y buena barrera contra gases, aceite y aromas. El nylon es un material hidrófilo o sensible a la humedad, en condiciones ambientales puede absorber hasta un 8% de su propio peso. Los tipos de Nylon se identifican por números que corresponden al número de átomos de carbono en los monómeros.

El nylon es un polímero de grandes fuerzas intermoleculares debido a los enlaces de hidrógeno presentes en la cadena polimérica. Estos fuertes enlaces combinados con una cristalinidad alta forman materiales termoplásticos de alta temperatura de fundición. Además de su fuerza, el nylon tiene excelente resistencia al rasgado, al impacto y estabilidad térmica. La permeabilidad al oxígeno aumenta a medida que el contenido de agua aumenta. Se puede obtener variedad en la cristalinidad del material, ya que está depende de la temperatura y la velocidad de enfriamiento luego del procesamiento. A mayor velocidad de enfriamiento, disminuye la cristalinidad, que produce materiales de mayor transparencia y mayor facilidad para el termoformado. El nylon orientado biaxialmente mejora su resistencia,

propiedades de barrera y propiedades mecánicas. En la tabla 8 se muestra las propiedades para varios tipos de nylon.

TABLA 8			
PROPIEDADES DEL NYLON			
Propiedad	Nylon 6	Nylon 11	MXD6
Densidad, g/cm ³	1.13 – 1.13	1.03 – 1.05	1.20 – 1.25
Resistencia a tensión, MPa	41.3 – 165	55.1 – 65.4	220 – 230
Resistencia a rasgado, g/25 μ m		400 – 500	
T _f , ° C	210 – 220	180 – 190	64
T _g , ° C	60		243
Elongación, %	300	300 – 400	72 – 76
Permeabilidad O ₂ cm ³ μ m/m ² día atm	470 – 1020	12500	60 – 260
Permeabilidad CO ₂ cm ³ μ m/m ² día atm	3900 – 4700	47500	
WVTR @ 38° C, 90% HR g μ m/m ² día	3900 – 4300	1000 – 2000	
Absorción de agua, %	1.3 – 1.9	0.4	

Poliéster (PET)

Los poliésteres se clasifican como polímeros que contengan uniones de Ester. Pueden ser termoplásticos o termosets, dependiendo de su composición química. Existen varios tipos de poliésteres, pero el de mayor uso es el PET. Este material provee buenas propiedades de barrera contra el oxígeno y el dióxido de carbono, y puede mejorarse con orientación biaxial durante el procesamiento. La mayor aplicación del PET es el envase de bebidas. El PET bi-orientado tiene excelente barrera contra olores, la misma que puede ser

mejorada con recubrimientos de PVC, metalizados u óxidos de silicón. En la tabla 9 se muestra las propiedades básicas del PET.

TABLA 9	
PROPIEDADES DEL PET	
T _g	73 – 80° C
T _f	245 – 265° C
Densidad	1.29 – 1.40 g/cm ³
Rendimiento típico 25 μm (1 mil) film	30 m ² /kg.
Resistencia a tensión	48.2 – 72.3 MPa
Módulo de tensión	2.756 – 4.135 MPa
Elongación	30 - .3000 %
Resistencia al rasgado	30 g / 25 μm
WVTR @ 37.8° C, 90% HR	390 – 510 g μm/m ² día
Permeabilidad O ₂ @ 25° C	1200 – 2400 cm ³ μm/m ² día atm
Permeabilidad CO ₂ @ 25° C	5900 – 9800 cm ³ μm/m ² día atm
Absorción de agua	0.1 – 0.2 % (0.32 cm. grosor, 24 h)

El PET es capaz de cristalizarse en alto grado, pero en un rango de temperatura limitado, por lo que el grado de cristalinidad se ve influenciado por las condiciones del procesamiento. Botellas y láminas de PET suelen tener un grado limitado de cristalinidad y excelente transparencia. Existen grados amorfos de PET (APET) y grado cristalino de PET (CPET), que se obtienen modificando la copolimerización o agregando agentes de nucleación. Los envases de CPET tienen una apariencia opaca blanca y sufre menor deformación bajo tensión, especialmente a elevadas temperaturas,

pero es mucho más quebradizo en bajas temperaturas. La desventaja del PET es su baja resistencia al calor.

En la siguiente tabla se muestra una comparación de las propiedades entre los plásticos de mayor uso en la industria de embalaje.

TABLA 10				
PROPIEDADES DE ALGUNOS PLÁSTICOS				
Propiedad	HDPE	LDPE	PP	PET
Resist. a la tensión MPa	22 – 31	19 – 44	31 – 38	48 – 72
Elongación %	10 – 1200	600	100 – 600	50 – 300
Modulo de Flexión, MPa	1000 – 1600	280 – 410	1170 – 1730	2420 – 3100
Encogimiento de Molde	0.015 – 0.040		0.015 – 0.025	0.003 – 0.005
Claridad	Baja	Nublado	Baja / Alta	Claro
Resistencia al impacto	Buena	Muy buena	Media	Baja
Barrera contra O ₂	Baja	Baja	Baja	Buena
Barrera al vapor de agua	Excelente	Buena	Excelente	Buena
Temp. de distorsión ° C	62 – 91	40 – 44	107 – 121	38 – 129

Existen materiales adicionales utilizados en la industria plástica, los mismos que se detallan en el Apéndice A.

1.3. ADHESIÓN, ADHESIVOS Y SELLADO POR CALOR

Adhesión

Adhesión es el proceso por el que dos cuerpos inicialmente separados (denominados adheridos o sustratos) son unidos por fuerzas intermoleculares. Dos superficies sólidas pueden ser unidas usando una sustancia, generalmente líquida, denominada adhesivo, que es distribuido entre los dos adheridos. Los adhesivos pueden ser formados de sólidos en sí mediante calentamiento y presionándolos firmemente entre sí, como sucede en el sellado por calor de materiales termoplásticos. Alternativamente, el adhesivo puede ser formado usando un solvente para disolver la interfase permitiendo el entremezclado de los sustratos a nivel molecular. La adhesión también está involucrada en el recubrimiento o impresión de un sustrato plano y sólido por un líquido. En todos los casos, la combinación de dos sustratos con o sin adhesivo se convierte en una nueva estructura compuesta, a menudo igual de fuerte que uno de sus componentes. Normalmente, la fuerza se genera a medida que los materiales se solidifican.

Adhesivos

Un adhesivo puede ser definido funcionalmente como cualquier sustancia capaz de sostener dos materiales juntos. El mayor

mecanismo usado para unir plásticos es la fuerza intermolecular, incluyendo las fuerzas de Van der Waals y los enlaces de Hidrógeno. Los enredos físicos pueden ser un factor significativo en la adhesión, especialmente en materiales porosos. Los adhesivos son componentes vitales de muchos empaques.

Cuando los adhesivos se usan para unir dos superficies, estos deben:

- Adherirse a la superficie de cada sustrato (Fuerza de unión adhesiva)
- Proveer suficiente fuerza dentro del volumen del propio adhesivo para reunir los requisitos para la aplicación (Fuerza de unión cohesiva)

Cuando dos sustratos son unidos usando un adhesivo se reconocen cinco zonas diferentes en la estructura final:

- Sustrato cuerpo 1
- Interfase del sustrato 1 y el adhesivo
- Adhesivo
- Interfase del sustrato 2 y el adhesivo
- Sustrato cuerpo 2

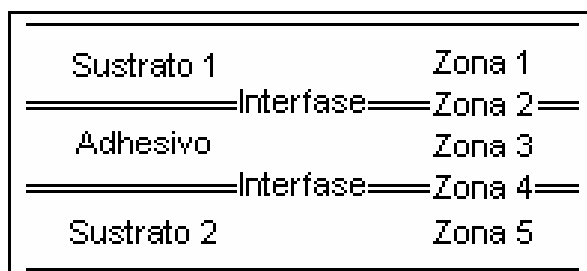


Figura 1.3. ZONAS EN UNIÓN ADHESIVA

Fuerzas de unión adhesiva y cohesiva

Las fuerzas de adhesión se desarrollan en la interfase entre el sustrato y el adhesivo, donde las fuerzas de interfase juegan un rol importante de unir dos superficies. Estas fuerzas se denominan fuerzas adhesivas. Adicionalmente existen fuerzas que dependen de la fuerza e integridad de la estructura unificada que depende de la fuerza en cada material y el volumen de adhesivo. Las fuerzas de atracción intermoleculares actuando dentro del material se denominan fuerzas cohesivas. Las fuerzas cohesivas en un adhesivo depende de su propia estructura intermolecular y no se ven afectadas por la fuerzas de interfase. Por lo tanto, las fuerzas adhesivas determinan la fuerza de unión en la interfase, y las fuerzas cohesivas determinan la fuerza de unión en el adhesivo en bruto y los sustratos unidos.

Las fuerzas adhesivas se deben a la atracción entre moléculas cercanas. Debido a que estas fuerzas requieren una distancia no mayor que 3~5 Å para tener una intensidad razonable, las moléculas

cercanas en la interfase deben estar muy cerca para que se de la adhesión. Durante la aplicación del adhesivo, este debe ser capaz de humedecer toda la superficie de los sustratos y tener una viscosidad lo suficientemente baja para poder fluir y llenar las irregularidades en la superficie de los sustratos. De esta manera el sustrato y el adhesivo estarán cercanamente unidos en una escala molecular.

Para obtener la máxima adhesión, la fuerza de unión adhesiva entre el sustrato y adhesivo debe ser mayor que la fuerza de unión cohesiva del adhesivo.



Figura 1.4. MENISCOS FORMADOS POR UNIÓN ADHESIVA

Fuerza de unión adhesiva

Existen algunos parámetros que son utilizados para adecuar un adhesivo apropiado en un sustrato, entre las que se incluyen están la tensión superficial, solubilidad y viscosidad.

Tensión superficial:

Las superficies sólidas tienen muchas irregularidades, y como la adhesión es un fenómeno superficial, el adhesivo debe cubrir toda la superficie y llenar completamente todos los poros e irregularidades del sustrato durante el momento de la aplicación. Para lograr esto el adhesivo debe ser aplicado en estado líquido o semi-líquido.

Las características de humidificación de una pareja adhesivo/sustrato son determinados por los valores relativos de tensión superficial del adhesivo y el sustrato. La tensión superficial de un líquido es una medida directa de las fuerzas intermoleculares y es la mitad de la energía libre de cohesión molecular. El valor de tensión superficial del sustrato sólido se denomina tensión superficial crítica, γ_c . Para asegurar que el adhesivo humedezca toda la superficie del sustrato debe cumplirse la siguiente condición:

$$\gamma_{adh} < \gamma_c \quad \text{Ecuación 1.1}$$

En la práctica, la tensión superficial del adhesivo debe ser al menos 10 dinas/cm. menor que γ_c .

Parámetro de solubilidad:

Un criterio importante para determinar la compatibilidad química entre sustrato y adhesivo en solvente es el parámetro de solubilidad, δ .

$$\delta = (DEC)^{1/2} = (\Delta E/V)^{1/2} \left[\left(\frac{cal}{cm^3} \right)^{1/2} \right] \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde DEC es la densidad de energía cohesiva, ΔE es la energía de vaporización y V es el volumen molar.

Cuando el sustrato es un componente orgánico y no es muy polar; el parámetro de solubilidad es útil al seleccionar un adhesivo, permitiendo prever adhesivos para una aplicación particular. Según leyes termodinámicas, mientras mayor sea la diferencia entre las solubilidades de dos materiales, estos serán menos compatibles. Consecuentemente, una buena compatibilidad es favorable cuando:

$$\delta_1 \approx \delta_2 \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde δ_1 y δ_2 son los parámetros de solubilidad del adhesivo y el sustrato respectivamente.

Viscosidad:

Se debe considerar la viscosidad del adhesivo debido a que una baja viscosidad nos asegura un rápido esparcimiento del mismo sobre toda la superficie del sustrato. Si la viscosidad del adhesivo es alta dificulta una aplicación homogénea sobre toda la superficie. La viscosidad disminuye con el aumento de temperatura, y aumenta a medida que aumenta el peso molecular promedio.

Estimación de la fuerza de unión adhesiva

La fuerza de unión adhesiva depende de la habilidad del adhesivo para humedecer la superficie del sustrato y su cuantificación depende de la fuerza cortante en la interfase. Se estima con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_{12}}{d} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde γ_1 y γ_2 son las tensiones superficiales del adhesivo y el sustrato, γ_{12} es la tensión superficial en la interfase, y d es la distancia entre las moléculas en la falla donde ocurre de la unión. Esta distancia corresponde aproximadamente a una distancia intermolecular de 5 Å (5×10^{-8} cm.).

Fuerza de unión cohesiva

Los adhesivos son aplicados en forma líquida para mejorar el humedecimiento. Por lo general el estado líquido se logra disolviendo el adhesivo en un solvente, dispersando o emulsionando el adhesivo en agua para producir látex, calentando el adhesivo, o aplicando el adhesivo en forma de monómeros líquidos que reaccionará luego para formar un sólido. Una vez aplicado el adhesivo entre las dos superficies a unirse, este se solidifica al eliminarse el solvente, disminución de la temperatura o esperando el tiempo de curado.

La fuerza de unión cohesiva depende de la naturaleza química y del estado físico del material. La temperatura y peso molecular del adhesivo son factores importantes. Al incrementar el peso molecular de un adhesivo, aumenta la fuerza de unión cohesiva, pero incrementa su viscosidad por lo que disminuye su capacidad de humedecer.

La fuerza de unión cohesiva puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{2\gamma}{d} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Donde S es la fuerza cortante de la unión cohesiva del adhesivo, γ es la tensión superficial del adhesivo, y d es la distancia de separación entre las moléculas de la falla donde se produce la unión, aproximadamente 5 Å.

Un resumen de las variables que afectan la fuerza adhesiva y cohesiva se muestra en la tabla a continuación.

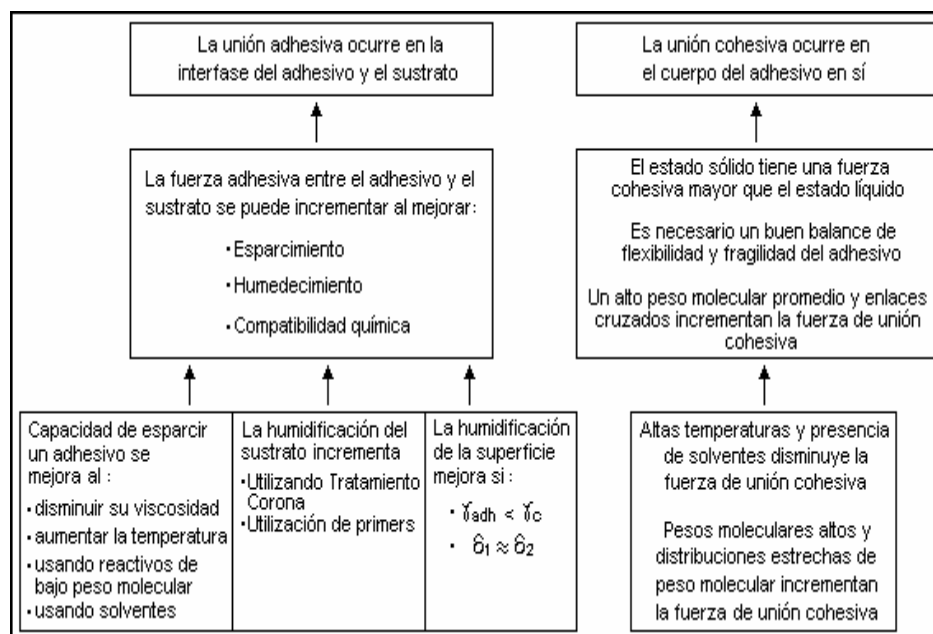


Figura 1.5 VARIABLES QUE AFECTAN LA FUERZA ADHESIVA

Tipos de adhesivos

Los adhesivos se pueden clasificar de diversas maneras. Una categorización común es: reactivos, fusión caliente, base solvente y base acuosa. Otra forma de clasificarlos es: naturales y sintéticos.

Se utilizará la primera clasificación agregando una discusión sobre los adhesivos sensibles a la presión y los adhesivos de sellado frío.

Adhesivos reactivos:

Los adhesivos químicamente activos por lo general involucra la polimerización de componentes de bajo peso molecular aplicados en forma líquida. Esto forma un adhesivo polimerizado con fuerza cohesiva después del curado. El adhesivo es producto de una reacción de condensación donde pequeñas moléculas se reemplazan por bi-productos.

Los adhesivos reactivos se utilizan para unir materiales muy distintos, por lo general son flexibles, y proveen fuerza al rasgamiento. Son de base solvente con buen desprendimiento de solvente durante el curado.

Adhesivos de mezcla caliente

Estos adhesivos son 100% sólidos y no requieren solventes. Necesitan ser aplicados en forma caliente (sobre la temperatura de fundición) para humedecer la superficie del sustrato. Durante el enfriamiento el polímero fundido regresa a su estado sólido, surtiendo buena fuerza cohesiva a la unión. Se solidifica

rápidamente luego de ser aplicado y no reacciona químicamente con el sustrato, por lo que no genera emisiones. Su eficacia en altas temperaturas es muy pobre.

Adhesivos de base solvente

Consisten de una base polimérica disuelta en un solvente orgánico con otros ingredientes necesarios. La fuerza cohesiva en la unión se desarrolla a medida que el solvente se evapora. El contenido sólido es de aproximadamente el 30%. Su uso ha decaído debido a las emanaciones de compuestos volátiles durante el curado.

Adhesivos de base acuosa

Consisten de una base polimérica y otros ingredientes incluidos en una suspensión acuosa en forma de emulsión. Por ser de base acuosa no tienen problemas con las emisiones durante el curado. La fuerza cohesiva se genera en la unión a medida que el agua se evapora. Estos adhesivos se pueden categorizar de dos formas: naturales y sintéticos.

Los adhesivos de base acuosa naturales incluyen el almidón, gomas animales, caseína y caucho natural. Los adhesivos de

base acuosa sintéticos son los más utilizados en empaques a nivel mundial, entre estos la goma blanca común.

Adhesivos sensibles a presión y Re-humectantes

Se utilizan en las etiquetas y cintas, donde generalmente se une el adhesivo a un sustrato y luego de algún tiempo se lo une al segundo sustrato. Entre los adhesivos sensibles a la presión se encuentra el utilizado en la cinta scotch. Los aditivos re-humectantes se aplican desde una base líquida, por lo general como fundiciones calientes, y mantienen su adherencia luego de ser enfriados. Los adhesivos sensibles a la presión se almacenan en tubos o cargadores antes de ser aplicados para mantener su propiedad de adherencia antes de ser utilizados. Los cargadores esta recubierto de un material que permite una fácil remoción, como lo es la silicona. Entre este tipo de adhesivos se destacan los Post-It.

Adhesivos de sello frío

Los adhesivos de sello frío, denominados sustancias co-adhesivas, tienen tendencia a unirse entre ellos, pero no muchas aplicaciones adicionales. Se basan en caucho natural que han

sido aplicados en forma de suspensión de látex (suspensión en agua).

Terminología adhesiva

Los términos más utilizados al referirse a la utilización de adhesivos son:

- **Contenido Sólido:** Se refiere a la cantidad restante de adhesivo que permanece luego que los solventes o líquido cargador es removido. Se representa como porcentaje del peso inicial.
- **Emulsión:** Se refiere a una suspensión adhesiva de sólidos e un fluido, que por lo general es agua.
- **Solución:** Es un adhesivo donde los sólidos han sido disueltos en un solvente orgánico que no sea agua.
- **Tiempo de asentamiento:** Es el tiempo que requiere el adhesivo para formar una unión lo suficientemente fuerte para transportación futura.
- **Tiempo abierto:** Es el tiempo entre la aplicación del adhesivo y la unión entre sustratos. Es una función de maquinarias utilizada en la industria de adhesivos.
- **Rango:** Es el tiempo en el que el adhesivo, una vez aplicado, mantiene aún su adherencia.

- Adherencia: Es cuan pegajoso es un adhesivo, o la habilidad de formar una unión inicial de fuerza luego de que los sustratos se ponen en contacto.
- Bloqueo: Es la unión no deseada entre capas adyacentes.
- Brevedad: Se define como la falta de atadura, entrelazamiento y formación de enlaces durante la aplicación del adhesivo al sustrato.
- Pot Life: Se refiere a la estabilidad del adhesivo, se relaciona con el tiempo de trabajo aceptable en aplicaciones de maquinarias.

Aditivos de adhesivos

Los aditivos comunes en la industria de adhesivos son:

- Adherentes: Promueven las propiedades adherentes de los polímeros termoplásticos, las compatibilidad entre el polímero y el sustrato. La adherencia es la fuerza de unión formada inmediatamente cuando un material se pone en contacto con otra superficie, o adhesión instantánea.
- Solventes: Se utilizan para modificar la viscosidad del adhesivo.
- Llenadores: Son inclusiones sólidas usadas para reducir costos, mejorar la fuerza cohesiva y ayudan a controlar la viscosidad.

- **Primers:** Son recubrimientos aplicados a la superficie de los sustratos antes de aplicar el adhesivo. Se utilizan para mejorar la unión del adhesivo.

Sellado por calor

El sellado por calor es el proceso en el que dos estructuras que al menos contengan una capa termoplástica, son selladas mediante calor y presión. Este proceso se aplica a estructuras de empaques flexibles, semi-rígidas y en algunos casos a estructuras rígidas. Las estructuras flexibles se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo al material empleado en su construcción: estructuras con soporte y sin soporte. Las estructuras con soporte consisten de laminaciones que contengan una o más capas no termoplásticas como papel, unidas al menos a una capa termoplástica que se utiliza para el sellado. Las estructura son soporte consisten de una o más capas termoplásticas que no contienen capas no termoplásticas.

Al sellar estructuras flexibles para hacer empaques, la capa de sello de calor se localiza en la interfase, por lo general haciendo contacto con otra capa de sellado de calor. Cuando se aplican la presión y el calor a la superficie externa para el sello, en calor se transmite por

conducción o radiación hacia el material de empaque, y se transmite por conducción a través de las capas en el sello.

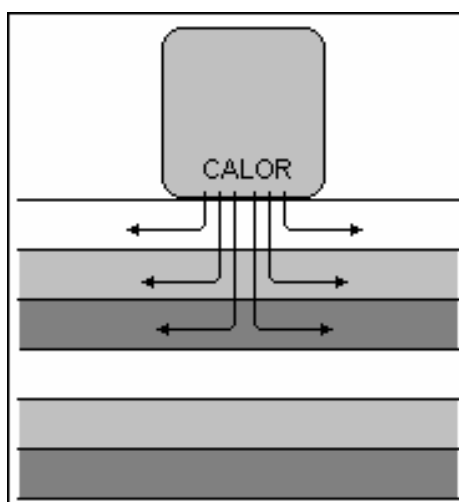


Figura 1.6. CONDUCCIÓN DE CALOR EN SELLADO POR CALOR

El calor en la interfase debe ser suficiente para derretir los materiales de interfase para producir el sello. La presión externa es necesaria para acercar las capas del sello entre ellas, aproximadamente una distancia de 5 Å.

Los métodos de sellado por calor más comunes son los siguientes:

Sellado térmico o de barra:

El sellado térmico utiliza barras calentadas para presionar los materiales a ser sellados, con el calor de las barras a través de los materiales hacia la interfase, fundiendo las capas del sello térmico y fusionándolas. Cuando ha transcurrido el tiempo

suficiente, las barras son retiradas y el material se retira del área de sello. En este punto, los materiales aún están calientes, y el sello no tiene su fuerza completa, pero los materiales son capaces de mantenerse adheridos y aseguran la integridad del sello. Esta habilidad de los materiales se denomina adherencia caliente. La fuerza total del sello se genera cuando el sello se enfría hasta la temperatura ambiente. Una buena formación del sello requiere la correcta combinación de calor, tiempo de establecimiento (el tiempo que los materiales se mantienen entre las barras de sellado) y presión. La falta de estas condiciones refleja una formación de sello no adecuada. El exceso de estas condiciones resultará en un material debilitado. Los bordes de las barras de sellado térmico son redondeadas para prevenir la perforación del material de empacado.

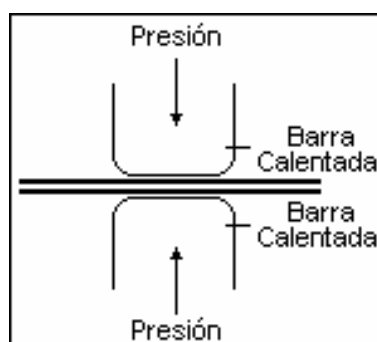


Figura 1.7. SELLADO TÉRMICO

Sellado por impulso

El sellado por impulso usa dos mandíbulas, como las barras de sello, pero en vez de permanecer calientes, estas mandíbulas se calientan de manera intermitente por impulsos de una corriente eléctrica que pasa por un lazo de alambre de nicromo que se encuentran dentro de una o ambas mandíbulas. La corriente causa un calentamiento en el lazo, y el calor se conduce hacia los materiales que se sellan. Luego del paso de la corriente, los materiales entre las mandíbulas se mantienen durante un tiempo establecido para su enfriamiento. Este método permite que materiales con un bajo nivel de adherencia caliente, sean sellados correctamente, y permite remover fácilmente materiales muy sensibles a la temperatura del sello. El sellado por impulso produce un sello más estrecho y de mejor apariencia, pero un poco más débil. El mantenimiento de este equipo suele ser elevado debido al recambio del cable de nicromo. Además necesitan una cinta de fluoropolímero para impedir que el plástico se adhiera a las mandíbulas, la misma que necesita ser cambiada cada cierto tiempo.

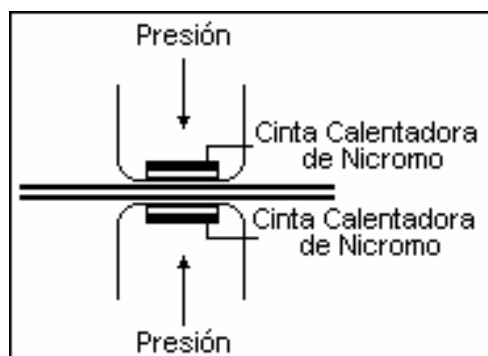


Figura 1.8. SELLADO POR IMPULSO

Sellado de banda

Al igual que el sellado por impulso, el sellado de banda provee una fase de enfriamiento a presión. Este sistema de sellado de alta velocidad utiliza dos banda móviles para surtir presión y transporte los materiales por una estación de calentamiento y luego una estación de enfriamiento. La principal desventaja de este método es la tendencia de arrugas en el sello terminado.



Figura 1.9. SELLADO DE BANDA

Sellado de cable o cuchillo caliente

Este método utiliza un cable o cuchillo para sellar y cortar simultáneamente las películas plásticas. El cable o cuchillo causa

que los sustratos se fusionen al ser empujados durante la acción del corte. Este sello es muy estrecho y casi invisible. Es relativamente débil y no provee una buena barrera contra microorganismos cuando se necesita un sello hermético. Su ventaja es el precio y la agilidad del proceso.

Sellado Ultrasónico

En el sellado ultrasónico, dos superficies se frotran rápidamente entre sí. La fricción genera calor en la interfase, derritiendo las superficies de los sustratos y producen el sello. Debido a que el calor es producido solamente en la zona del sello, este método es muy útil para materiales muy gruesos donde la conducción es ineficiente. También es útil para materiales que no soportan una exposición muy larga de calor.

Sellado de fricción

El sellado por fricción genera el calor por la fricción entre los materiales. Se utiliza para ensamblar dos mitades de materiales plásticos rígidos o semi-rígidos. Las piezas a ser unidas suelen ser circulares en la sección de unión. Se hace rotar una de las mitades contra la otra, mientras la segunda se mantiene fija. Las mitades son diseñadas para calzar con una pequeña interferencia

para crear fricción suficiente y crear la unión. El mecanismo del sello suele tener un sensor que mide la resistencia a la rotación, dejando libre el material cuando alcance un nivel determinado.

Sellado de gas caliente y sellado de contacto

En el sellado de gas caliente, las superficies de sellado se someten a una llama de gas o aire caliente, evitando la necesidad de conducir calor a través de los materiales a unirse. El calor involucrado funde las superficies de sellado, luego los materiales son presionados entre dos mandíbulas de enfriamiento. El sellado de contacto es muy similar al sellado de gas caliente, la diferencia es que la superficie de sellado se calientan mediante una superficie caliente.

Sellado radiante

En el sellado radiante el calor es transferido a las superficies de sellado principalmente mediante radiación, más no por conducción o convección. Este método se utiliza para materiales sensibles a la presión.

Sellado dieléctrico

En el sellado dieléctrico se utiliza un campo de alta frecuencia oscilante para sellar los materiales. Las moléculas polares expuestas al campo tienden a alinearse con la carga eléctrica, oscilando mientras son atraídas de una dirección a la otra. Esto genera calor, fundiendo los materiales y creando el sello.

Sellado magnético

El sellado magnético se basa en una idea similar al sellado dieléctrico, con un campo magnético oscilando, causando que los componentes magnéticos de hierro se alineen con el campo, produciendo calor con la oscilación de las partículas. Los materiales no magnéticos no son afectados. Ya que los componentes magnéticos de hierro son muy raros en el embalaje plástico, este método sólo se utiliza en empaquetaduras o protecciones metálicas que contengan partículas magnéticas de hierro.

Sellado de inducción

El sellado por inducción es método para generar calor cerca de la superficie de sellado. Este utiliza un campo magnético alternante para inducir una corriente eléctrica en cualquier metal alrededor

del sello, el más común en las láminas de aluminio. La corriente calienta la lámina de aluminio y se conduce a través de las siguientes capas de la zona de sellado, creando el sello del contenedor. La estructura original del sello interno, que es la que se utiliza hoy en día, consiste de una capa protectora de sello caliente, adherida a un cartón con cera y un apoyo en el cierre. Cuando el ensamblaje se somete al campo magnético alternante y se induce la corriente en la capa de aluminio, la línea de sello a la botella funde la capa de cera, librando la línea del sello de la tapa. Esto permite una fácil remoción de la tapa al momento del consumo.

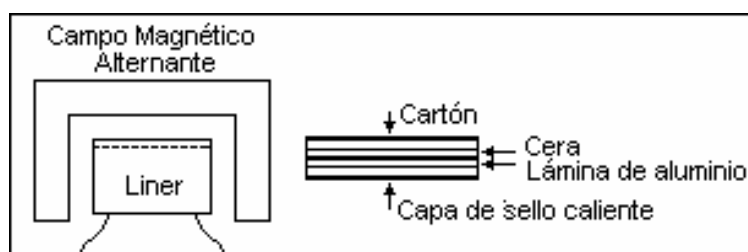


Figura 1.10. SELLADO POR INDUCCIÓN

Sellado de solvente

El sellado por solventes no utiliza transferencia del calor para producir el sello. Si un material plástico es soluble, cuando se añade un solvente en la interfase esto produce una solución que permite la migración de los materiales a través de la interfase. La

remoción del solvente, luego de la migración de materiales y evaporación resulta en la unión de los sustratos. Las superficies son presionadas para alcanzar una buena mezcla en la interfase. En este punto la unión tiene muy poca fuerza por lo que la presión debe mantenerse hasta que los se difunda el solvente en el material. Cuando el sello esté en un estado más sólido y el sello tenga la adherencia necesaria, se remueven las mandíbulas que ejercían la presión. La fuerza del sello continúa creciendo a medida que el solvente migra lejos de la interfase. El solvente residual puede afectar las propiedades de los sustratos o pueden crear emisiones excesivas, por lo que el uso de este método trata de reemplazarse por cualquier método alternativo.

Mandíbulas de sellos de calor

En los equipos más avanzados, las mandíbulas de sellado no son barras planas, estas no proporcionan suficiente fuerza de sello como los diseños aserrados. Al observar los sellos en el mercado, se puede apreciar marcas horizontales y verticales en el mismo, como se muestran en la figura.

Los surcos verticales proveen mayor fuerza a los sellos en caliente, pero suelen tener problemas con fugas causadas por los dobleces en

el área de sellado en caliente, las mismas que se conocen como fugas de suero. Los surcos horizontales eliminan las fugas de suero pero brindan menor fuerza al sello ya que corren paralelas a la fuerza de rasgado.

Los surcos pueden variar con cortes en ángulos, teniendo varios dientes por unidad de distancia. El uso de estos diseños minimiza el corte de la estructura durante el sellado en caliente.

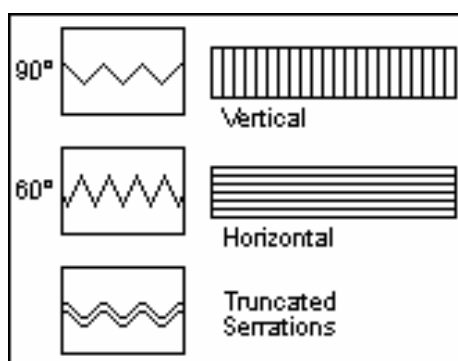


Figura 1.11. MANDIBULAS DE SELLADO

Modos de falla en sellos de calor

Una vez que el sello se realiza y el empaque es transportado, el usuario final debe ser capaz de abrir el empaque. Algunos sellos en caliente son diseñados con bloqueo, en donde el empaque debe ser destruido o cortado para abrirse. Muchos empaques alimenticios deben ser de fácil apertura o con sellos de rasgado. Existen dos métodos comunes para obtener sellos de rasgado.

El primer método consiste en añadir un segundo polímero al sello en caliente, el mismo que se funde a una mayor temperatura que el sello, y también debe fundirse a una mayor temperatura que la brindada por el equipo utilizado. El polímero se dispersa en pequeñas cantidades dentro del sello creando discontinuidad del mismo, lo que debilita la fuerza del sello al punto de obtener un sello fácil de rasgar. El segundo método consiste en tener el punto de rasgamiento en la siguiente capa del empaque, la misma que falla en tensión.

1.4. CONVERSIÓN, LAMINADO Y RECUBRIMIENTOS

La laminación y recubrimientos son operaciones resultantes de la producción de estructuras flexibles multicapas. Las estructuras multicapas son materiales compuestos que pueden contener plástico, papel y metal unidos por adhesivos. Los operadores que fabrican estas estructuras flexibles se denominan convertidoras, las mismas que también incluyen el proceso de impresión.

Recubrimiento y Laminado de Extrusión

Las operaciones de recubrimiento por extrusión y la laminación por extrusión se describen en conjunto ya que los equipos utilizados en el

proceso son prácticamente los mismos. El recubrimiento por extrusión es la operación en la que un material termoplástico es incorporado en una red de sustrato, tal como el papel. En laminación por extrusión se incorpora una segunda red combinando ambas redes por la acción adhesiva del material termoplástico extruido. In las operaciones de conversiones de materiales de empaques, estos dos procesos se combinan para crear una red como:

Papel / Ácido copolímero / lámina / capa de sello caliente

En la primera operación, el papel y la lámina se laminan por extrusión usando un ácido copolímero como adhesivo. Luego la capa de sello caliente se aplica mediante recubrimiento por extrusión. La operación se puede completar en dos pasos o en un simple paso mediante la extrusión "tandem". En esta línea, ambos cabezales de extrusión con capaces a su vez de la coextrusión. Para entender el proceso de recubrimiento y laminación por extrusión, es necesario comenzar en su forma más simple.

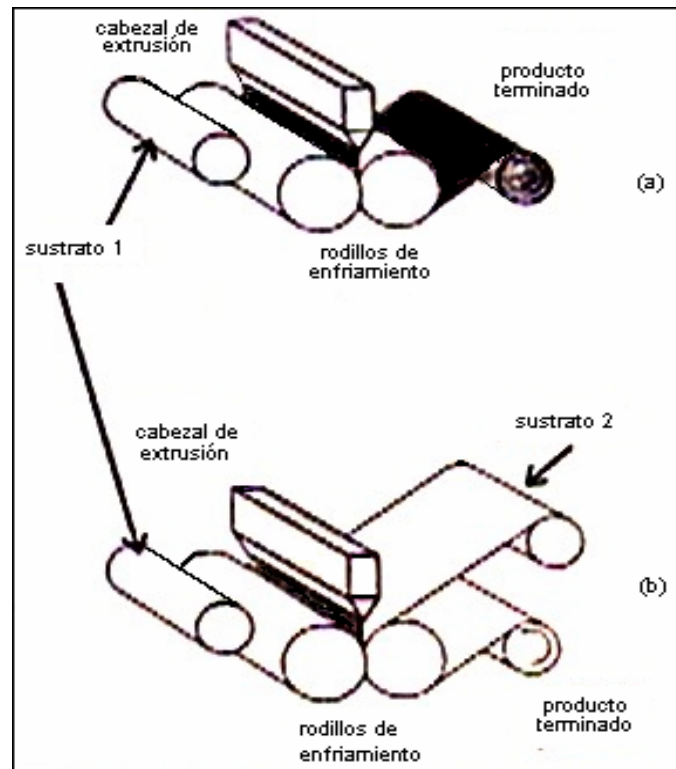


Figura 1.12 RECUBRIMIENTO POR EXTRUSIÓN (a) Y LAMINACIÓN POR EXTRUSIÓN (b)

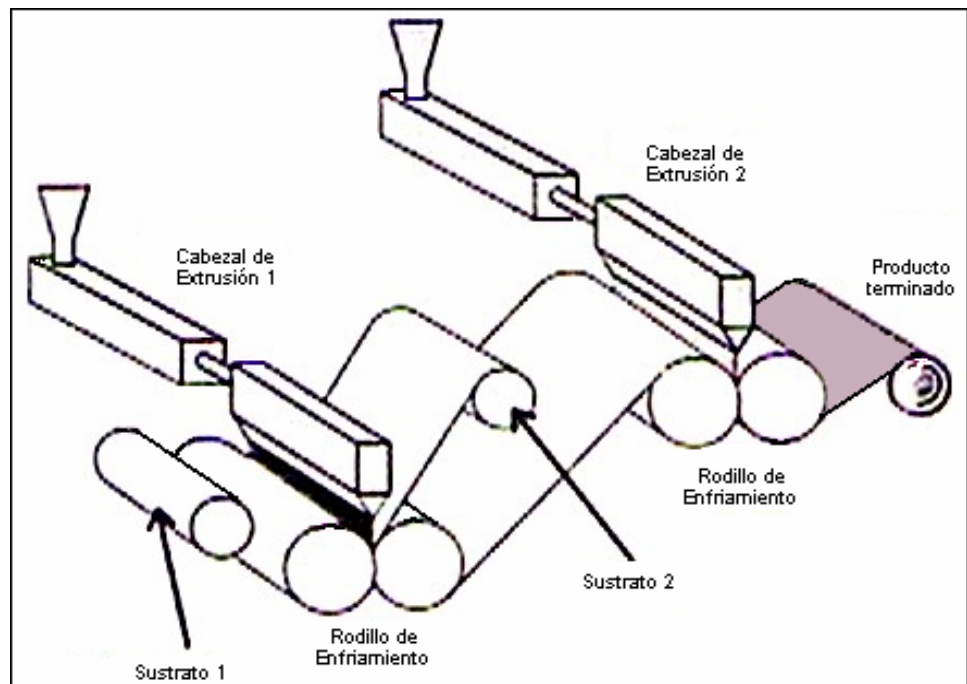


Figura 1.13 LÍNEA DE LAMINACIÓN POR EXTRUSIÓN

Laminación de mezcla caliente o recubrimiento

La laminación o recubrimiento de fusión caliente es similar a la laminación por extrusión. El proceso utiliza un polímero de menor peso molecular que no necesita un extrusor para fundir y bombear. La viscosidad del material fundido es lo suficientemente baja para depositarse por gravedad en la cámara, pero se utiliza una bomba para obtener resultados más exactos. Luego de la cámara el proceso es similar a la laminación por extrusión.

Laminación adhesiva

Este proceso recubre la superficie de una red con una solución o emulsión de un material polimérico adhesivo de bajo peso molecular, posteriormente se añade la segunda red. Si la capa adhesiva se seca antes de añadir la segunda red, el proceso se denomina laminación adhesiva seca o unión seca. Si las redes se adhieren al adhesivo mientras aún está húmedo, el proceso se denomina laminación adhesiva húmeda o unión húmeda. Para la unión húmeda una de las redes debe ser porosa para permitir la evaporación del agua o solvente utilizado en la capa adhesiva. Una laminación húmeda se puede lograr utilizando adhesivos reactivos los cuales se secan por uniones cruzadas, la misma que no emite

descargas volátiles. Este proceso se lo conoce como laminación sin solventes.

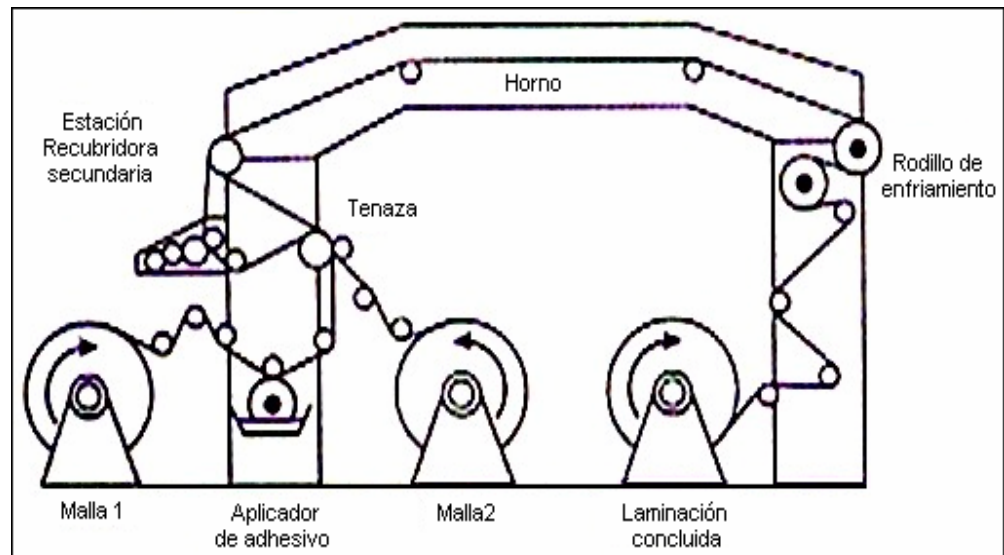


Figura 1.14. LAMINACIÓN HÚMEDA

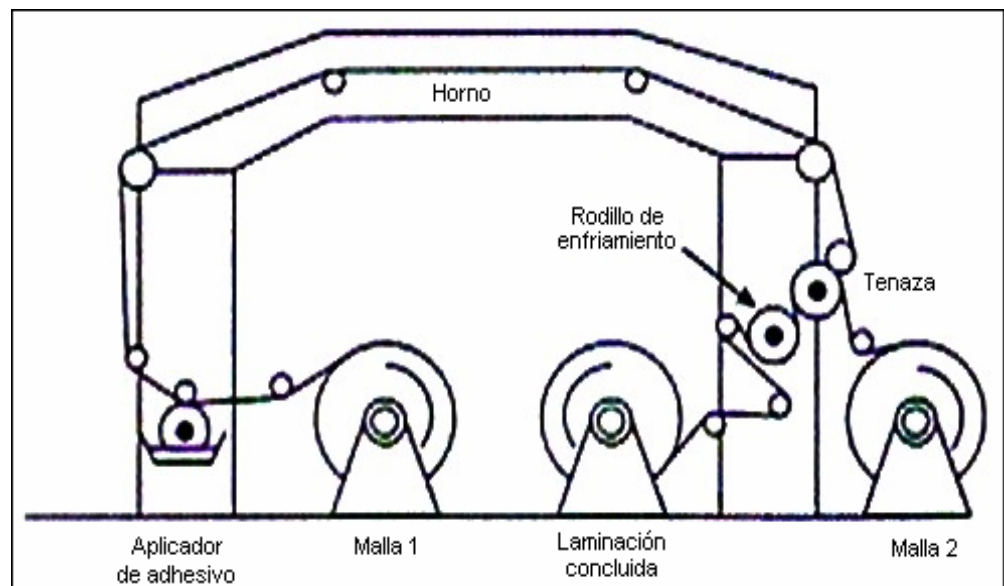


Figura 1.15 LAMINACIÓN SECA

Ambos casos de laminación adhesiva utilizan un equipo similar, donde su diferencia principal es la ubicación del horno de secado. El adhesivo se añade por un sistema de rodillos o tambores. El método necesita una forma de cuantificar la aplicación del adhesivo, los mismos que se pueden hacer mediante una cuchilla en un rodillo de fotograbado, un rodillo Mayer, o una cuchilla de doctor, como se muestran en la figura.



Figura 1.16 TIPOS DE RODILLOS DE RECUBRIMIENTO

El rodillo de fotograbado es un rodillo metálico cubierto con células grabadas. El recubrimiento se recoge del recipiente y el exceso es manejado desde el rodillo por una cuchilla que se pone en contacto. El rodillo Mayer es un rodillo de acero inoxidable envuelto con un cable que rota en conjunto mientras esté en contacto con la red luego de que se aplicó el adhesivo. El excedente de adhesivo es forzado hacia el rodillo y regresa al recipiente. Se fija una cuchilla a cierta distancia de la red, removiendo el exceso de recubrimiento a medida que la red avanza. El aplicador de fotograbado solo trabaja con

recubrimientos de baja viscosidad, mientras los otros métodos son menos sensibles a la viscosidad.

Se puede realizar laminación adhesiva a partir de una operación de impresión de prensa, si el equipo se encuentra correctamente adecuado. En este caso la estación de laminación con sus rodillos secundarios y de tenazas, deben ser insertados en línea con la prensa. Una estación adicional de impresión aplica el adhesivo de sellado frío.

Laminación térmica

En laminación térmica la energía del calor se usa para unir dos sustratos en un proceso análogo al sellado por calor. Se calienta uno o ambos materiales, luego se presionan y se enfrían, como se muestra en la figura. Al menos una de las capas debe contener un plástico en la superficie de unión, para que el sello en caliente se adhiera a la superficie del otro sustrato. Los materiales que se utilizan en este proceso son similares a los que se utilizan en laminación por extrusión. La diferencia entre los procesos es que los materiales a unirse ya están juntos en el momento de la laminación y no se añaden adhesivos.

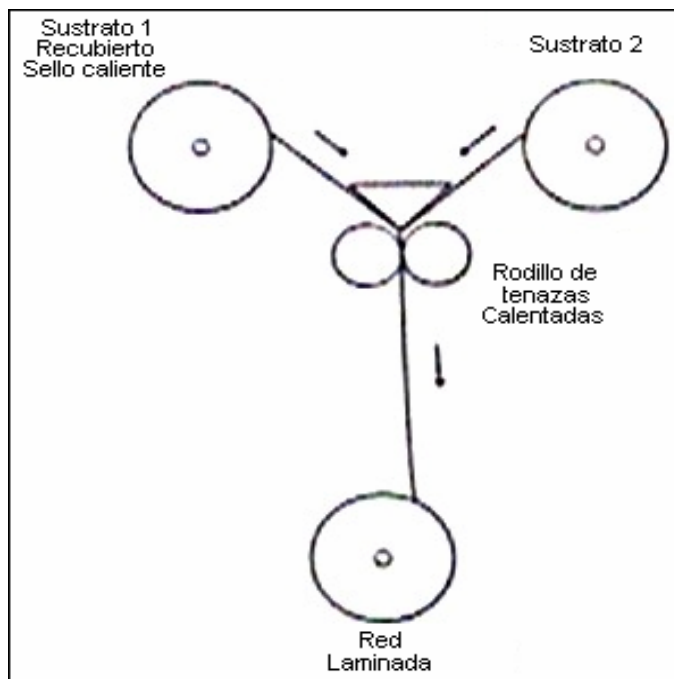


Figura 1.17 LAMINACIÓN TÉRMICA

Film metalizado

Los films metalizados contienen una capa extremadamente fina de aluminio, la misma que actúa para aumentar de gran manera las características de barrera del material, además de brindar una apariencia con brillo metálico. Debido a que la capa es muy delgada, esta no afecta las propiedades mecánicas como la fuerza o flexibilidad.

La metalización toma lugar en una cámara especial al vacío, comúnmente como un proceso de carga. Se vaporizan partículas de aluminio en un crisol a 1700°C , y se condensan en el film a metalizar

a medida que se enfría. El espesor de la capa de aluminio es de 400 a 400 Å y comúnmente se especifica en términos de transmisión de luz, densidad óptica o resistencia eléctrica. El espesor se controla por la velocidad del film, estaciones de chapado y la temperatura del metal. A mayor temperatura del metal se alcanza un espesor mayor.

Las propiedades de barrera de un film metalizado se acercan mucho a las de una lámina de aluminio. Cuando se comparan ambos materiales estando nuevos y sin dobleces, las propiedades de la lámina de aluminio son mejores. A medida que el material se cuarteo por la manipulación este se debilita y sus propiedades decrecen. Los films metalizados no sufren de cuarteamiento al manipularlo, por lo que mantiene sus propiedades. Los films metalizados con un costo y espesores menores han reemplazado las laminaciones metálicas de la industria de empaques.

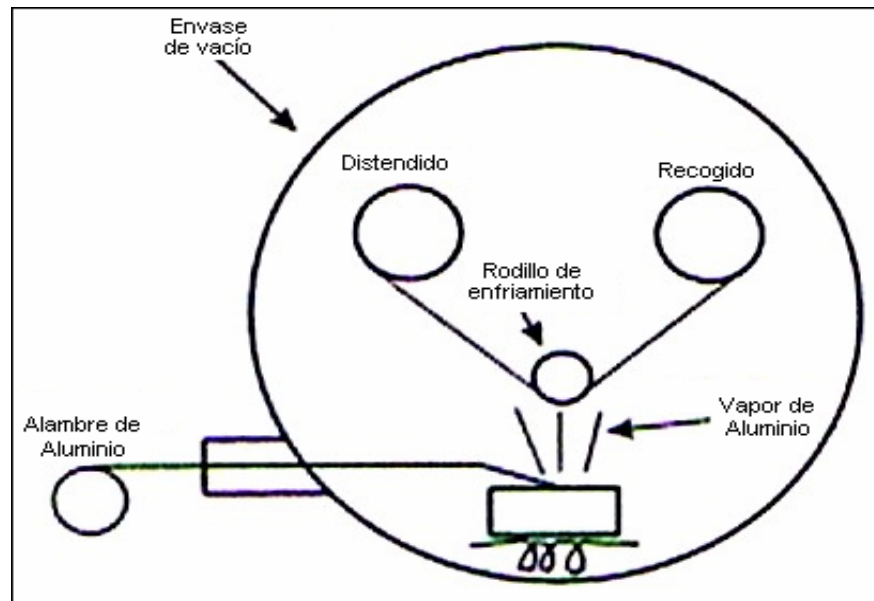


Figura 1.18 METALIZACIÓN DE PELÍCULAS

Film de óxido de silicón

Los films de óxido de silicón contienen una superficie delgada de óxido de silicón, un material parecido al vidrio, que mejora las propiedades de barrera. Debido a que la capa es muy delgada, esta no afecta las propiedades mecánicas del material. La capa de SiO_x proporciona un color amarillento a la superficie y conserva su transparencia. Los procesos para aplicar recubrimientos con óxido de silicio son: evaporación, salpicadura y plasma químico.

El proceso de evaporación es similar al metalizado al vacío, pero requiere una cámara de vacío mucho mejor. Una fuente de silicón se evapora en una cámara al vacío usando un rayo de electrones de

alta energía. Solo un 20% del vapor de SiO_x se deposita en el film, el resto se deposita en la cámara. El espesor de la capa vidriosa de SiO_x varía entre 400 a 1000 Å, dependiendo de las condiciones del proceso. La fórmula química de la capa no es exactamente SiO_2 . Se obtienen excelentes condiciones de barrera con resultados exactos, dependiendo de la capa base y del espesor de la capa de SiO_x .

El método de salpicadura usa el bombardeo de iones de argón para dislocar los átomos de silicón. Este método es muy lento y de costo elevado.

El método de deposición de plasma químico utiliza plasma químico creado a partir de un contenedor de silicón gaseoso además de helio y oxígeno, para crear el recubrimiento de SiO_x . Este método es efectivo para materiales sensibles al calor, ya que la emanación de calor es mínima. La efectividad necesaria para la cámara de vacío es menor que en el proceso de evaporación, produce una capa más delgada y clara, con menor coloración amarilla. Una ventaja clave de la deposición de plasma químico es que actúa sobre todas las superficies, por lo que sirve tanto para recipientes con recubrimientos como para films.

Otros recubrimientos de barrera inorgánica

Se pueden utilizar óxidos de aluminio para reemplazar recubrimientos de óxidos de silicón, además se pueden utilizar combinaciones de SiO y MgO, que resultan en films claros con mejores propiedades de barrera. Se utiliza el método de evaporación utilizando rayos de electrones para depositar óxidos de aluminio. Estos materiales están en etapa de desarrollo por lo que no son de uso frecuente. Además de los óxidos metálicos se ha desarrollado nano compuestos de arcilla como recubrimientos que mejoran de manera notoria las propiedades de barrera de los recubrimientos y los films.

1.5. Diseño de Empaques Plásticos

Transferencia de Masa en Sistemas de Empaques Polimérico

Para muchos productos, un material de empaque ideal debe ser capaz de contener y cubrir por completo el material y debe proveer una barrera perfecta entre el producto y el ambiente. Con una barrera perfecta e inerte, no existiría intercambio de moléculas como el O₂, CO₂, H₂O, iones, ingredientes del producto, o componentes del material de empaque; con los materiales confinados dentro del empaque. Un material como este no se encuentra disponible en el mundo real.

Los materiales poliméricos de embalaje son mucho menos inertes que los materiales antiguos como el metal y el vidrio, y tienen cierta permeabilidad a los gases. El intercambio de sustancias entre el producto y el empaque, en conjunto con la habilidad del material plástico para transmitir sustancias entre el ambiente y el producto, muy a menudo son determinantes importantes de la vida (SHELF LIFE) del producto.

Las moléculas de gases, vapores y otras sustancias pueden disolverse en los polímeros, difundirse a través de polímeros, y entonces viajar a otra sustancia en contacto. El alcance y velocidad de estos acontecimientos dependen de la estructura física y química del polímero y de la naturaleza de la molécula viajera. La fuerza de traslado para transferencia neta de moléculas permeantes desde un lugar a otro es la tendencia natural a equilibrar su actividad química que poseen las especies.

Para que la transferencia del permeante a través del polímero ocurra, el mismo debe tener la capacidad de moverse dentro y a través del polímero, si no puede entrar o moverse dentro del polímero, este proporcionará una barrera perfecta. La capacidad del permeante para moverse dentro del polímero se encuentra extremadamente

influenciada por el volumen libre del polímero. El volumen libre es el espacio que no se encuentra ocupado por las moléculas del polímero, los espacios entre moléculas del polímero o segmentos de moléculas.

La estructura física del polímero y su temperatura son factores determinantes en la cantidad de volumen libre dentro del material plástico. El efecto de la temperatura es conocido como expansión térmica del material, a medida que la temperatura incrementa, el espacio entre átomos adyacentes y moléculas aumenta, entonces el volumen libre también aumenta. La capacidad de la molécula permeante de moverse dentro del polímero depende de, entre otros factores, de su tamaño, particularmente de su tamaño en comparación con el tamaño de los espacios libres en el polímero. Las moléculas pequeñas se pueden mover de mejor forma que las moléculas de mayor tamaño. De igual forma, mientras mayor sea el volumen libre, mayor el tamaño de los espacios y mayor será la capacidad de la molécula permeante para poder moverse.

En polímeros semicristalinos, como el polietileno, que posee regiones cristalinas y amorfas, si el polímero se encuentra por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g), la cadena de moléculas en la

región amorfa tiene suficiente energía para el movimiento de sus segmentos, los cuales cambian de una conformación a otra, estos están formando y destruyendo volumen libre sucesivamente, logrando un estado muy dinámico, tienen mucha movilidad, pero si el polímero está por debajo de su T_g , prácticamente no existe movilidad; en ambos casos las regiones cristalinas tienen una movilidad muy pequeña, y tienen mucho menos volumen libre que las regiones amorfas, consecuentemente, hay mucho menos capacidad para la molécula permeante, de trasladarse a través de las regiones cristalinas.

Por lo tanto, todo el transporte de masa a través de materiales semicristalinos, puede ser considerado que ocurre a través de la región amorfa del material. Incrementando la polaridad, la fuerzas de puentes de hidrógenos, y la cristalinidad, decrece el volumen libre, por lo tanto aumenta la propiedad de barrera del polímero.

Estas interacciones en la película pueden ser clasificadas como permeación de compuestos a través del plástico, Absorción de compuestos en el plástico, y migración de compuestos desde el plástico. La figura 1.19 ilustra la difusión, adsorción, y permeación que ocurre en la película plástica.

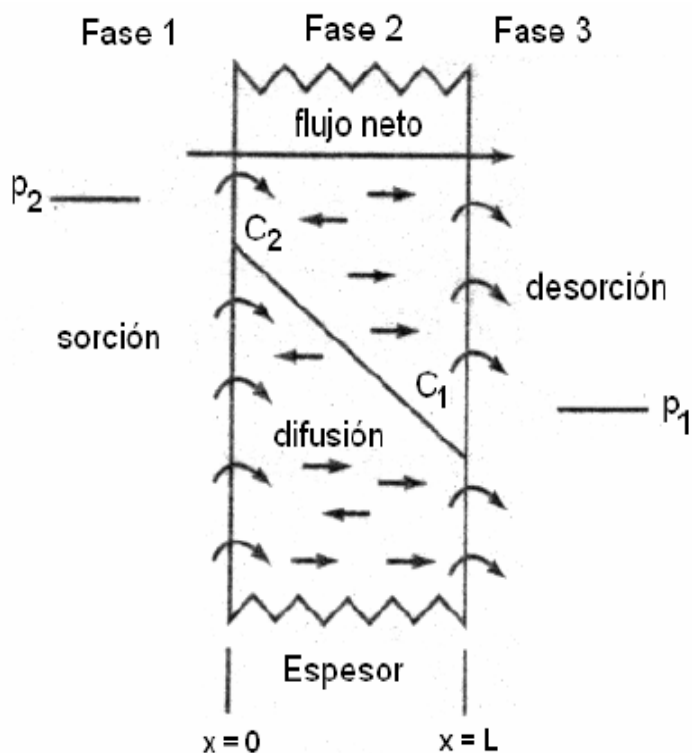


Figura 1.19: TIPO DE INTERACCIONES EN LA TRANSMISIÓN DE GASES

Los coeficientes de difusión y solubilidad son parámetros fundamentales que controlan la transferencia de masa en los sistemas de empaque.

Los términos comúnmente utilizados en este fenómeno son:

Permeación

Permeación es el paso de gases, vapores o líquidos (denominados permeantes) de un lado a otro, en un material de empaque

homogéneo, esto excluye el viaje a través de perforaciones, rasgaduras y otros defectos del empaque.

Migración

Migración es la transferencia de sustancias originalmente presentes en el material plástico hacia el producto empaçado, estas sustancias transferidas se las denomina “migrantes”.

Absorción

Absorción es la transferencia de componentes del producto, como sabor, aroma, o colorantes (denominados sorbatos) hacia el empaque, se le suele llamar “migración negativa”, pero el uso de este término puede llevar a la confusión. La actividad química de una sustancia i es proporcional a su concentración y es representada así:

$$a_i = \gamma C_i \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde γ es el coeficiente de actividad, en un gas a presión atmosférica o por debajo de la misma, el coeficiente de actividad es aproximadamente igual a 1, entonces la actividad es aproximadamente igual a la concentración.

Solubilidad

El acto o proceso en el cual un compuesto como el oxígeno es molecularmente mezclado con un líquido (como el agua) o un sólido (como cualquier polímero) es llamado disolución, y el resultado de la mezcla es una solución. Si la solución es muy diluida, como lo es común en el empaçado, se comporta como una solución ideal, y el coeficiente de actividad es también aproximadamente igual a 1, y la concentración puede ser sustituida por la actividad en términos termodinámicos.

William Henry encontró en 1803 que la presión de vapor de un soluto sobre una solución ideal es proporcional a su concentración (Figura 1.20):

$$p_i = k c_i \Rightarrow c_i = S p_i \quad \text{Ecuación 1.7}$$

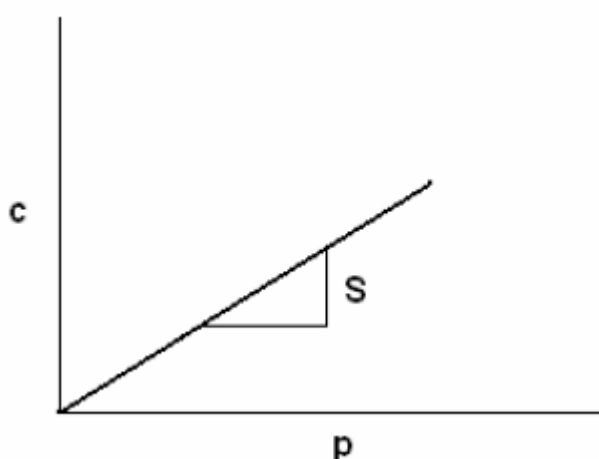


Figura 1.20: LEY DE HENRY

La pendiente S, es la constante de proporcionalidad de la Ley de Henry, y se la conoce como el coeficiente de solubilidad.

Difusión

Para conocer la velocidad o rapidez con que este proceso de transporte ocurre, se estudia la difusión. Adolf Fick en 1855, desarrolló ecuaciones para describir la difusión, a las que ahora conocemos como Primera y Segunda Ley de Difusión. Para un material isotrópico, y cuando la difusión ocurre en una sola dirección, como lo es aproximadamente en los sistemas de empaques, la Primera Ley de Fick puede ser escrita así:

$$F = -D \left(\frac{\partial x}{\partial c} \right) \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Donde F es el flujo, c es la concentración de permeante en el polímero, x es la distancia (en dirección de la difusión), y D es el coeficiente de difusión. La primera ley proporciona un método para calcular la difusión en estado estable, cuando D es constante durante el proceso de difusión.

Para flujo en estado transiente, la difusión es descrita por la Segunda Ley de Fick, para difusión unidireccional:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Donde t es el tiempo.

En el caso de una película plana de plástico de espesor ℓ que tiene penetrante a ambos lados a diferentes concentraciones, la primera ley de Fick puede ser expresada así:

$$F = -D \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{c_2 - c_1}{\ell} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

En estudios de permeabilidad, sin embargo, la presión parcial del gas que rodea la película, es más fácil de medir que la concentración del penetrante c en el polímero. La Ley de Henry se aplica, y se sustituye p por c:

$$F = DS \frac{p_2 - p_1}{\ell} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Como el flujo F es la cantidad de permeante transferido por unidad de área A en un tiempo t, $F = q/At$, reordenando la ecuación queda:

$$P = DS = \frac{q \ell}{A t \Delta p} \quad \text{Ecuación 1.12}$$

Donde $\Delta p = p_2 - p_1$, se introduce un nuevo parámetro, el coeficiente de permeabilidad P , que es el producto del coeficiente de difusión y el coeficiente de solubilidad, y es un indicador de las características de barrera del polímero al polímero permeante en consideración.

Criterio para formar multicapas

La permeabilidad de un empaque se relaciona y se obtiene mediante un parámetro muy importante el WVTR (Water Vapor Transmission Rate) o tasa de transmisión del vapor de agua, que es la cantidad de vapor de agua que pasa a través de un material por unidad de área y por unidad de tiempo. El valor WVTR se obtiene mediante un ensayo o prueba, que se describirá y realizará en el capítulo siguiente. La permeabilidad y el WVTR se relacionan de la siguiente manera:

$$P = \left(\frac{q}{At} \right) \frac{l}{\Delta p} = \text{WVTR} \frac{l}{\Delta p} \quad \text{Ecuación 1.13}$$

En la figura 1.21 se puede observar claramente como se relacionan estos parámetros entre sí:

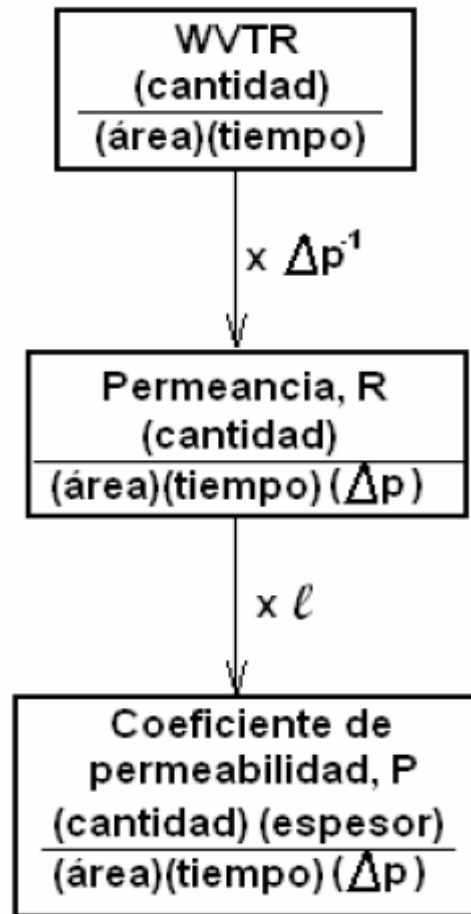


Figura 1.21: ESQUEMA DE CÁLCULO DE PROPIEDADES DE BARRERA

En una estructura multicapa, el cálculo de permeabilidad a través de la misma, se lo realiza analizando la transferencia a través de las capas individuales de la estructura, de una manera analógica a los conceptos utilizados en transferencia de calor.

En la figura 1.22 se muestra el análisis para un material tricapa:

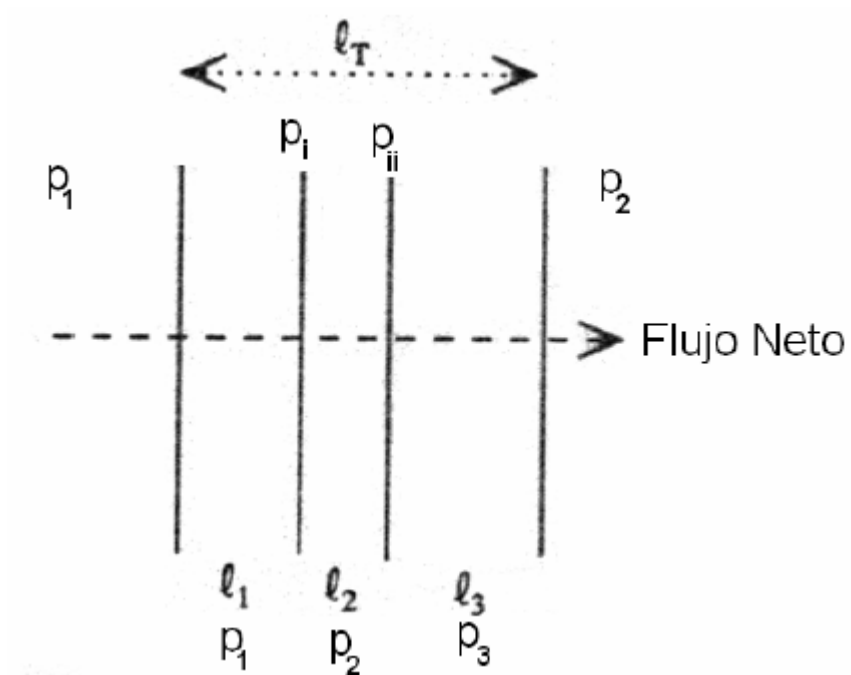


Figura 1.22: FLUJO DE VAPOR DE AGUA EN MULTICAPAS

Para la estructura completa, conocemos:

$$P_T = \frac{q l_T}{A t \Delta P_T} \quad \text{Ecuación 1.14}$$

Y despejando Δp , se obtiene:

$$\Delta P_T = \frac{q l_T}{A t P_T} \quad \text{Ecuación 1.15}$$

Realizando lo mismo para cada una de las capas individuales, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{q \ell_1}{A t \Delta p_1} & \Delta P_1 &= \frac{q \ell_1}{A t p_1} \\
 P_2 &= \frac{q \ell_2}{A t \Delta p_2} & \Delta P_2 &= \frac{q \ell_2}{A t p_2} \\
 P_3 &= \frac{q \ell_3}{A t \Delta p_3} & \Delta P_3 &= \frac{q \ell_3}{A t p_3}
 \end{aligned}$$

$$\Delta P = \frac{q \ell_T}{A t P_T} = \frac{q}{A t} \left(\frac{\ell_1}{P_1} + \frac{\ell_2}{P_2} + \frac{\ell_3}{P_3} \right) \quad \text{Ecuación 1.16}$$

$$\frac{\ell_T}{P_T} = \frac{\ell_1}{P_1} + \frac{\ell_2}{P_2} + \frac{\ell_3}{P_3} \quad \text{Ecuación 1.17}$$

Entonces conociendo el espesor de cada capa y el coeficiente de permeabilidad del material, podemos calcular el coeficiente de permeabilidad (y/o WVTR) de la estructura completa. Se puede generalizar para una estructura de n-capas de la siguiente manera:

$$\frac{\ell_T}{P_T} = \sum_{i=1}^n \frac{\ell_i}{P_i} \quad \text{Ecuación 1.18}$$

Y resolviendo para la permeabilidad total P_T , se obtiene:

$$P_T = \frac{\ell_T}{\sum_{i=1}^n \frac{\ell_i}{P_i}} \quad \text{Ecuación 1.19}$$

Debemos tener mucho cuidado en el uso del coeficiente P, este es obtenido a una temperatura determinada, y ese es el único valor de P que nos sirve para cálculos a esa temperatura, es decir que si P es hallado para Quito (21° C), no puede ser utilizado ese mismo P para Guayaquil (32° C), ya que P tendría un valor mayor, y que tan mayor es este valor de P que se debe utilizar, se lo puede calcular, ya que la permeabilidad se ajusta al tipo de ecuación de Arrhenius:

$$P_2 = P_1 e^{\frac{E_P}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Ecuación 1.20

Donde P_2 es el coeficiente de permeabilidad a la temperatura deseada T_2 , P_1 es el coeficiente de permeabilidad a la temperatura conocida T_1 , E_P es la energía de activación de la película plástica, R es la constante universal de gases (8.314 Joule / mol K), T_1 es la temperatura conocida en grados Kelvin, T_2 es la temperatura deseada en grados Kelvin. En la tabla 5 podemos ver valores de P, y E_P de algunos polímeros utilizados en coextrusión, a 25° C:

TABLA 11								
COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD @ 25° C Y ENERGÍA DE ACTIVACIÓN								
POLÍMERO	P en cc (SPT) cm/m2 día atm				EP (kJ/mol)			
	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O
LDPE	19	83	6,4	600	43	39	49	34
HDPE	2,6	2,4	0,96	220	35	30	40	-
PP	11	47	2	340	48	38	56	42
Nylon 6	0,19	0,8	0,05	-	44	41	47	-
PVC	0,3	1,1	0,08	1800	56	57	69	23
PVDC	0,02	0,1	0	61	67	52	70	46

Posteriormente con el correcto y adecuado valor de P_T se diseña el empaque utilizando la ecuación de permeabilidad para multicapa, despejando ℓ :

$$\ell = \frac{P_T t A \Delta p}{q} \quad \text{Ecuación 1.21}$$

Donde:

ℓ : Espesor en micras

P_T : Coeficiente de permeabilidad total de la multicapa

t: Tiempo de vida en percha (SHELF LIFE)

A: Área del empaque

q: Cantidad de H₂O ganada o perdida por el producto

Δp : Diferencia de presión en ambos lados del empaque.

El primer paso para el diseño del empaque alimenticio es determinar los parámetros que influyen en la pérdida de calidad del producto: ganancia de humedad, oxidación, deterioro por acción microbiana, o la combinación de estos factores, y tener la curva de isoterma de adsorción del producto a empacar, donde se grafica humedad del empaque vs. actividad de agua del producto.

Como sabemos que la diferencia de presión en ambos lados del empaque es:

$$\Delta p = \frac{p_s (HR_{out} - HR_{in})}{100} \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Donde p_s es la presión de saturación de vapor de agua cuyo valor se obtiene de la tabla 6, HR_{out} es la humedad relativa del ambiente fuera del empaque, o sea en la condición deseada de almacenamiento del mismo, y HR_{in} es la humedad relativa del interior del empaque. La humedad relativa dentro del empaque con el alimento (HR_{in}) no es constante, sino que depende de la actividad de agua del alimento a través del tiempo y la relación entre estos 2 parámetros se lo aprecia la isoterma de adsorción de cada alimento, como se aprecia en figura 1.23

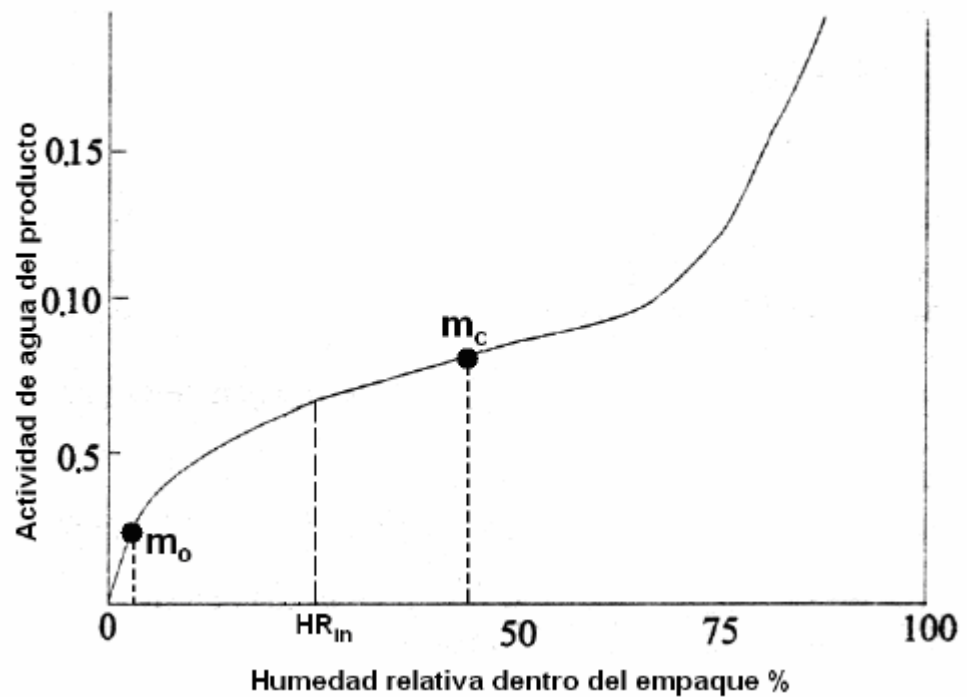


Figura 1.23: CURVA DE HUMEDAD RELATIVA PARA PRODUCTO EMPACADO

Esta isoterma nos sirve de gran ayuda para encontrar la humedad promedio a lo largo del lapso requerido, dentro del empaque, y entonces la HR_{in} puede ser expresada así:

$$HR_{in} = \int_{m_0}^{m_\ell} A_w \quad \text{Ecuación 1.23}$$

Conociendo ya todos estos parámetros, se procede a calcular el espesor ℓ , utilizando la ecuación 3.26, siendo de este parámetro

(espesor) de donde se parte para un posterior diseño del proceso de coextrusión de la película multicapa requerida.

Se debe tener cuidado en utilizar el correcto valor de presión de saturación de vapor de agua para cada ciudad, es decir, para la temperatura de cada una, el correspondiente valor de presión de saturación.

En la tabla 12 se enlistan valores de presión de vapor saturado, en un rango de temperaturas que tienen las regiones de nuestro país, que se utilizarán mas adelante:

TABLA 12					
PRESION DE SATURACIÓN DE VAPOR DE AGUA					
°C	°F	mm Hg	°C	°F	mm Hg
6	42,8	7,013	26	78,8	25,209
7	44,6	7,513	27	80,6	26,739
8	46,4	8,045	28	82,4	28,349
9	48,2	8,609	29	84,2	30,043
10	50,0	9,209	30	86,0	31,824
16	60,8	13,634	31	87,8	33,695
17	62,6	14,530	32	89,6	36,663
18	64,4	15,477	33	91,4	37,729
19	66,2	16,477	34	93,2	39,898
20	68,0	17,535	35	95,0	42,175
21	69,8	18,640	36	96,8	44,563
22	71,6	19,827	37	98,6	47,067
23	73,4	21,068	38	100,4	49,692
24	75,2	22,377	39	102,2	52,442
25	77,0	23,756	40	104,0	55,324

Estas ecuaciones están sujetas a las siguientes condiciones:

- Hay un rápido equilibrio entre las condiciones internas del producto y empaque.
- El pequeño tiempo en alcanzar el estado estable de permeación a través del empaque no es considerado.
- La temperatura es constante a lo largo del SHELF LIFE, t.
- P no es afectada por la concentración.

En la figura 1.24, se observa más fácilmente, la relación existente de todo lo explicado hasta aquí, para la predicción del “SHELF LIFE”.

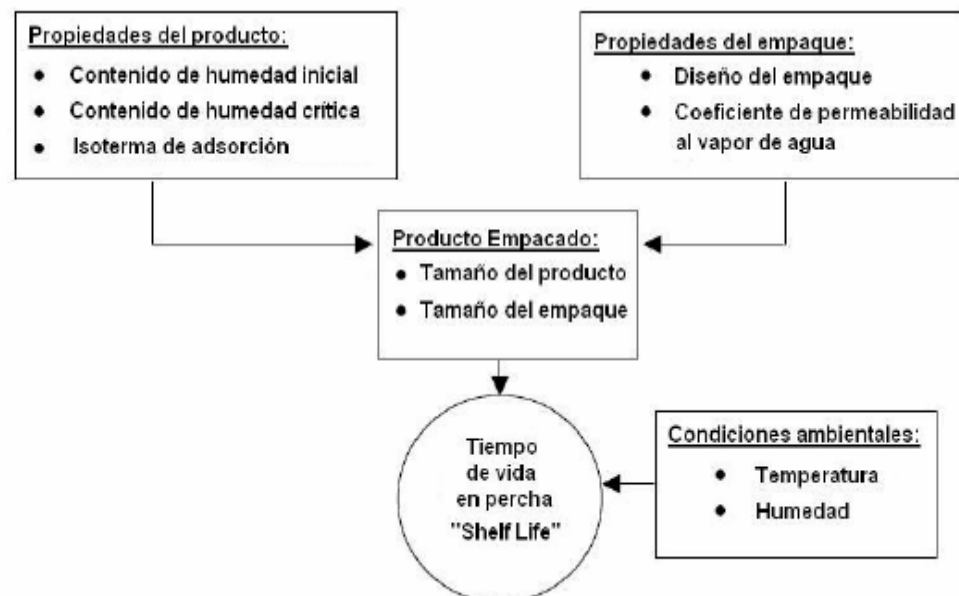


Figura 1.24: REQUERIMIENTOS PARA CALCULOS DE SHELF LIFE

En el diseño del empaque, a veces dependiendo de las condiciones de manipulación del mismo, las propiedades mecánicas gobiernan en el diseño, superando enormemente a los requerimientos mínimos de espesor para barrera, requeridas por el alimento.

1.6. Propiedades y Ensayos de las Películas

A continuación se describen las propiedades y sus respectivos ensayos, de mayor uso e interés en la industria del empaque plástico:

Tracción y Elongación (ASTM D-882)

El ensayo de tensión mide la fuerza requerida para romper una probeta y la extensión que se estira la muestra para llegar al punto de ruptura. Las pruebas de tensión producen un diagrama de tensión, el mismo que es utilizado para determinar el módulo de tensión. Los datos a menudo son utilizados para especificar un material, para diseñar partes, y como chequeo de control de calidad de los materiales. Las propiedades físicas de muchos materiales (en especial los termoplásticos), pueden variar dependiendo de la temperatura ambiente, por lo que es apropiado realizar las pruebas a una temperatura que simule la temperatura donde se desempeñará el material.

Para llevar a cabo esta prueba, se pone la probeta en las mordazas de la máquina y se estira hasta llegar a la ruptura. Para el ensayo de tensión, la velocidad de la prueba y la separación de la mordaza se basan en el alargamiento que se necesita para romper el material. Se puede calcular el alargamiento y el módulo de tensión con el desplazamiento del cabezal.

Se puede variar la temperatura de la prueba instalando la máquina de la prueba universal dentro de una cámara termal. La cámara se diseña para permitir que la base y las mordazas de máquina coincidan con los topes de la cámara. Se instalan probetas estándar de prueba dentro de la cámara, y se realiza a prueba dentro del ambiente térmico controlado de la misma manera como si estuviese a temperatura ambiente. La cámara tiene los calentadores eléctricos interiores para alcanzar temperaturas elevadas, y utiliza gas de CO₂ externo como refrigerante para temperaturas reducidas. El tamaño de la cámara pone una limitación en la elongación máxima que puede alcanzarse. Esta prueba utiliza láminas rectangulares de 1" x 6" y el equipo comúnmente utilizado es el Probador universal Instron.



Figura 1.25: ENSAYO DE TENSIÓN / ELONGACIÓN

Se puede obtener los siguientes parámetros a partir de los resultados de la medición del módulo de tensión:

- Resistencia a la tensión (fluencia y ruptura)
- Módulo de tensión
- Tensión
- Elongación y % de elongación a la fluencia
- Elongación y % de elongación a la ruptura

Resistencia al Impacto – Impacto al Dardo (ASTM D-1709)

La prueba de impacto al dardo es un método tradicional para evaluar la fuerza de impacto o dureza de una película plástica. Esta prueba

usa una sola configuración del dardo y una sola altura de caída, mientras se varía el peso del dardo. Esta prueba puede usarse como una evaluación de control de calidad o para comparaciones de uso final. El procedimiento de esta prueba se realiza dependiendo de la fuerza de impacto esperada de la prueba, y se utiliza el método A o el método B. El método define el tamaño del dardo y la altura de caída para el dardo. Se impactan varias muestras para determinar un punto de partida apropiado para el peso del dardo.

El espécimen de la prueba se sujeta firmemente en un anillo neumático que se encuentra en la base de la torre de caída. La montura se ajusta a la altura de caída apropiada, y el dardo se inserta en la montura. El dardo se suelta para dejarlo caer hacia el centro del espécimen de la prueba. Se reporta el peso de la caída. El método para analizar estos datos se llama el método de la "Escalera de Bruceton". Una serie de 20 a 25 impactos se realizan, y si un espécimen pasa la prueba, se incrementa el peso de caída en una unidad. Si el espécimen de la prueba falla, el peso de caída se disminuye una unidad. Se usan los resultados de estos impactos para calcular el peso de ruptura por impacto (gramos), que es el punto en que el 50% de los especímenes fallan bajo el impacto.



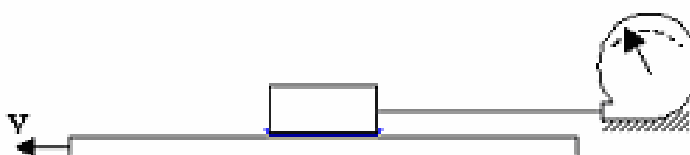
Figura 1.26: ENSAYO DE IMPACTO

El método de prueba A especifica un dardo de 38 mm de diámetro que cae desde una altura de 0.66 m. El método de prueba B especifica en dardo de 51 mm de diámetro que cae desde una altura de 1.5 m. Las muestras de la película a probarse debe ser cortada con dimensiones de 230 mm x 230 mm, y por lo general se necesita de alrededor de 30 muestras para concluir la prueba. El equipo utilizado en esta prueba por lo general es Probador de impacto por caída, además de los pesos y dardos apropiados.

Coefficientes de Fricción (ASTM D1894-93)

El ensayo de coeficiente de fricción se utiliza para determinar resistencia cinética (en movimiento) y estática (en el inicio) de una

superficie siendo arrastrada sobre la muestra a ser analizada. El procedimiento estipula una muestra adherida a un cabezal móvil de peso conocido, el mismo que es arrastrado a través de una segunda superficie a velocidad de 150 mm/min. Se mide la fuerza para poner en movimiento el cabezal (fuerza estática) y la fuerza para mantener en movimiento el cabezal (fuerza cinética). Con estos datos y los pesos conocidos se calculan los coeficientes de fricción (COF) estático y dinámico. Para la prueba se realiza con muestras cuadradas de 64 mm y una segunda superficie rectangular de 254 mm x 127 mm. El equipo utilizado es el mismo utilizado en el ensayo de tensión en posición horizontal, el mismo que mide la fuerza que arrastra el cabezal durante el ensayo.



Ensayo de Coeficiente de Fricción (COF)

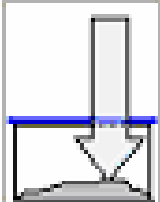
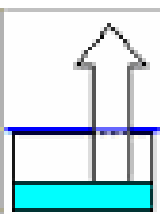
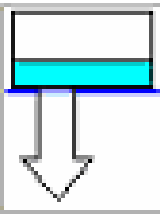
Figura 1.27: ENSAYO COF

Transmisión del Vapor de Agua “WVTR” (ASTM E-96)

La transmisión de vapor de agua (WVTR) es una medida de cuánto vapor de agua atravesará un material por unidad de área por unidad de tiempo, es decir su velocidad de transmisión. La prueba se realiza

sellando una muestra en la boca abierta de un plato de prueba que contiene desecante o agua, y colocando el conjunto en una atmósfera controlada. La medición en la prueba es pesar periódicamente el conjunto en función del tiempo.

En la tabla siguiente se muestra los métodos utilizados para medir la WVTR.

TABLA 13		
RESUMEN DE METODOS DE ENSAYO WVTR		
Método	Resumen	Diagrama
Deseccante	La probeta de prueba es un sello hecho con el material, para cerrar un plato de prueba que contiene desecante, ensamblado en una atmósfera controlada. Se pesa periódicamente para determinar la velocidad de movimiento del vapor desde la atmósfera controlada hacia el desecante en el interior.	
Agua	La probeta de prueba es un sello hecho con el material, para cerrar un plato de prueba que contiene desecante, ensamblado en una atmósfera controlada. Se pesa periódicamente para determinar la velocidad de movimiento del vapor desde la atmósfera controlada hacia el desecante en el interior.	
Agua Invertida	El procedimiento se repite como el la prueba con agua, sólo que esta vez se invierte la probeta para que el agua esté en contacto con el material de prueba.	

En la tabla siguiente se enumeran los procedimientos estándar de la prueba

TABLA 14		
TEMPERATURAS DE ENSAYO WVTR		
Procedimiento	Método	Temperatura
A	Sílica Gel	23° C
B	Agua	23° C
BW	Agua invertida	23° C
C	Sílica Gel	32.2° C
D	Agua	32.2° C
E	Sílica Gel	37.8° C

Existen ensayos adicionales que pueden realizarse para medir parámetros como Resistencia al Rasgamiento, Fuerza de Sello, Transmisión de Gases, Opacidad, Claridad y Brillo. Los ensayos adicionales más comunes de la industria plástica se detallan en el Apéndice B.

CAPÍTULO 2

2. ENSAYOS

2.1 Datos de los materiales utilizados

El objetivo del estudio es el análisis de las películas laminadas de mayor uso en el mercado, en específico el caso de PLASTLIT, empresa proveedora de los materiales. Debido a las políticas de la empresa los datos del procesamiento y propiedades intrínsecas de los materiales no fueron revelados, por lo que la clasificación de las películas será acorde a sus componentes y espesores del material en la misma. En la tabla 15 se muestra los componentes y espesores de las películas utilizadas en este estudio.

TABLA 15					
DATOS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS					
Nomenclatura Utilizada	Producto Empacado	Comp.	Espesor (micras)	%	Total (micras)
L1	Gelatina	BOPP	20	50	40
		BOPP Met.	20	50	
L2	Ají	PET	12	21,43	56
		PE	44	78,57	
L3	Pescado	PET	12	10,53	114
		PE	102	89,47	
BOPP 20	-	BOPP	20	100	20
BOPP 30	-	BOPP	30	100	30
NYLON 25	-	Nylon	25	100	25

2.2 Ensayo de Tracción y Elongación

Los ensayos de tracción y elongación fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM D 882, en los laboratorios de PLASTLIT.

Equipos:

El equipo utilizado fue el siguiente:

- Máquina de Tracción Universal INSTRON
 - Máxima capacidad: 40 Kgf
 - Mínima escala: 1gf
 - Tipo de medición: Tensión

- Unidad: Kgf

Debido a políticas de la empresa no se pudo obtener fotografías del mismo. En la figura se logra observar un equipo similar al utilizado para esta prueba.



Figura 2.1 MÁQUINA DE TRACCIÓN UNIVERSAL

Condiciones y Requerimientos:

Las condiciones y requerimientos para realizar el ensayo se detallan a continuación:

- Condiciones ambientales del laboratorio son 21° C y 50% de humedad relativa.

- Las muestras deben ser cortadas en forma de tiras rectangulares donde el ancho estar entre 5 y 25.4 mm, y el largo debe ser al menos 50 mm más largo que la distancia entre las mordazas del equipo.
- Las muestras deben ser cortadas siguiendo ambas orientaciones del material, es decir en dirección longitudinal (dirección de la máquina MD) y transversal (TD) de la laminación.
- Las muestras deben ser cortadas con mucho cuidado, ya que no deben tener alteraciones en su superficie ni en los bordes, ya que esto causa un valor errático en la ruptura.

En la tabla 16 se muestra los datos de las dimensiones de las muestras utilizadas para este ensayo.

TABLA 16			
DIMENSIONES DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYO DE TENSIÓN			
Material	Espesor (micras)	Ancho (mm)	Longitud (mm)
BOPP 20 + BOPP Met. 20	40	10	50
Poliéster 12 + PE 44	54	10	50
Poliéster 12 + PE 102	114	10	50
BOPP 20	20	25,4	150
BOPP 30	30	25,4	150
Nylon 25	25	25,4	150

Procedimiento:

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se selecciona el rango de carga a medirse en la máquina de tracción, que para el tipo de materiales utilizados oscila entre 0 y 30 kgf.
- Se mide las dimensiones de la muestra, incluyendo el espesor, para obtener el área de la sección transversal.
- Se establece la distancia entre mordazas para colocar las muestras, que para el tipo de materiales utilizados puede ser 50 o 150 mm, dependiendo de la longitud de la muestra.
- Se calibra la velocidad de la máquina que es de 500 mm/min para materiales plásticos que pueden tener deformaciones de más del 100%.
- Se coloca la muestra entre las mordazas, teniendo cuidado de que la muestra no se deslice por la superficie de las mordazas.
- Se toman 10 medidas de fuerza y elongación en la máquina de tracción para cada orientación del material (MD y TD) para cada material, escogiendo 5 datos eliminando los valores aberrantes elongación y carga; obteniendo un valor promedio para cada medición.

2.3 Ensayo WVTR

Los ensayos WVTR, que miden la transferencia de vapor de agua a través de las películas se realizaron mediante el Método del Pouch siguiendo las indicaciones de la norma ASTM E96. Se utilizaron dos tipos de desecantes, el primero en polvo y el segundo en granos, para así tener un valor más acercado a la realidad y poder comparar el comportamiento de ambos desecantes.

Equipos:

Los equipos utilizados fueron los siguientes:

- Cuarto Acondicionado a 21° C
- Selladora de Impulso para empaques plásticos.
- Desecante (en polvo y en granos)
- Incubadora BINDER (Atmósfera controlada 34,6 y 38° C)
 - Rango 0 – 70° C
 - Escala mínima 0.2° C
- Higrómetro y Termómetro
 - Rango 0 – 50° C
 - Rango 0 – 98 % HR
- Balanza analítica SARTORIUS BL210S
 - ◆ Escala mínima: 0.0001 g
 - ◆ Rango 0 - 210 g

En las figuras 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 se observan los equipos utilizados:



Figura 2.2 INCUBADORA



Figura 2.3 BALANZA ANALÍTICA



Figura 2.4 SELLADORA DE IMPULSO



Figura 2.5 HIGRÓMETRO Y TERMÓMETRO

Condiciones y Requerimientos:

Las condiciones y requerimientos que se necesitan para poder realizar el ensayo se detallan a continuación:

- Se establecen las condiciones ambientales controladas en la incubadora, donde la atmósfera de simulación para Guayaquil es

38° C, 42.75% HR para el caso del desecante en polvo y 34.6° C, 42.75% HR para el caso de desecante en granos. Para la simulación de la atmósfera de Quito se coloca las muestras en un cuarto acondicionado a 21° C, 50% HR para ambos desecantes. Esto deberá permanecer durante 24 horas para estabilizar la temperatura y obtener una atmósfera homogénea.

- Las muestras son de forma rectangular con dimensiones aproximadas de 22 cm de largo y 12 cm de ancho, de tal forma que al doblar y sellar el Pouch formado tenga forma cuadrada de 10 cm.
- La cantidad utilizada en cada Pouch debe estar entre 20 y 25 gramos.
- Se debe tener cuidado de mantener las condiciones de la prueba igual en todos y cada uno de los puntos de la atmósfera.
- Ambos desecantes deben ser secados a 120° C durante 4 horas, previos a su uso.
- Tener mucho cuidado al colocar la intensidad del sello adecuado para cada material, para obtener un sello hermético.
- Se debe sellar el material de tal manera que el lado con impresión o exterior esté hacia fuera y obtener el flujo de vapor de la misma manera que con el producto empacado.

- El tiempo utilizado para tomar las mediciones no deberá ser mayor al 1% de intervalos de tiempo entre cada medición, es decir si realizamos las mediciones cada 2 días, el tiempo máximo para realizar la medición será de 30 minutos.
- El desecante no podrá ganar más del 10% de su peso original para obtener datos concretos de transferencia real a través de los materiales.

Procedimiento:

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Cortar las muestras de tamaño aproximado de 12 cm x 22 cm, doblar y sellar dos lados dejando un lado abierto para colocar el desecante.
- Se utilizarán 4 Pouches en la incubadora por material, 2 para cada desecante. Para el cuarto acondicionado se utilizará solamente 2 Pouches, uno para cada desecante. Con esto tenemos 6 Pouches para cada material, dando un total de 36.
- Enumerar cada Pouch y colocarlo vacío en la balanza y encerrar el peso, para de esta manera agregar el desecante previamente secado, hasta alcanzar un valor un poco mayor a 20 gramos.

- Sellar el lado abierto en los Pouches y medir sus dimensiones para obtener el área de transferencia.
- Mediante el uso de cinta y clips, formar bases para colocar los Pouches en cada uno de las atmósferas.
- Pesar cada uno de los Pouches cada 2 o 3 días y registrar la ganancia en peso de cada uno, hasta obtener 6 valores de peso para graficar. Recordar agitar el Pouch antes de colocarlo en la atmósfera controlada.
- Graficar la ganancia de peso del desecante en gramos (Q) vs. tiempo en horas (t) para obtener la pendiente de la misma. Finalmente utilizar la ecuación para obtener la transferencia de vapor de agua (WVTR), donde A es el área de transferencia en cada material:

$$WVTR = \frac{Q/t}{A}$$

En la figura 2.6, 2.7 y 2.8 observamos como quedan los Pouches luego de sellarlos y dentro de cada atmósfera.



Figura 2.6 SELLADO DE POUCHES



Figura 2.7 POUCHES SELLADOS



Figura 2.8 POUCHES EN INCUBADORA



Figura 2.9 POUCHES EN CUARTO ACONDICIONADO

En las tablas 17 y 18 se muestran las dimensiones de los Pouches, donde M1 y M2 son los Pouches colocados en la incubadora, y C es el Pouch en el cuarto acondicionado.

TABLA 17				
DIMENSIONES DE LOS POUCHES (DESECANTE EN POLVO)				
Material	Muestra	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm²)
BOPP 20 + Met BOPP 20	M1	78	76,9	119,964
	M2	80,1	75,1	120,310
	C	100	97,1	194,200
Poliéster 12 + PE 44m	M1	82,6	84,5	139,594
	M2	82,8	81,9	135,626
	C	98,7	97,7	192,860
Poliéster 12 + PE 102	M1	83,4	82,7	137,944
	M2	82,2	82,8	136,123
	C	98	98,6	193,256
BOPP 20	M1	81,4	82,0	133,496
	M2	82,1	82,3	135,137
	C	97,5	97,7	190,515
BOPP 30	M1	81	84,3	136,566
	M2	82	84,5	138,580
	C	97,4	97,5	189,930
Nylon 25	M1	99,4	98,7	196,216
	M2	99,8	98,2	196,007
	C	98,7	98,2	193,847

TABLA 18				
DIMENSIONES DE LOS POUCHES (DESECANTE EN GRANOS)				
Material	Muestra	L1 (mm)	L2 (mm)	Área (cm²)
BOPP 20 + Met BOPP 20	M1	96,1	99,1	190,470
	M2	98,1	101,0	198,162
	C	96	96,2	184,704
Poliéster 12 + PE 44m	M1	99,1	99,2	196,614
	M2	97,6	99,8	194,810
	C	85,8	83,8	143,801
Poliéster 12 + PE 102	M1	97,9	97,9	191,688
	M2	98,8	98,6	194,834
	C	98,4	98,8	194,438
BOPP 20	M1	95,5	97,4	186,034
	M2	95	97,9	186,010
	C	96	96	184,320
BOPP 30	M1	96	97,8	187,776
	M2	98	96,3	188,748
	C	98,3	97,9	192,471
Nylon 25	M1	96,8	98,7	191,083
	M2	99,4	97,6	194,029
	C	97,2	98,8	192,067

2.4 Ensayo de Coeficiente de Fricción (COF)

Los ensayos de tracción y elongación fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM D 1894, en los laboratorios de PLASTLIT.

Equipos:

Los equipos utilizados fueron los siguientes:

- Equipo de medición de Coeficientes de fricción, el mismo que consta de los siguientes componentes.
 - Dinamómetro
 - Placa deslizante sobre tornillo sinfín
 - Lámina metálica lisa

Debido a políticas de la empresa no se pudo obtener fotografías del mismo. En la figura se logra observar el esquema del equipo utilizado para esta prueba.

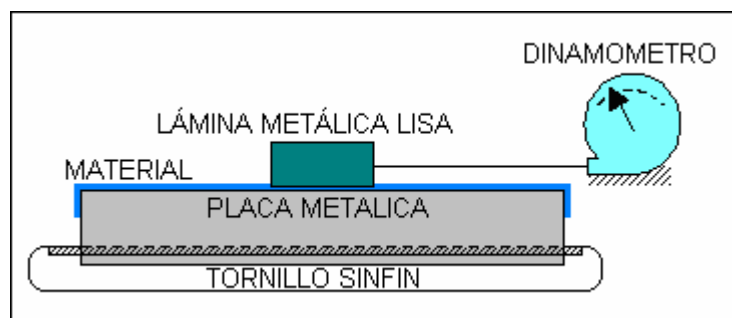


Figura 2.10 ESQUEMA DE EQUIPO MEDIDOR DE COF

Condiciones y Requerimientos:

Las condiciones y requerimientos que se necesitan para poder realizar el ensayo se detallan a continuación:

- Las condiciones atmosféricas de esta prueba son las del laboratorio de PLASTLIT, 21° C y 50% HR.
- Esta prueba necesita de materiales sumamente limpios para que las partículas ajenas al material no afecten a la medida del coeficiente de fricción.
- Tanto la placa metálica, la lámina lisa y la superficie donde se corte el material, deberá ser limpiado con alcohol para evitar contaminar el material.
- Debe examinarse minuciosamente la superficie del material, ya que cualquier irregularidad afecta el material.
- Para facilitar el corte de las muestras se utiliza una placa metálica rectangular de 285 mm X 125 mm, la misma que también deberá estar sumamente limpia.
- Al adherir la muestra a la placa metálica deslizante, se debe mantener una plenitud extrema, sin dejar espacios de aire bajo la muestra, ya que estos también afectan la medición de los coeficientes de fricción.

Procedimiento:

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Limpiar la superficie de corte de muestras, la placa deslizante y lámina lisa con alcohol para eliminar partículas ajenas a la superficie de la muestra.
- Cortar las muestras utilizando la plantilla, 6 de cada material para medir 3 muestras de ambos lados de los materiales.
- Adherir cada muestra a la placa metálica usando cinta adhesiva.
- Colocar la placa con la muestra sobre el tornillo sinfín, y con mucho cuidado colocar la lámina lisa sobre el material.
- Accionar el tornillo sinfín y reportar los cambios en la lectura del dinamómetro.
- Finalmente se divide la lectura para el peso de la lámina lisa, el mismo que es de 250 gramos.

Generalmente para materiales laminados, los coeficientes de fricción estático y dinámico son aproximadamente iguales, por lo que hay que estar atento en la medición del dinamómetro, que marca una medida ligeramente mayor durante un periodo pequeño y luego se estabiliza, siendo el valor momentáneo el utilizado para calcular el coeficiente estático.

2.5 Ensayo de Impacto

Los ensayos de Resistencia al Impacto, se realizaron mediante el método de caída libre del dardo, según la norma ASTM D 1709. El equipo se encuentra en el Laboratorio de Materiales.

Equipos:

Los equipos utilizados para este ensayo, fueron los siguientes:

- Máquina de Impacto al Dardo, que consta de:
 - Dardo de punta redonda con diámetro de 38.0 ± 1 mm
 - Estructura soporte con altura de caída libre es 0.66 ± 0.01 m
 - Pesas para el dardo cuyo rango de Impacto va de 50 a 850 gramos
 - Abrazaderas anulares
 - Recipiente metálico soporte para abrazaderas y protector plástico.
- Balanza Analítica
 - Modelo: Sartorius
 - Rango: 0 – 2000 g
 - Mínima escala: 0.1 g
 - Tipo de Medición: Peso

Condiciones y Requerimientos:

Las condiciones y requerimientos que se necesitan para poder realizar el ensayo son las siguientes:

- Las condiciones ambientales son las del Laboratorio de Materiales: 23° C y 60% HR.
- Siguiendo los parámetros establecidos en el literal B de la norma ASTM D 1709, la altura de caída del dardo es de 0.66 m y se utiliza un dardo con cabeza de 38 mm de diámetro.
- El tamaño de las muestra es aproximadamente un poco mayor a la superficie de las abrazaderas anulares, por lo que se cortan 2 muestras de 0.2 X 1 m para cada material.
- Las muestras deben ser examinadas buscando irregularidades y templadas en toda su superficie al colocarlas en la abrazadera anular, evitando dobladuras.

Procedimiento:

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Marcar 5 zonas para de 0.2 X 0.2 m en cada muestra.
- Colocar la muestra con la zona marcada en la abrazadera anular.
- Se escoge un peso inicial de impacto en el dardo y se deja caer el dardo sobre la muestra.

- A lo largo del ensayo se van añadiendo pesas hasta alcanzar la ruptura del material, midiendo el peso de falla.
- Una vez alcanzada la ruptura se realizan 10 pruebas con un mismo peso hasta corroborar que el impacto causa la ruptura, y que un peso ligeramente menor en el dardo no causa la ruptura.
- Registrar los pesos de falla para cada material.

En las figuras 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 y 2.16 se observa la configuración del equipo utilizado para el ensayo de impacto.



Figura 2.11 BALANZA ANALÍTICA



Figura 2.12 MÁQUINA DE IMPACTO AL DARDO



Figura 2.13 ABRAZADERA ANULAR



Figura 2.14 DARDOS Y PESAS



Figura 2.15 CONFIGURACIÓN DE DARDO Y PESAS



Figura 2.16 RECIPIENTE SOPORTE CON PROTECTOR

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Resultados del Ensayo de Tracción y Elongación

Los resultados del ensayo de tracción y elongación están tabulados en las tablas 19, 20, 21, 22, 23 y 24 para los 6 materiales del estudio. La denominación MD significa que la muestra fue cortada en dirección de la laminación en la máquina; y la denominación TD indica que la muestra fue cortada de manera transversal a la dirección de la laminación en la máquina. Se colocó en cada tabla el valor máximo, mínimo y promedio de las 10 muestras cortadas para cada material. Al final de cada tabla se encuentra el valor de resistencia y elongación de los materiales.

TABLA 19							
ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN DE L1							
Longitudinal (MD)				Transversal (TD)			
Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr. (mm)	Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr. (mm)
40	Max.	15,90	13,00	40	Max.	28,30	3,40
	Min.	13,70	9,40		Min.	25,90	2,30
	Prom.	14,60	11,50		Prom.	27,10	2,90
Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		365		Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		144,44	
Elongación (%)		23		Elongación (%)		5,8	

TABLA 20							
ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN DE L2							
Longitudinal (MD)				Transversal (TD)			
Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)	Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)
56	Max.	8,80	6,80	56	Max.	9,10	5,00
	Min.	7,20	5,10		Min.	8,60	4,00
	Prom	7,80	6,30		Prom	8,90	4,50
Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		677,5		Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		164,81	
Elongación (%)		12,6		Elongación (%)		9	

TABLA 21							
ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN DE L3							
Longitudinal (MD)				Transversal (TD)			
Esesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)	Esesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)
114	Max.	9,80	6,40	114	Max.	9,50	4,10
	Min.	9,10	4,70		Min.	9,00	3,50
	Prom	9,50	5,60		Prom	9,20	3,90
Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		83,33		Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		80,7	
Elongación (%)		11,2		Elongación (%)		7,8	

TABLA 22							
ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN DE BOPP 20							
Longitudinal (MD)				Transversal (TD)			
Esesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)	Esesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)
20	Max.	6,12	88,24	20	Max.	6,26	72,44
	Min.	2,31	13,85		Min.	2,11	18,29
	Prom	4,52	55,23		Prom	4,32	59,25
Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		89,04		Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		85,1	
Elongación (%)		36,82		Elongación (%)		39,5	

TABLA 23							
ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN DE BOPP 30							
Longitudinal (MD)				Transversal (TD)			
Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)	Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)
30	Max.	9,41	102,78	30	Max.	8,98	112,13
	Min.	6,34	48,11		Min.	5,98	52,45
	Prom	8,11	80,11		Prom	7,60	85,24
Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		106,47		Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		99,67	
Elongación (%)		53,41		Elongación (%)		56,82	

TABLA 24							
ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN DE Nylon 25							
Longitudinal (MD)				Transversal (TD)			
Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)	Espesor (micras)		Resist. (kgf)	Recorr (mm)
25	Max.	13,46	31,46	25	Max.	11,55	38,94
	Min.	6,99	9,00		Min.	6,66	9,10
	Prom	9,99	21,68		Prom	9,60	23,67
Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		157,28		Resistencia a la Ruptura (kgf/cm²)		151,21	
Elongación (%)		14,45		Elongación (%)		15,78	

En la figura 3.1 se graficaron los valores de resistencia MD y TD junto con el espesor para cada material, donde se nota una clara superioridad en la laminación L1 correspondiente al metalizado de BOPP. También se distingue que la menor resistencia la tiene la laminación L3, junto con el BOPP 20. El Nylon y la laminación tienen valores similares de resistencia, ligeramente mayores a la resistencia del BOPP 30. Una observación adicional es la similitud en la resistencia MD y TD para la laminación L3 y la materia prima, donde la resistencia MD alcanza valores ligeramente mayores que la resistencia TD. En las laminaciones L1 y L2 ocurre lo contrario, ya que se nota la diferencia entre la resistencia MD y TD, siendo en este caso la resistencia TD mayor.

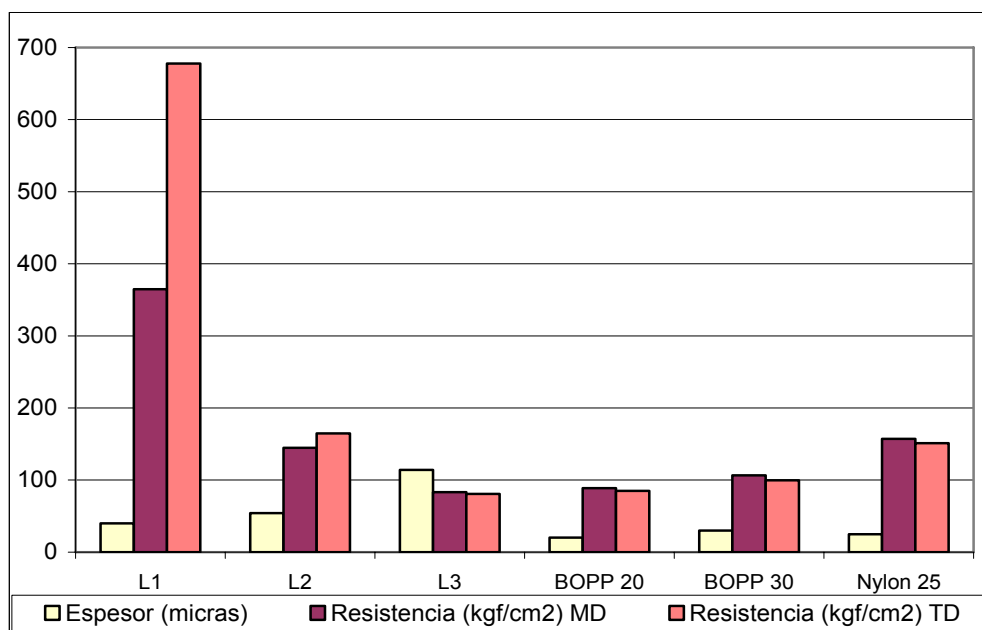


Figura 3.1: RESISTENCIA MD Y TD

De la misma forma en la figura 3.2 se graficaron las elongaciones MD y TD junto con los espesores para cada material. Un comportamiento general que resultó en las laminaciones es que la elongación en dirección de la máquina siempre fue mayor a la elongación en la dirección transversal. Lo contrario ocurrió con la materia prima donde la elongación transversal fue ligeramente mayor que la elongación en dirección de la máquina. Con lo que respecta a los valores se aprecia claramente que la materia prima tiene mejor elongación que los laminados, como se aprecia en el BOPP comparado con la laminación L1. El Nylon es la única materia prima con baja elongación, pero aún así superó a las laminaciones L2 y L3.

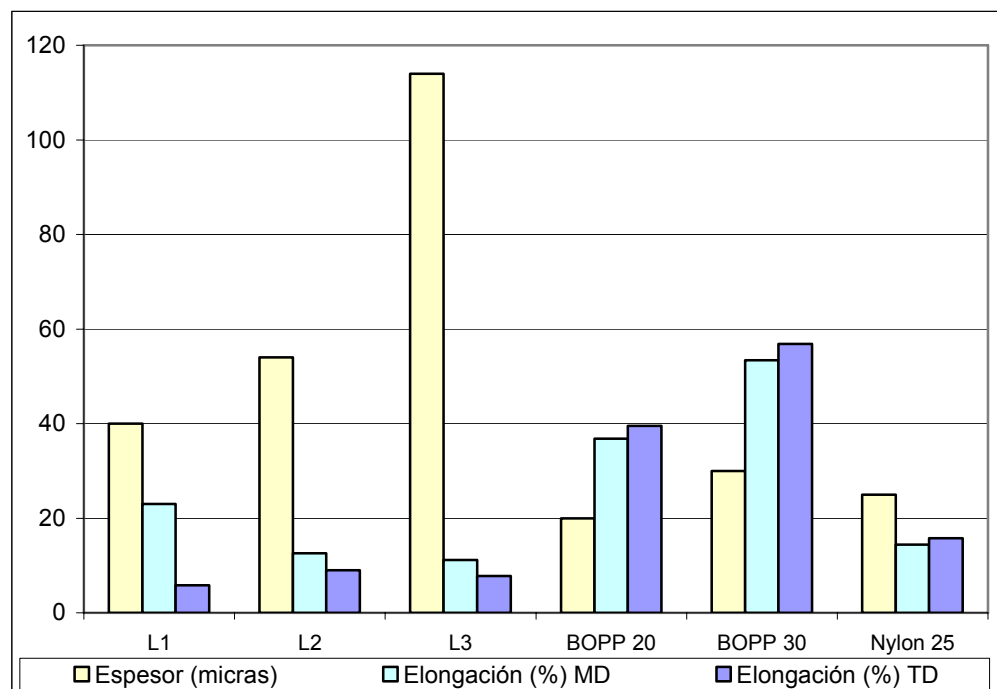


Figura 3.2: ELONGACIÓN MD Y TD

3.2 Resultados del Ensayo WVTR

A continuación se muestran los resultados del ensayo WVTR, donde se tabuló la ganancia en peso por el desecante debido a la permeación de vapor de agua. Las tablas 25 y 26 muestra las diferencias de peso utilizando el desecante en polvo en cada Pouch; mientras en las tablas 27 y 28 se muestra las diferencias de peso utilizando un desecante granulado.

TABLA 25								
Peso ganado (gramos) por el desecante en polvo debido a la permeación de vapor de H ₂ O @ condiciones 38° C, 42,75% HR								
Tiempo (horas)	L1		L2		L3		BOPP 20	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0
47,92	0	0,01	0,06	0,06	0,03	0,03	0,06	0,06
93,25	0,01	0,01	0,12	0,12	0,05	0,05	0,13	0,13
189,75	0,01	0,02	0,25	0,25	0,12	0,11	0,28	0,27
379,75	0,03	0,04	0,48	0,46	0,22	0,21	0,52	0,51
428,58	0,04	0,04	0,52	0,51	0,25	0,24	0,57	0,55
Tiempo (horas)	BOPP 30				NYLON 25			
	M1		M2		M1		M2	
0,00	0		0		0		0	
45,33	0,0448		0,0199		0,5177		0,5485	
120,00	0,124		0,1131		1,0698		1,1175	
167,75	0,166		0,154		1,2845		1,3341	
215,75	0,2146		0,1954		1,4151		1,463	
284,08	0,2851		0,2603		1,6083		1,6577	

TABLA 26						
Peso ganado (gramos) por el desecante en polvo debido a la permeación de vapor de H ₂ O @ condiciones 21° C, 47.3% HR						
Tiempo (horas)	L1	L2	L3	BOPP 20	BOPP 30	NYLON 25
	C	C	C	C	C	C
0,00	0	0	0	0	0	0
48,00	0,0054	0,0359	0,0175	0,0282	0,0193	0,2945
142,17	0,0107	0,1141	0,0503	0,0948	0,0659	1,0019
190,83	0,0126	0,1509	0,0654	0,1282	0,0883	1,3241
239,00	0,0131	0,1813	0,079	0,1545	0,1071	1,5743
306,75	0,019	0,2682	0,1156	0,2305	0,1604	2,2304

TABLA 27						
Peso ganado (gramos) por el desecante en granos debido a la permeación de vapor de H ₂ O @ condiciones 34,6° C, 42,75% HR						
Tiempo (horas)	L1		L2		L3	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
0,00	0	0	0	0	0	0
45,25	0,01	0	0,09	0,09	0,04	0,04
119,92	0,01	0,01	0,24	0,24	0,1	0,1
167,58	0,02	0,02	0,33	0,33	0,14	0,14
215,58	0,03	0,02	0,42	0,42	0,18	0,18
283,42	0,03	0,03	0,56	0,56	0,24	0,24
Tiempo (horas)	BOPP 20		BOPP 30		NYLON 25	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
0,00	0	0	0	0	0	0
45,25	0,09	0,1	0,06	0,07	0,59	0,61
119,92	0,24	0,27	0,15	0,17	1,37	1,42
167,58	0,34	0,37	0,22	0,24	1,79	1,73
215,58	0,44	0,47	0,28	0,3	2,11	2,06
283,42	0,58	0,63	0,38	0,41	2,45	2,45

TABLA 28						
Peso ganado (gramos) por el desecante en granos debido a la permeación de vapor de H ₂ O @ condiciones 21° C, 47.3% HR						
Tiempo (horas)	L1	L2	L3	BOPP 20	BOPP 30	NYLON 25
	C	C	C	C	C	C
0,00	0	0	0	0	0	0
94,33	0,0057	0,0666	0,0362	0,0746	0,0497	0,8939
142,92	0,0084	0,0984	0,0537	0,1089	0,0743	1,2372
191,17	0,0109	0,1248	0,0688	0,1387	0,0948	1,5388
259,00	0,0172	0,1978	0,1103	0,2193	0,1509	2,3466
309,92	0,0213	0,228	0,1265	0,25	0,1729	2,5949

Se realizan los gráficos de ganancia en peso del desecante contra el tiempo de exposición al ambiente para obtener el valor de la pendiente Q/t, el mismo que sirve para obtener los valores de Permeancia y coeficientes de permeabilidad para cada material según las condiciones del ensayo. En las tablas de la 29 a la 40 junto con las figuras de la 3.3 a la 3.14, se muestra los valores obtenidos para el ensayo WVTR en la incubadora (38° C, 42.75% HR) y en el cuarto acondicionado (21° C, 47.3% HR) utilizando desecante en polvo. Luego en las tablas de la 41 a la 52 junto con las figuras de la 3.15 a la 3.26, se muestra los valores obtenidos para el ensayo WVTR en la incubadora (34.6° C, 42.75% HR) y en el cuarto acondicionado (21° C, 47.3% HR) utilizando desecante en granos.

TABLA 29		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Guayaquil (38° C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	119,96	120,31
Espesor en micras (μ)	40	40
Q/t (g/hr)	9,21763E-05	9,54247E-05
WVTR (g/h-cm ²)	7,68366E-07	7,93156E-07
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3,69174E-08	3,81085E-08
Coef. de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,47670E-06	1,52434E-06
Coef. de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,500517E-06	

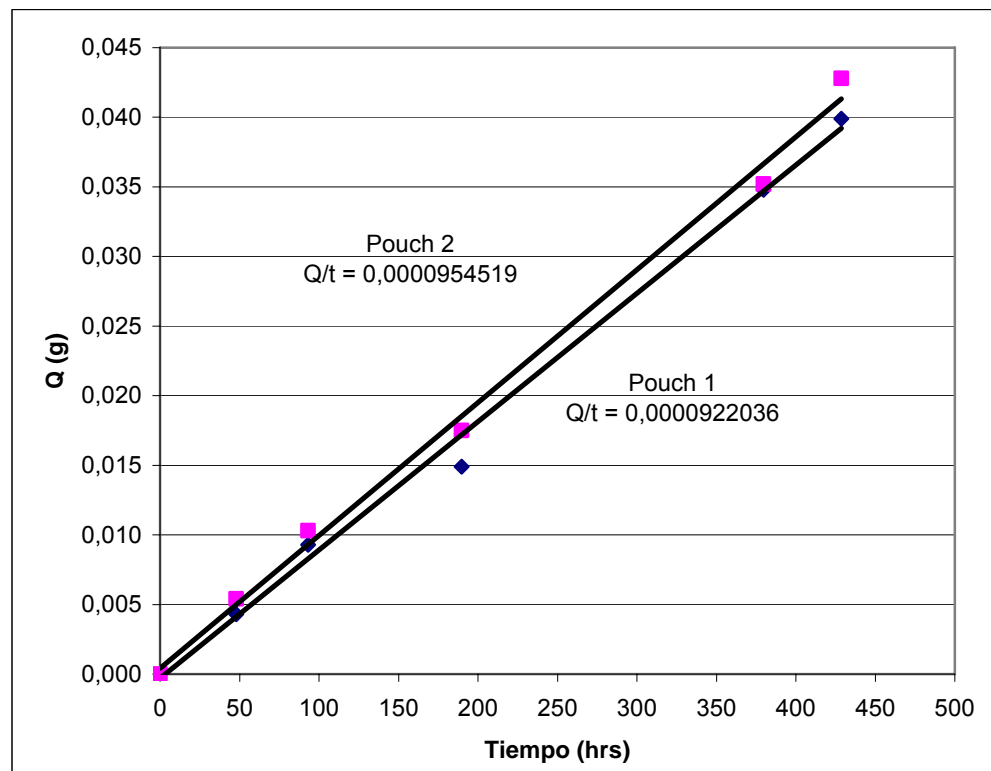


Figura 3.3: CURVA Q/t PARA L1 @ 38° C

TABLA 30		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	139,59	135,63
Espesor en micras (μ)	56	56
Q/t (g/hr)	1,22925E-03	1,19471E-03
WVTR (g/h-cm ²)	8,80591E-06	8,80884E-06
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4,23094E-07	4,23235E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,36933E-05	2,37012E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,369722E-05	

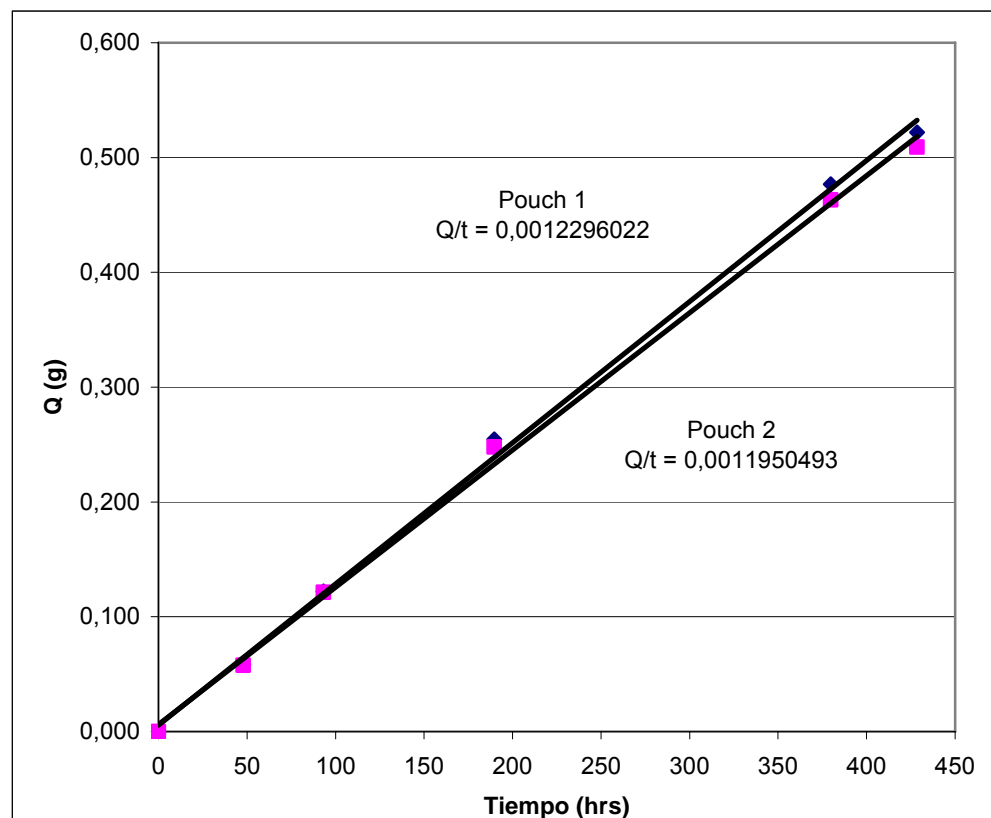


Figura 3.4: CURVA Q/t PARA L2 @ 38° C

TABLA 31		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L3 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	137,94	136,12
Espesor en micras (μ)	114	114
Q/t (g/hr)	5,84102E-04	5,56616E-04
WVTR (g/h-cm ²)	4,23435E-06	4,08906E-06
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2,03446E-07	1,96466E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,31929E-05	2,23971E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,279497E-05	

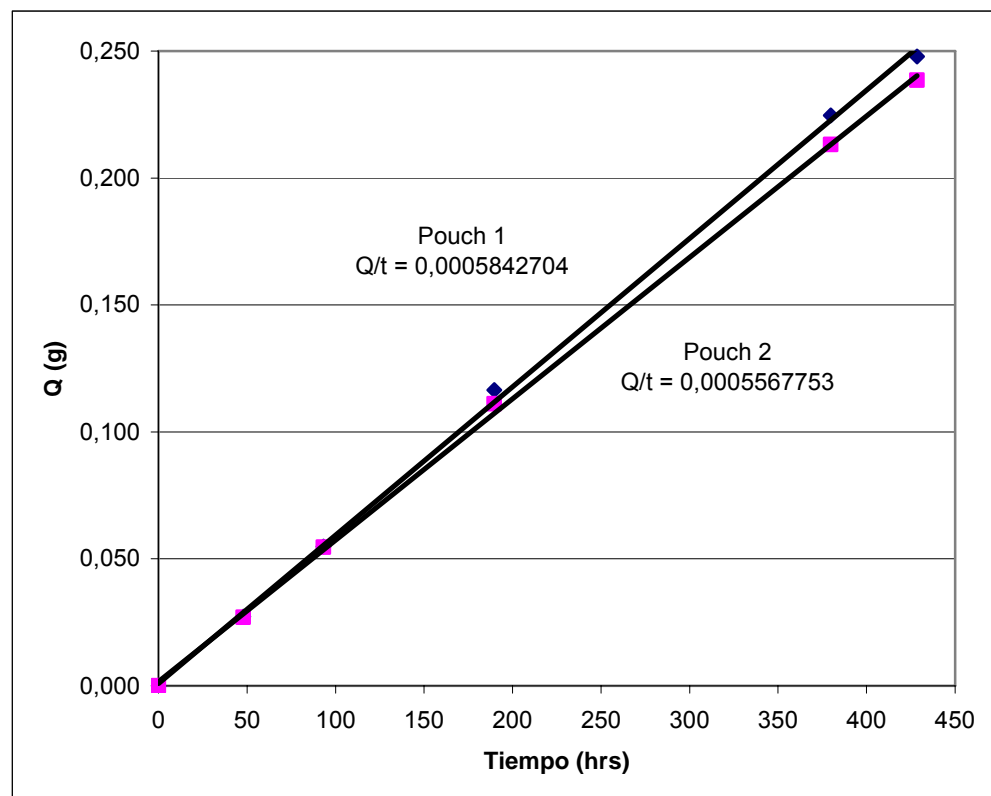


Figura 3.5: CURVA Q/t PARA L3 @ 38° C

TABLA 32		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	133,50	135,14
Espesor en micras (μ)	20	20
Q/t (g/hr)	1,34694E-03	1,30578E-03
WVTR (g/h-cm ²)	1,00897E-05	9,66267E-06
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4,84779E-07	4,64259E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	9,69557E-06	9,28518E-06
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	9,490375E-06	

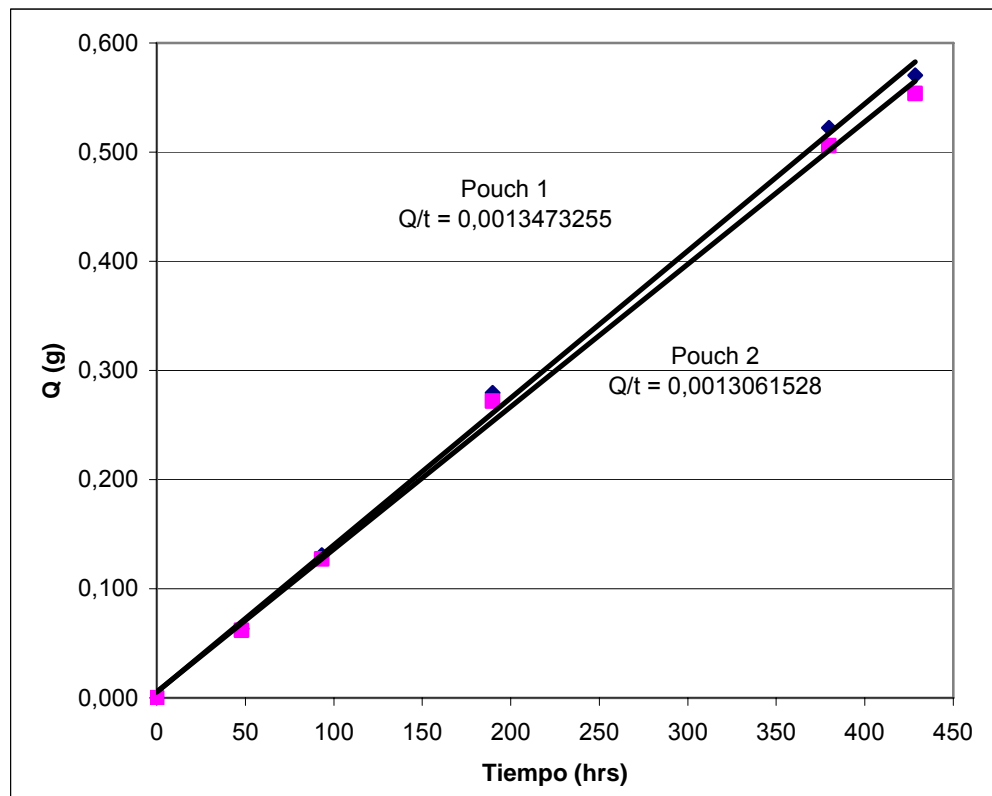


Figura 3.6: CURVA Q/t PARA BOPP20 @ 38° C

TABLA 33		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	136,57	138,58
Espesor en micras (μ)	30	30
Q/t (g/hr)	9,99701E-04	9,48229E-04
WVTR (g/h-cm ²)	7,32027E-06	6,84246E-06
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3,51715E-07	3,28757E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,05514E-05	9,86272E-06
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,020708E-05	

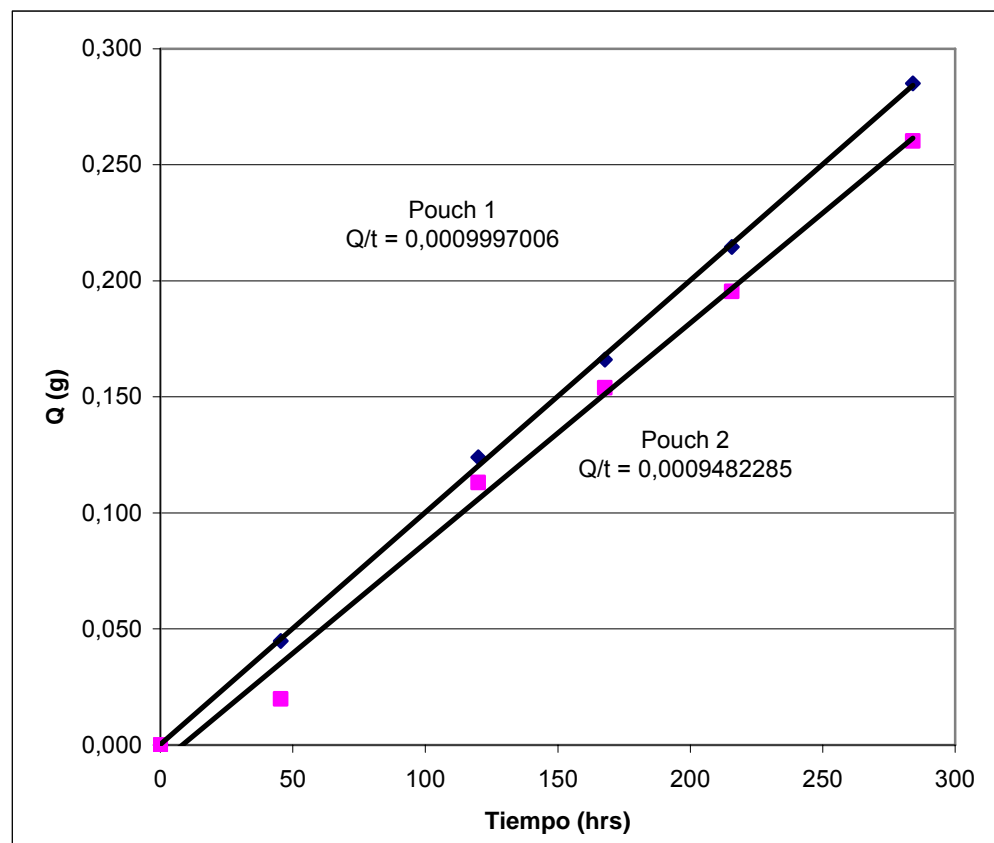


Figura 3.7: CURVA Q/t PARA BOPP 30 @ 38° C

TABLA 34		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Guayaquil (38°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	196,22	196,01
Espesor en micras (μ)	25	25
Q/t (g/hr)	5,53387E-03	5,68540E-03
WVTR (g/h-cm ²)	2,82030E-05	2,90061E-05
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	1,35506E-06	1,39364E-06
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	3,38765E-05	3,48411E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	3,435879E-05	

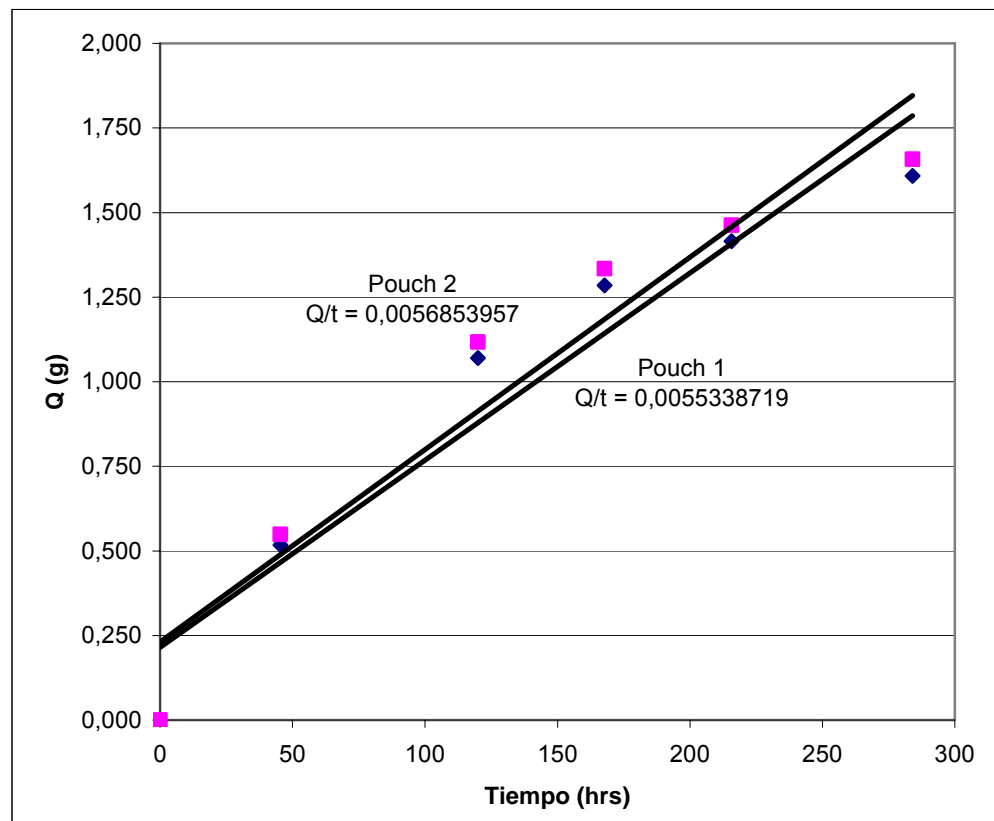


Figura 3.8: CURVA Q/t PARA Nylon 25 @ 38° C

TABLA 35	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	194,20
Espesor en micras (μ)	40
Q/t (g/hr)	5,60102E-05
WVTR (g/h-cm ²)	2,88415E-07
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3,09458E-08
Coef. de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,23783E-06

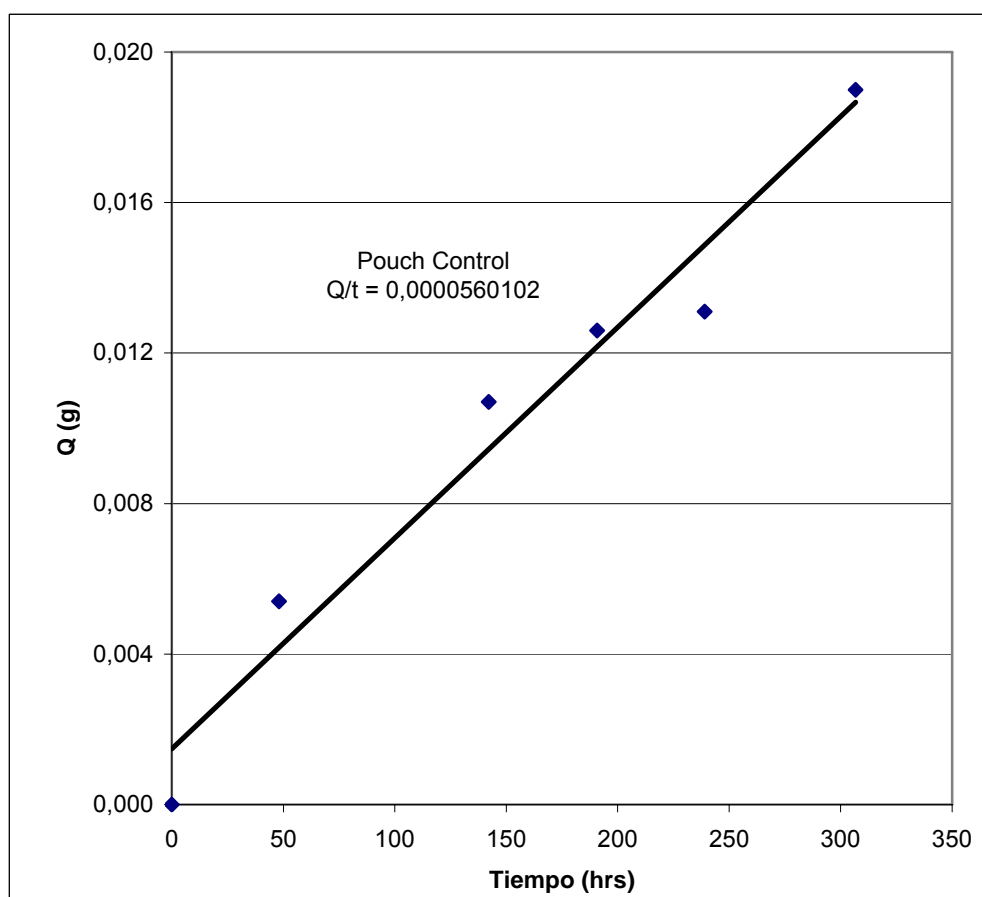


Figura 3.9: CURVA Q/t PARA L1 @ 21° C

TABLA 36	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	192,86
Espesor en micras (μ)	56
Q/t (g/hr)	8,42275E-04
WVTR (g/h-cm ²)	4,36729E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4,68594E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,62413E-05

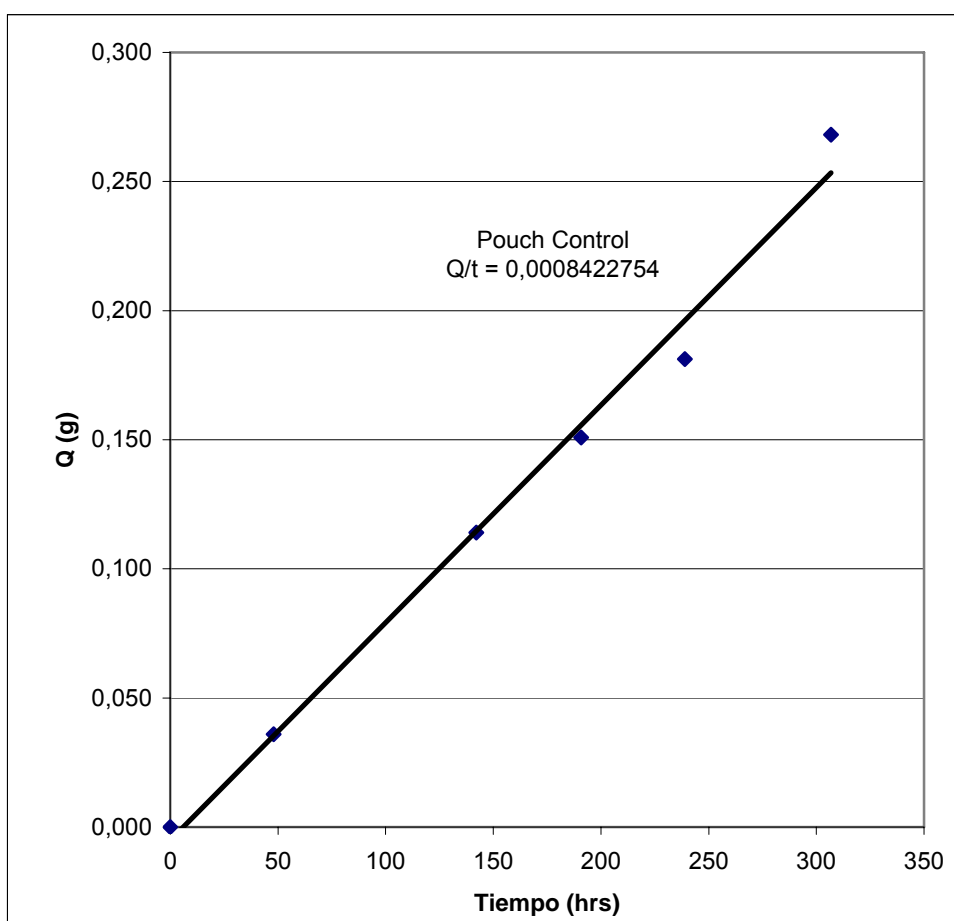


Figura 3.10: CURVA Q/t PARA L2 @ 21° C

TABLA 37	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L3 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	193,26
Espesor en micras (μ)	114
Q/t (g/hr)	3,60889E-04
WVTR (g/h-cm ²)	1,86741E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2,00366E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,28417E-05

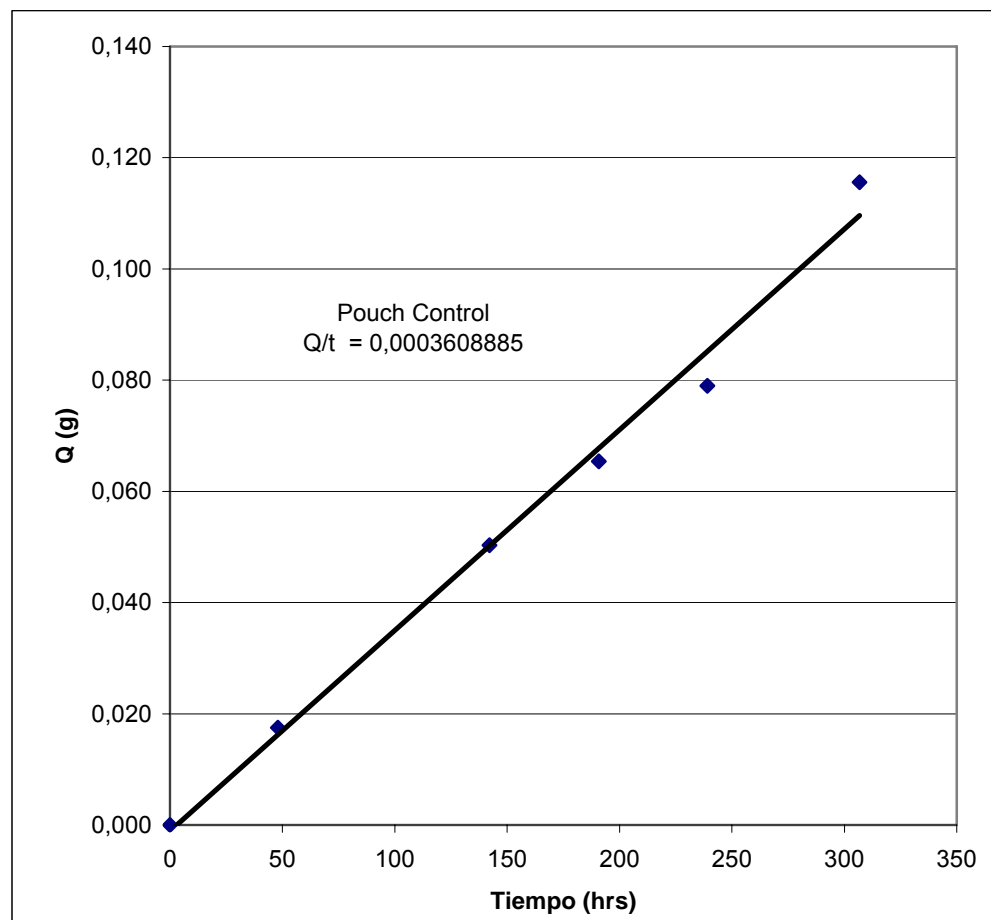


Figura 3.11: CURVA Q/t PARA L3 @ 21° C

TABLA 38	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Quito(21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	190,52
Espesor en micras (μ)	20
Q/t (g/hr)	7,26226E-04
WVTR (g/h-cm ²)	3,81191E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4,09003E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	8,18007E-06

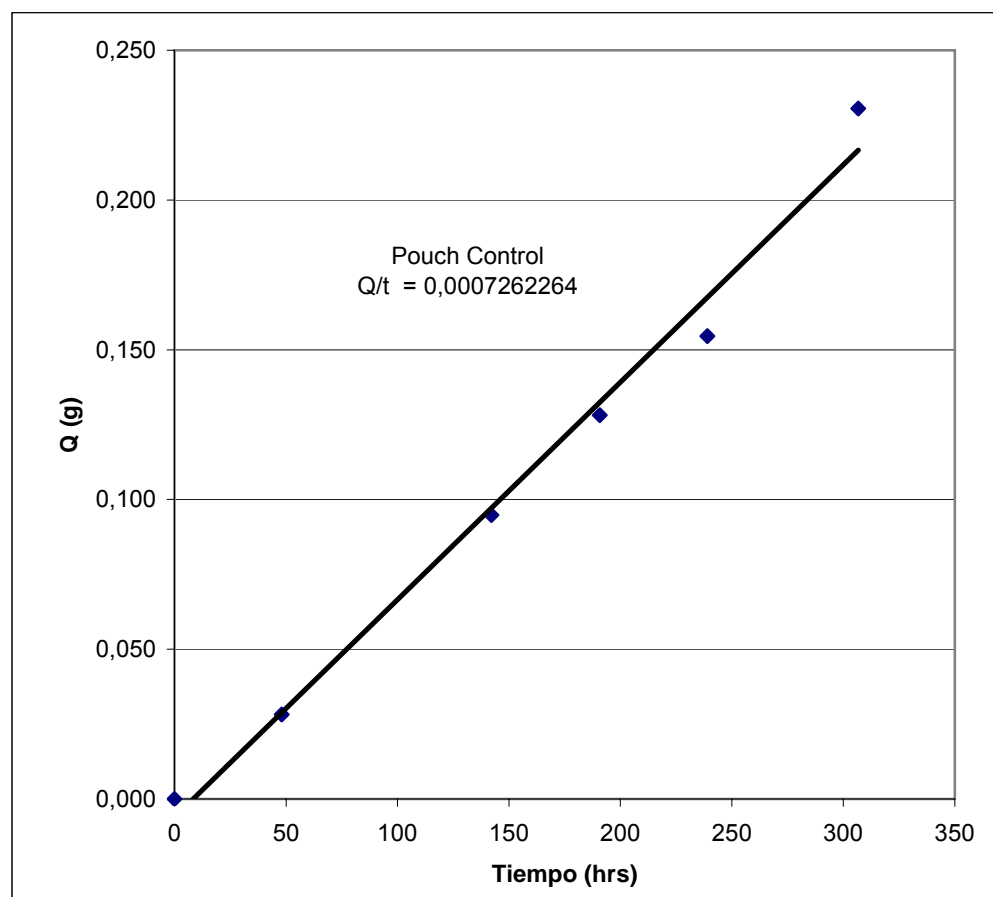


Figura 3.12: CURVA Q/t PARA BOPP 20 @ 21° C

TABLA 39	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	189,93
Espesor en micras (μ)	30
Q/t (g/hr)	5,04876E-04
WVTR (g/h-cm ²)	2,65822E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2,85217E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	8,55651E-06

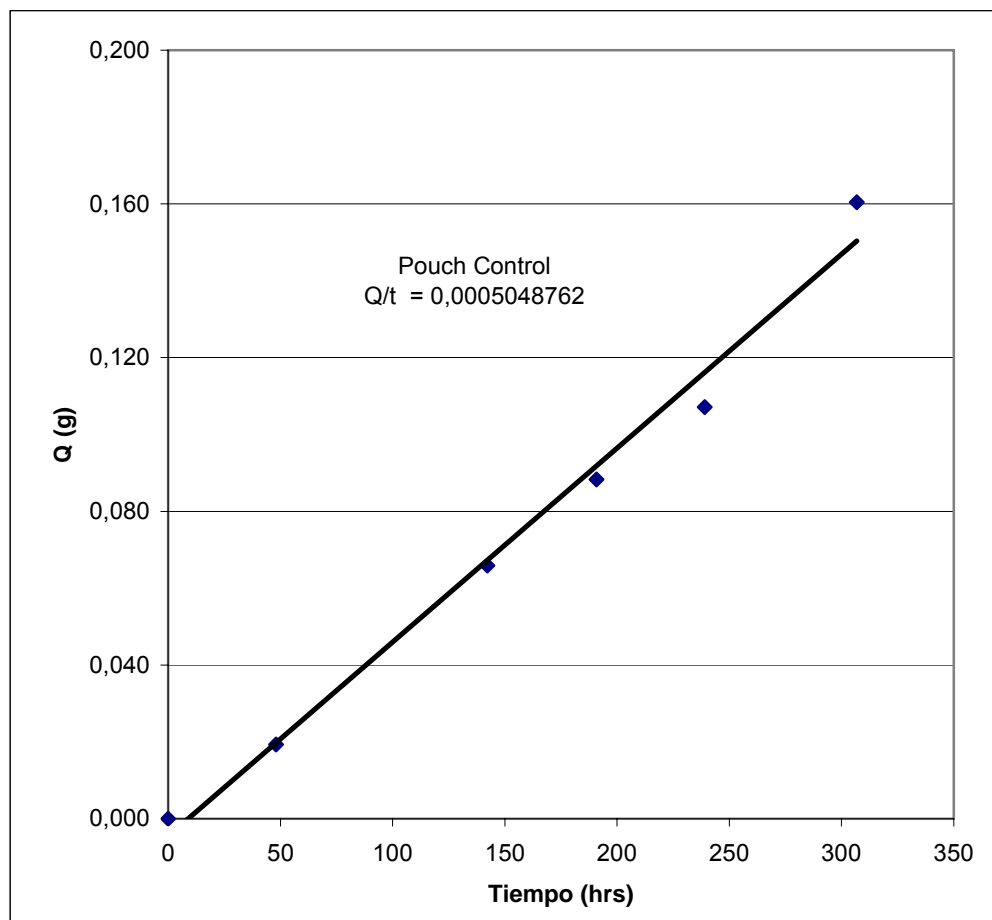


Figura 3.13: CURVA Q/t PARA BOPP 30 @ 21° C

TABLA 40	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	193,85
Espesor en micras (μ)	25
Q/t (g/hr)	7,12279E-03
WVTR (g/h-cm ²)	3,67444E-05
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3,94253E-06
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	9,85633E-05

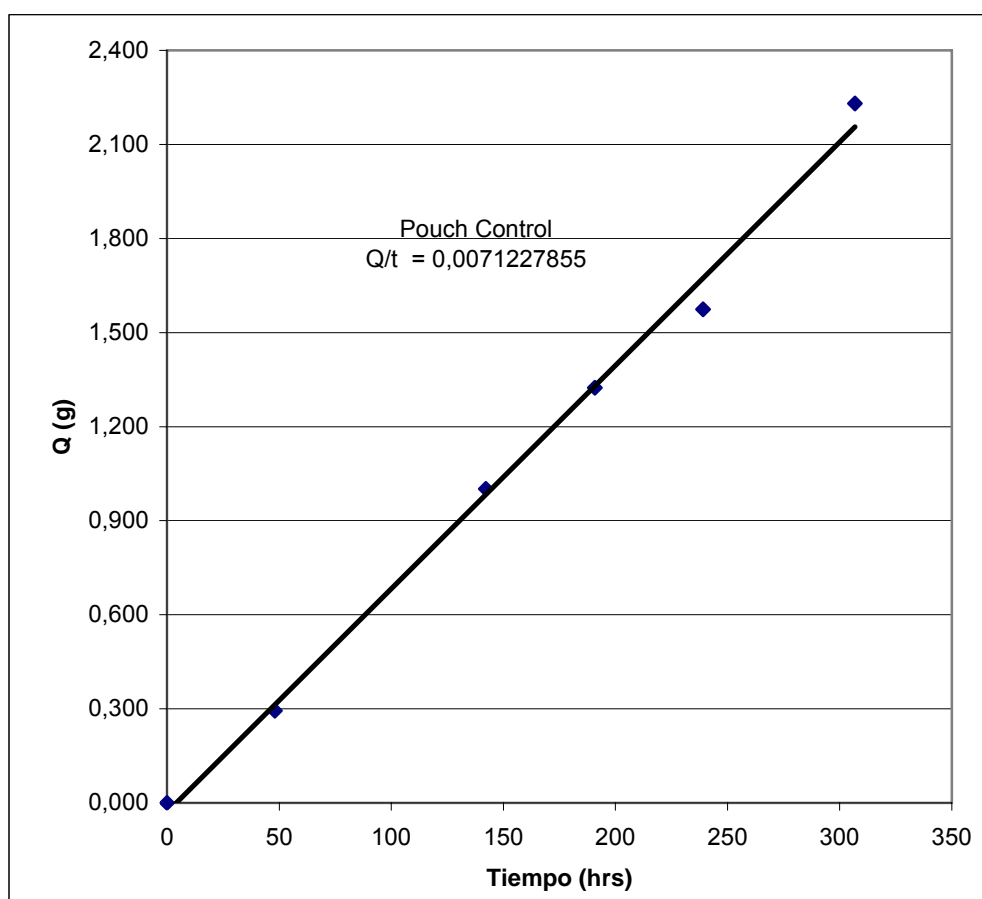


Figura 3.14: CURVA Q/t PARA Nylon 25 @ 21° C

TABLA 41		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	190,47	198,16
Espesor en micras (μ)	40	40
Q/t (g/hr)	1,12096E-04	1,05841E-04
WVTR (g/h-cm ²)	5,88521E-07	5,34116E-07
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2,82765E-08	2,56625E-08
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,13106E-06	1,02650E-06
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,078779E-06	

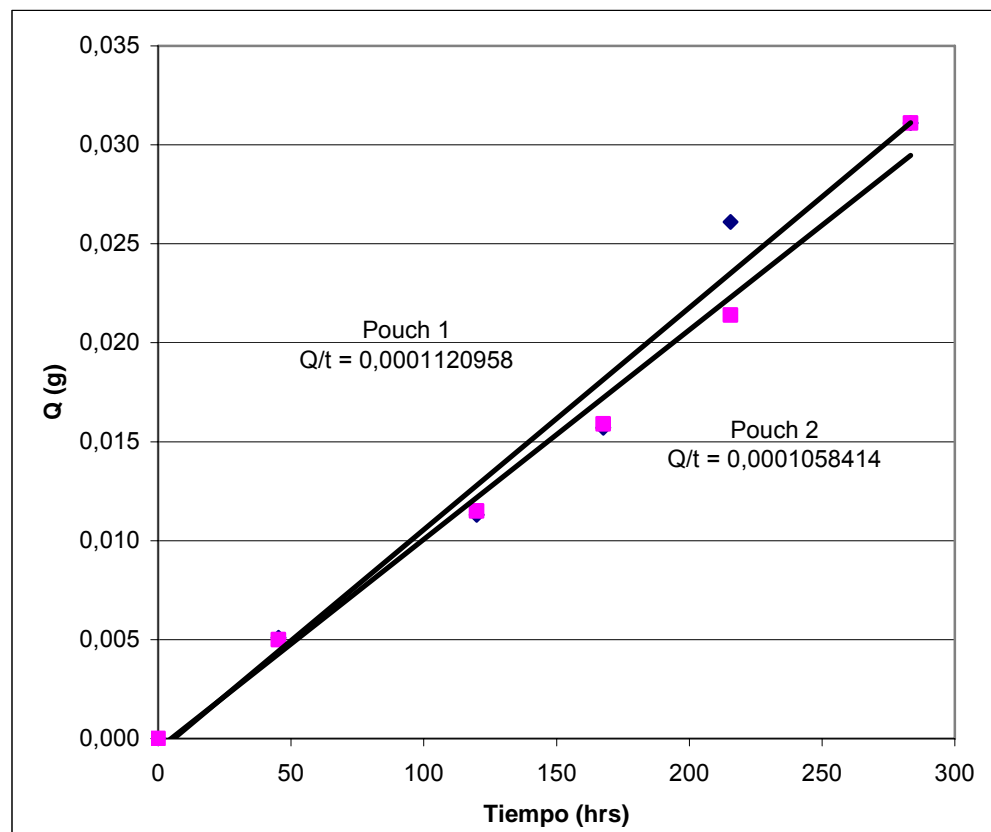


Figura 3.15: CURVA Q/t PARA L1 @ 34,6° C

TABLA 42		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	196,61	194,81
Espesor en micras (μ)	56	56
Q/t (g/hr)	1,96315E-03	1,98179E-03
WVTR (g/h-cm ²)	9,98478E-06	1,01729E-05
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4,79735E-07	4,88775E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,68652E-05	2,73714E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,711830E-05	

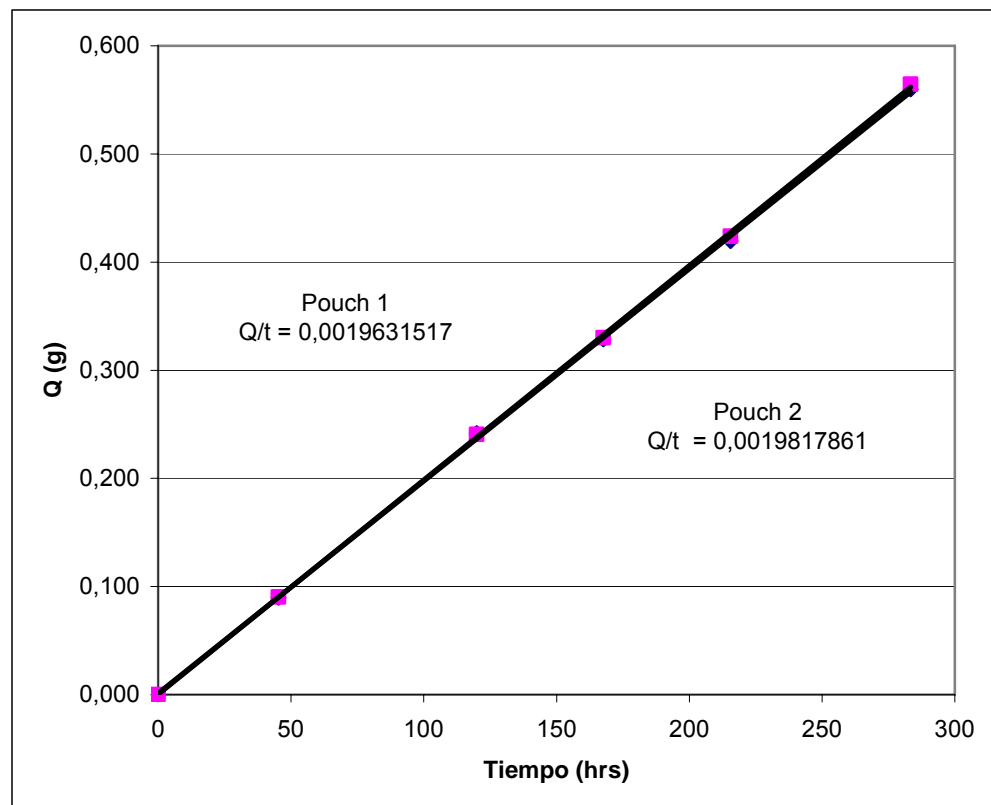


Figura 3.16: CURVA Q/t PARA L2 @ 34,6° C

TABLA 43		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L3 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	191,69	194,83
Espesor en micras (μ)	114	114
Q/t (g/hr)	8,42504E-04	8,53486E-04
WVTR (g/h-cm ²)	4,39518E-06	4,38059E-06
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2,11174E-07	2,10472E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,40738E-05	2,39939E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,403383E-05	

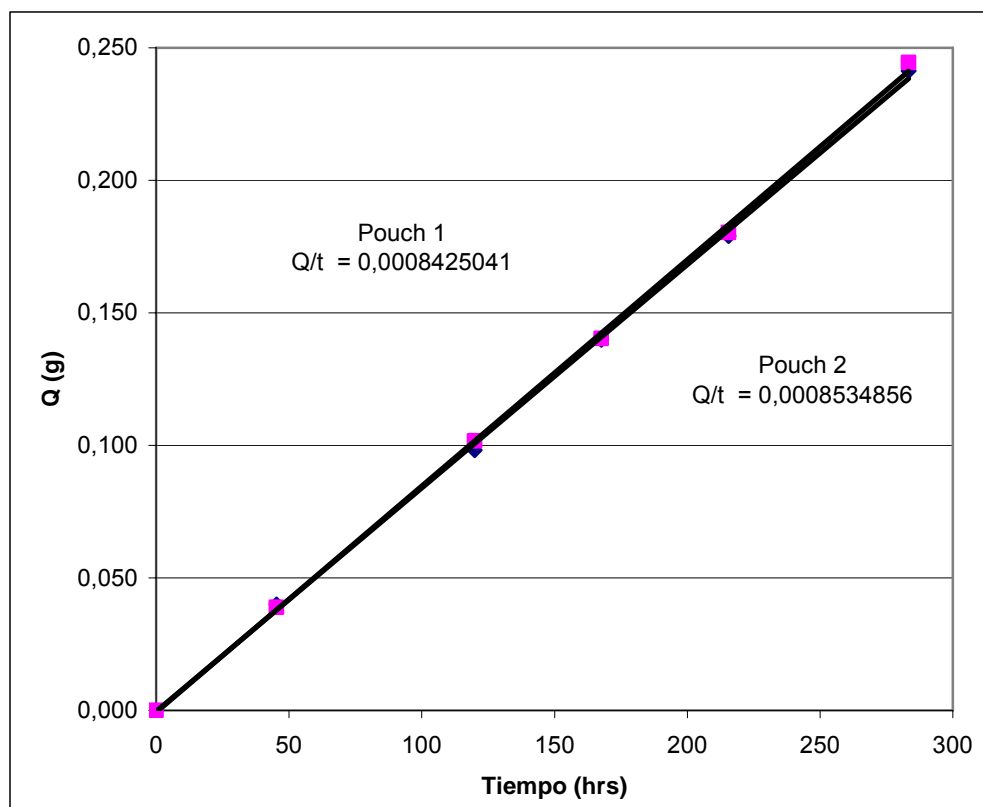


Figura 3.17: CURVA Q/t PARA L3 @ 34,6° C

TABLA 44		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	186,03	186,01
Espesor en micras (μ)	20	20
Q/t (g/hr)	2,03984E-03	2,20798E-03
WVTR (g/h-cm ²)	1,09649E-05	1,18702E-05
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	5,26825E-07	5,70324E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,05365E-05	1,14065E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,097149E-05	

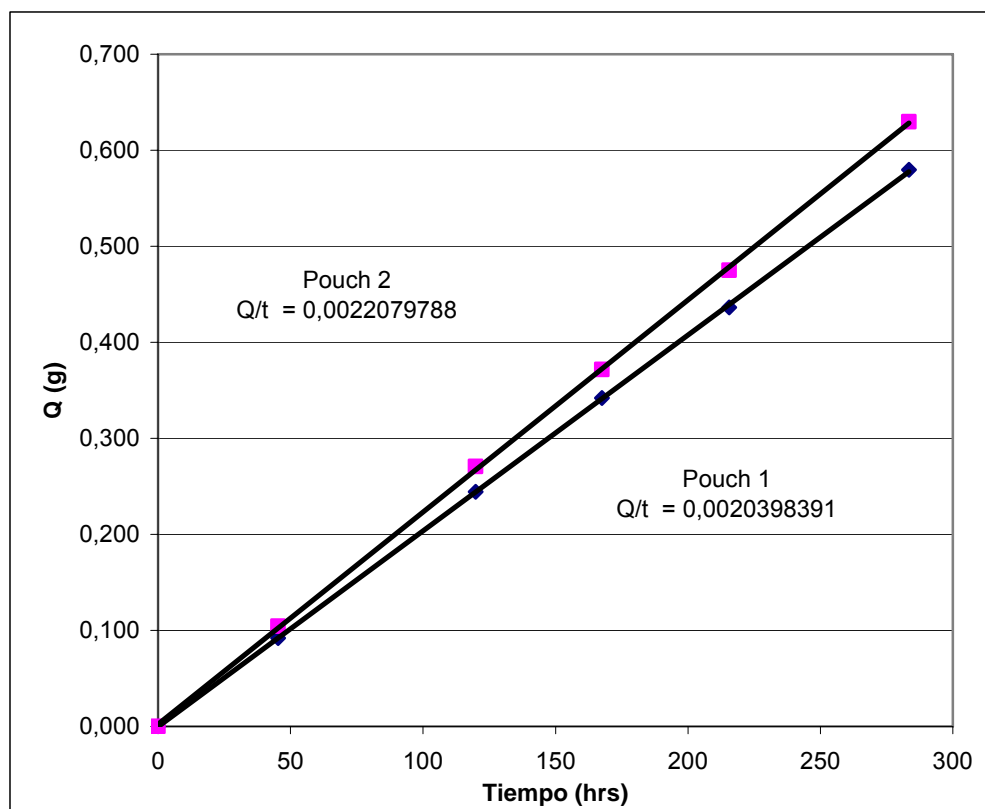


Figura 3.18: CURVA Q/t PARA BOPP 20 @ 34,6° C

TABLA 45		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	187,78	188,75
Espesor en micras (μ)	30	30
Q/t (g/hr)	1,32246E-03	1,42246E-03
WVTR (g/h-cm ²)	7,04274E-06	7,53630E-06
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3,38380E-07	3,62094E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,01514E-05	1,08628E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,050711E-05	

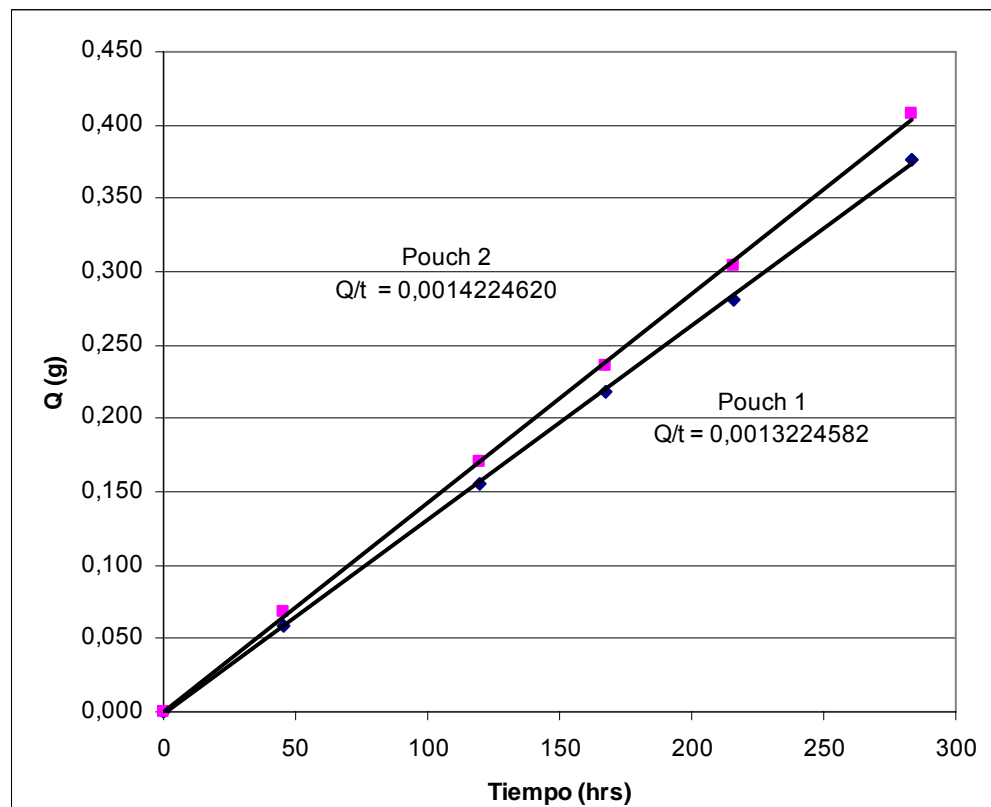


Figura 3.19: CURVA Q/t PARA BOPP 30 @ 34,6° C

TABLA 46		
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Guayaquil (34.6°C y 42.75 % HR)		
	M1	M2
Área del Pouch (cm ²)	191,08	194,03
Espesor en micras (μ)	25	25
Q/t (g/hr)	8,73111E-03	8,56606E-03
WVTR (g/h-cm ²)	4,56927E-05	4,41484E-05
Δp (mm Hg)	20,813111	20,813111
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2,19538E-06	2,12118E-06
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	5,48846E-05	5,30296E-05
Coeficiente de permeabilidad promedio, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	5,395706E-05	

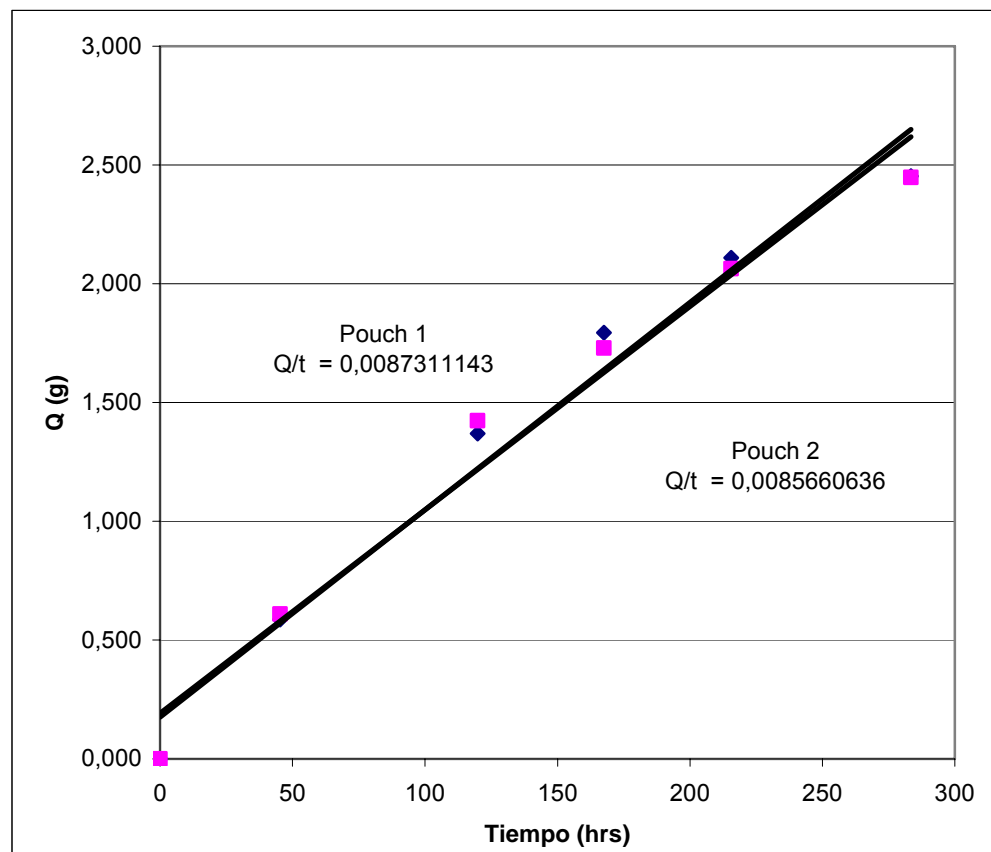


Figura 3.20: CURVA Q/t PARA Nylon 25 @ 34,6° C

TABLA 47	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L1 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	184,70
Espesor en micras (μ)	40
Q/t (g/hr)	6,83786E-05
WVTR (g/h-cm ²)	3,70206E-07
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3,97217E-08
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,58887E-06

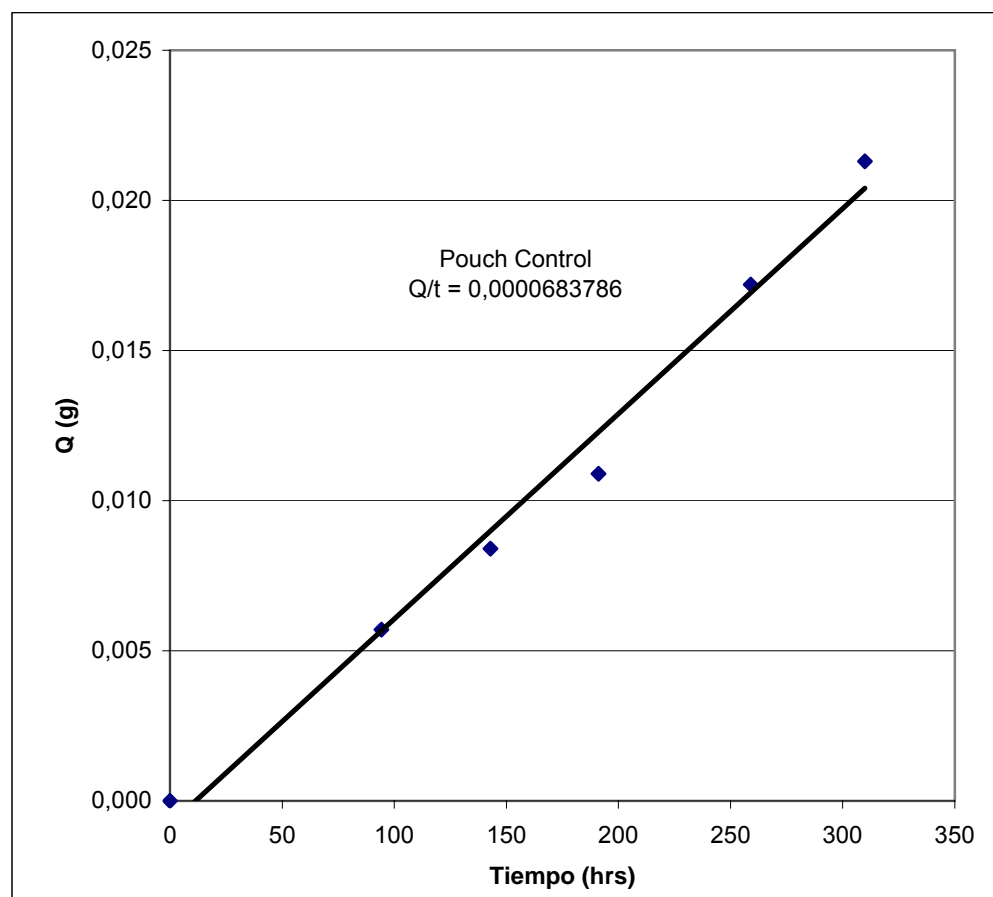


Figura 3.21: CURVA Q/t PARA L1 @ 21° C

TABLA 48	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L2 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	143,80
Espesor en micras (μ)	56
Q/t (g/hr)	7,45753E-04
WVTR (g/h-cm ²)	5,18601E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	5,56439E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	3,11606E-05

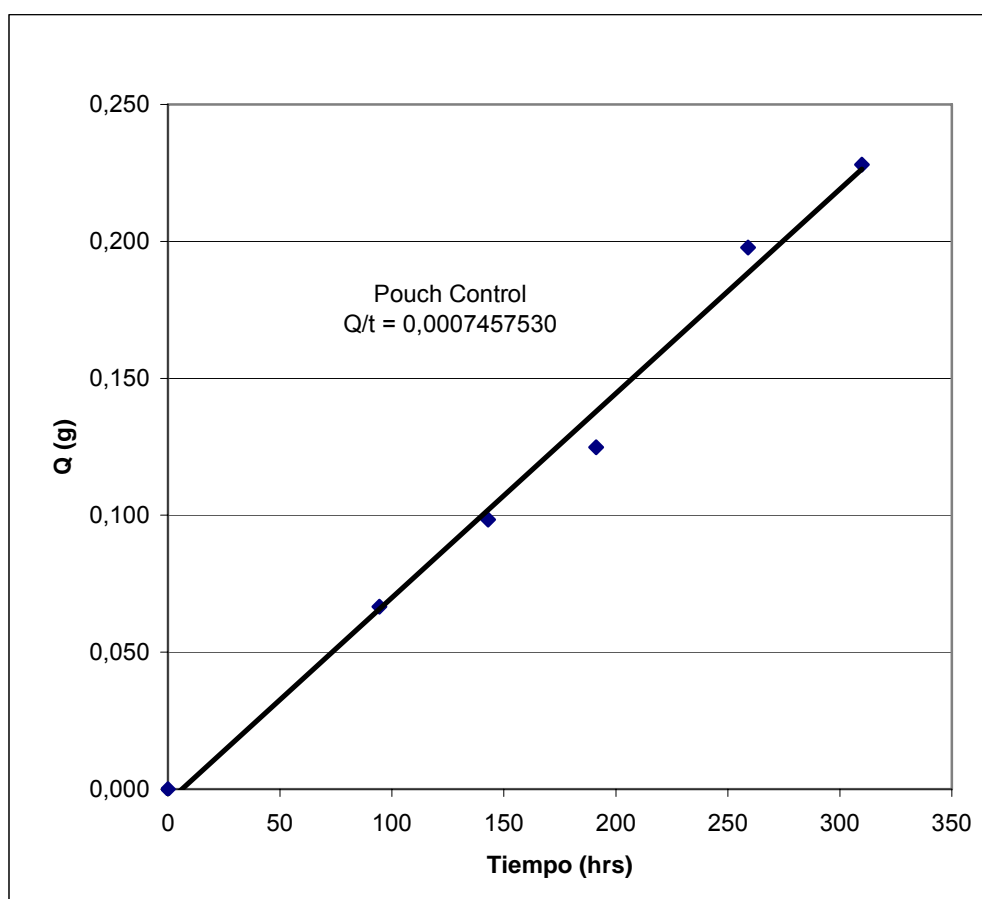


Figura 3.22: CURVA Q/t PARA L2 @ 21° C

TABLA 49	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de L3 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	194,44
Espesor en micras (μ)	114
Q/t (g/hr)	4,15587E-04
WVTR (g/h-cm ²)	2,13737E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2,29332E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2,61438E-05

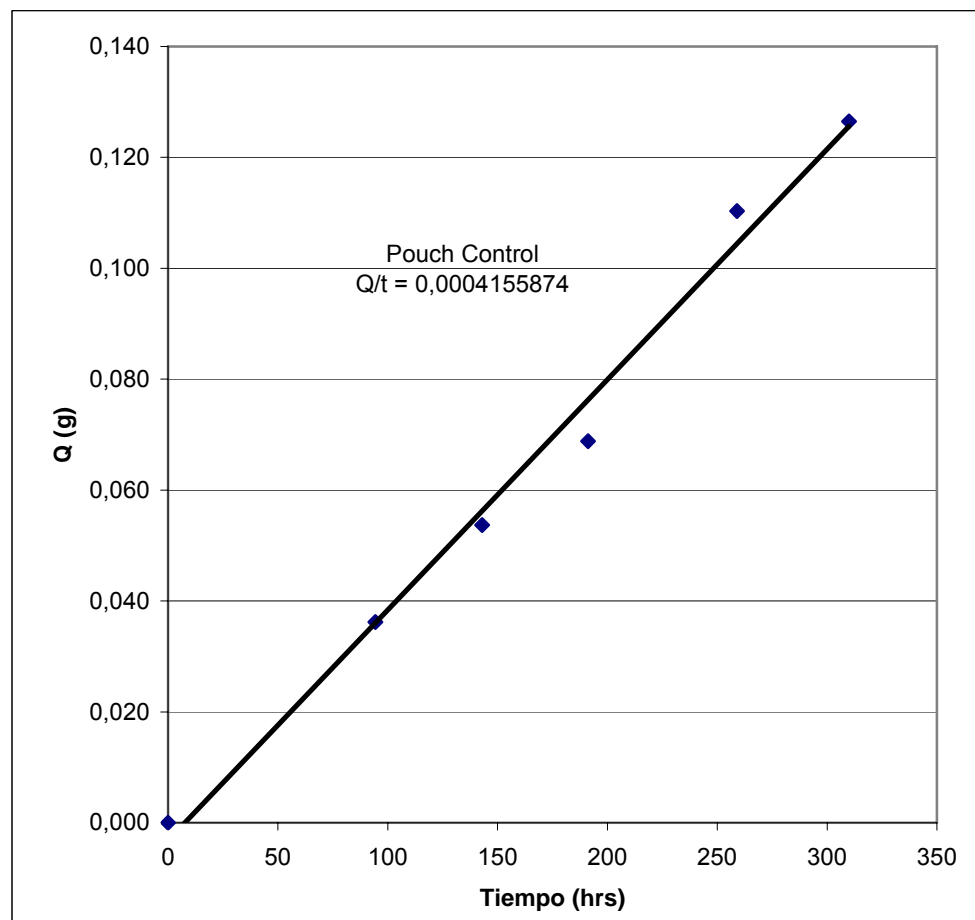


Figura 3.23: CURVA Q/t PARA L3 @ 21° C

TABLA 50	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 20 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	184,32
Espesor en micras (μ)	20
Q/t (g/hr)	8,19827E-04
WVTR (g/h-cm ²)	4,44785E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4,77237E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	9,54474E-06

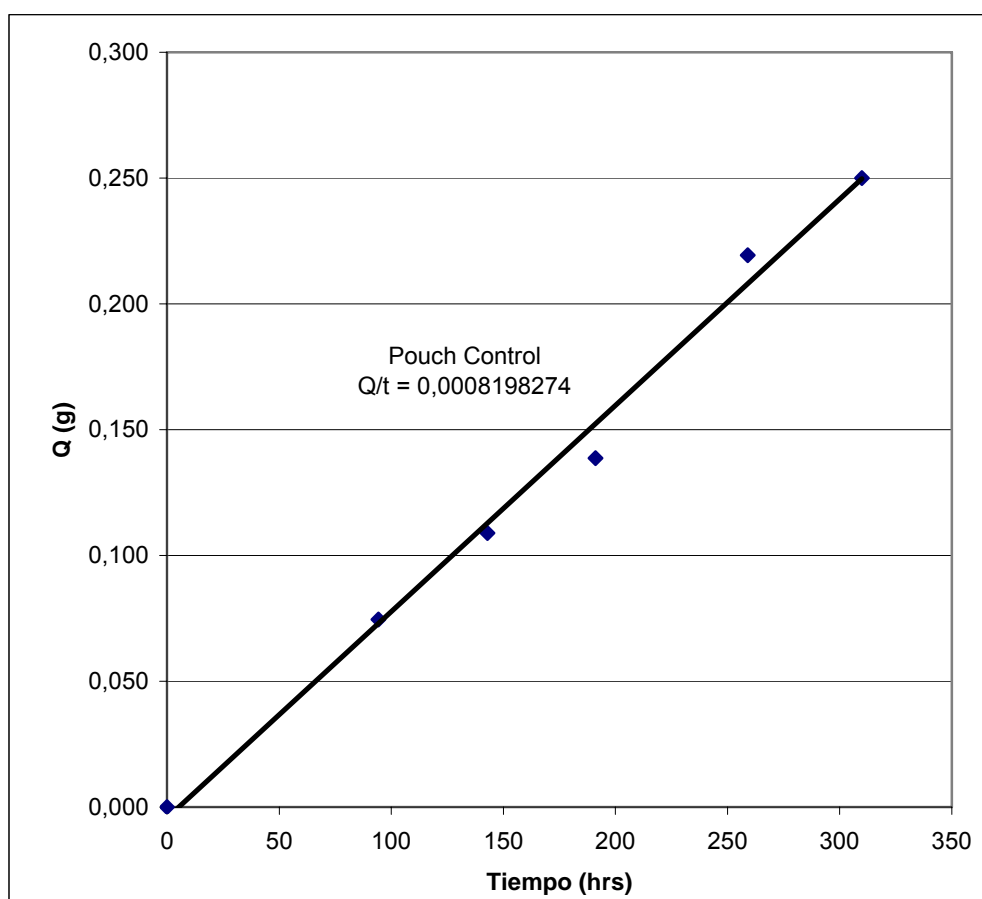


Figura 3.24: CURVA Q/t PARA BOPP 20 @ 21° C

TABLA 51	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de BOPP 30 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	192,47
Espesor en micras (μ)	30
Q/t (g/hr)	5,67949E-04
WVTR (g/h-cm ²)	2,95082E-06
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3,16612E-07
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	9,49836E-06

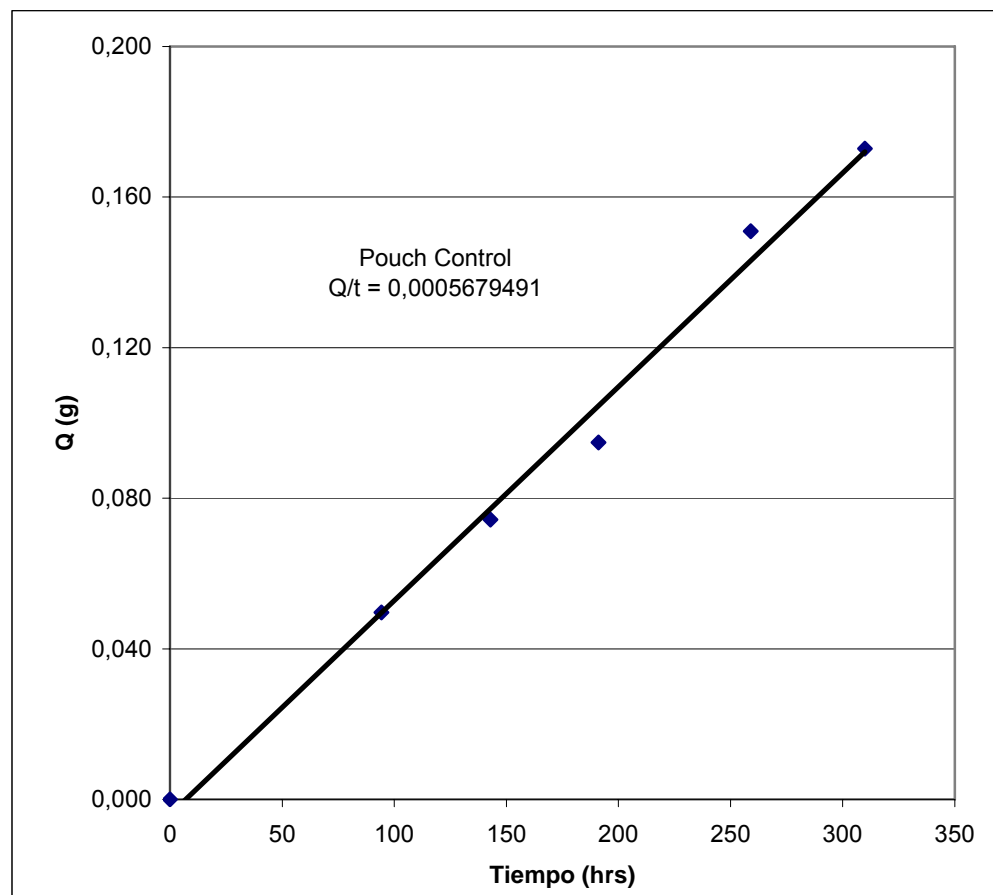


Figura 3.25: CURVA Q/t PARA BOPP 30 @ 21° C

TABLA 52	
Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de Nylon 25 a Condiciones de Quito (21°C y 47.3 % HR)	
	C
Área del Pouch (cm ²)	192,07
Espesor en micras (μ)	25
Q/t (g/hr)	8,47647E-03
WVTR (g/h-cm ²)	4,41329E-05
Δp (mm Hg)	9,320000
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4,73529E-06
Coeficiente de permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1,18382E-04

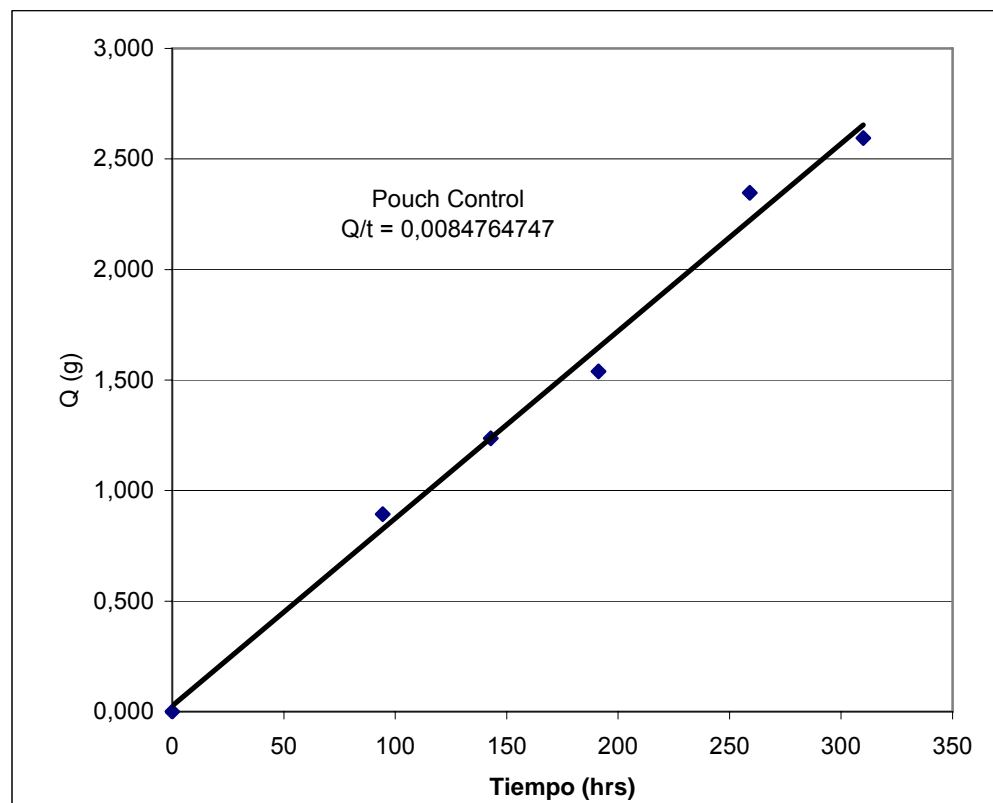


Figura 3.26: CURVA Q/t PARA Nylon 25 @ 21° C

En las figuras 3.27, 3.28, 3.29 y 3.30 se graficaron los valores del coeficiente de permeabilidad de los materiales estudiados en distintos ambientes y con distintos desecantes.

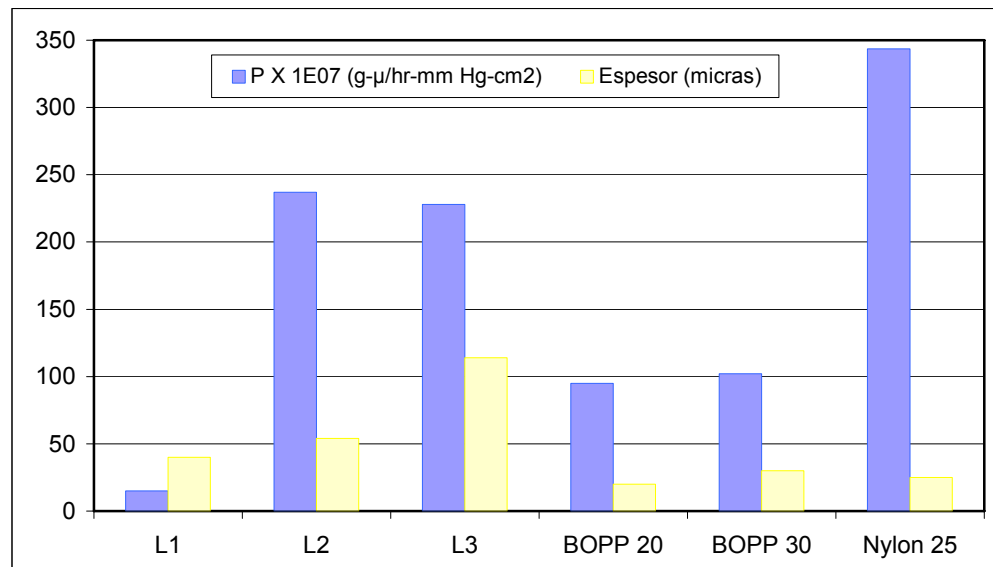


Figura 3.27: Coeficiente de Permeabilidad 38° C (Desecante en polvo)

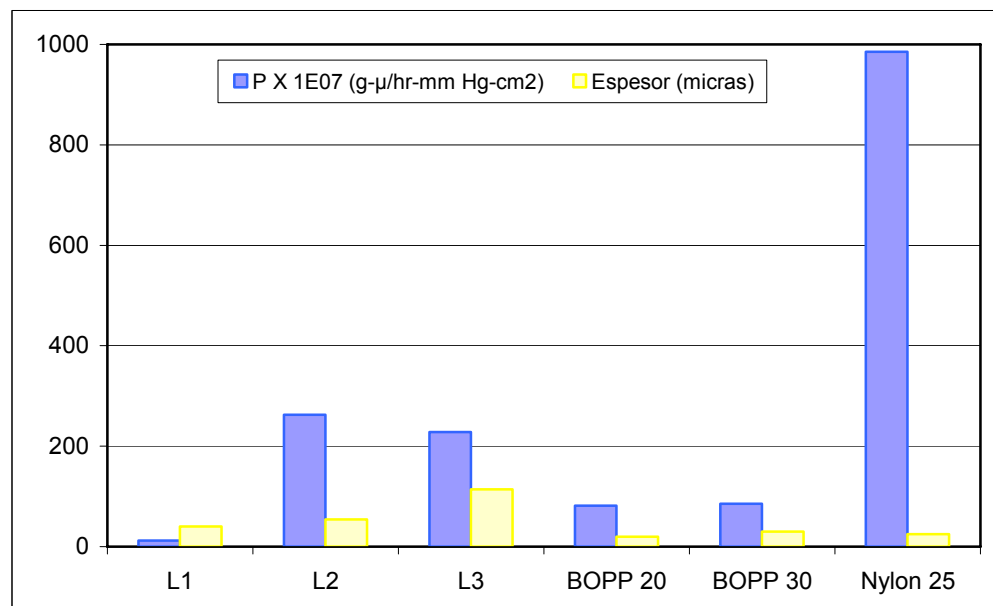


Figura 3.28: Coeficiente de Permeabilidad 21° C (Desecante en polvo)

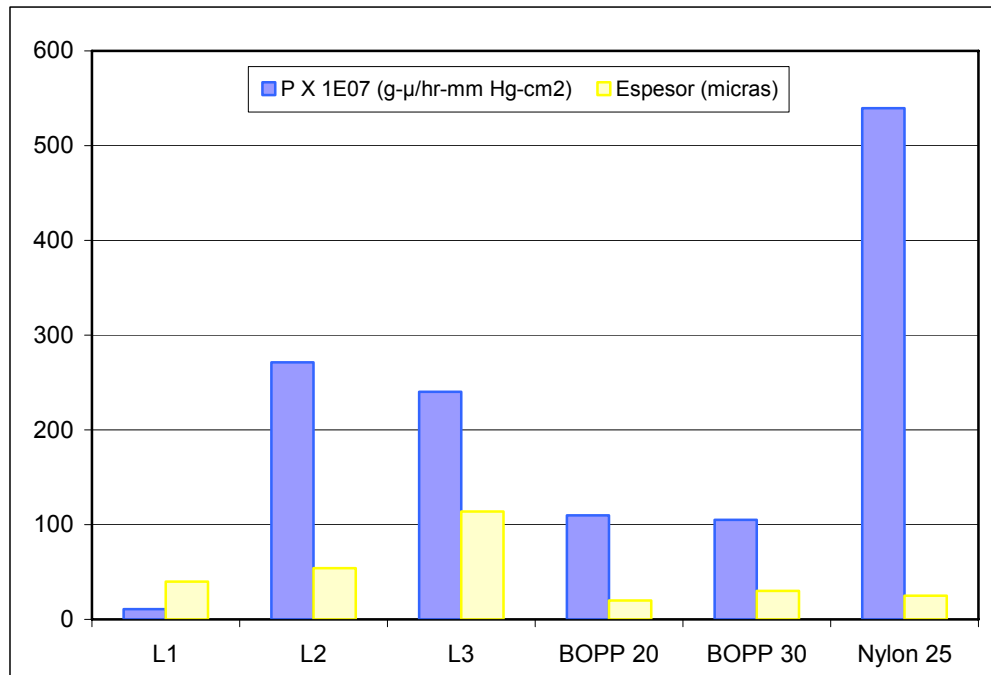


Figura 3.29: Coeficiente de Permeabilidad 34,6° C (Desecante en granos)

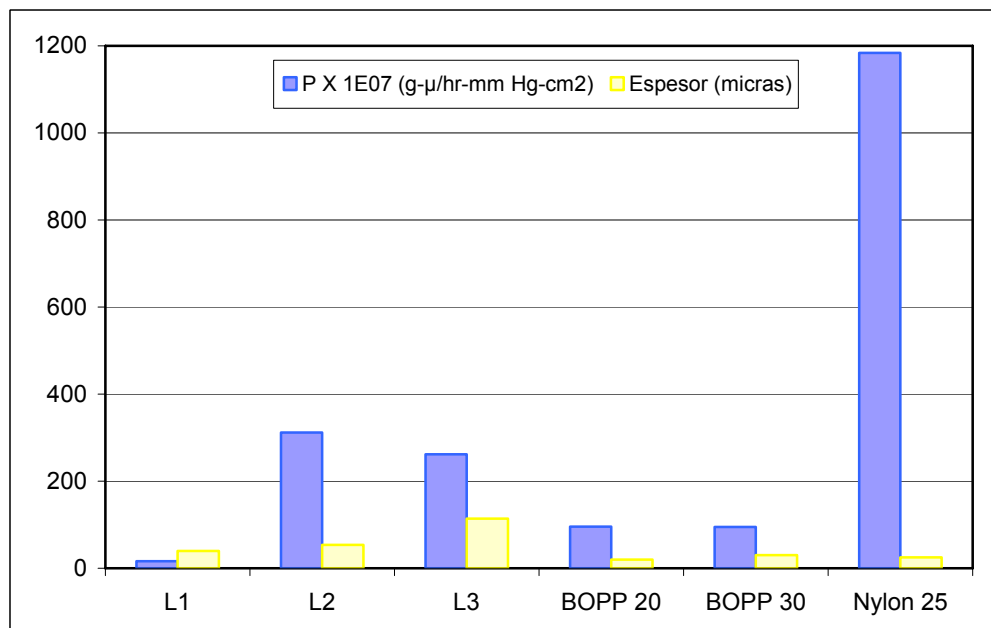


Figura 3.30: Coeficiente de Permeabilidad 21° C (Desecante en granos)

La tendencia de los coeficientes de permeabilidad de todos los materiales analizados sigue un mismo patrón en los 2 ambientes con distintos desecantes, siendo la laminación de BOPP L1 un material con transferencia de vapor agua extremadamente baja. El BOPP como materia prima también obtiene valores muy bajos de permeabilidad al agua, con valores prácticamente iguales a distintos espesores. Las laminaciones de PET y PE (L2 y L3) permiten una transferencia de vapor de agua mayor, sin alcanzar valores muy altos. El Nylon fue el único material con permeabilidad al vapor de agua, extremadamente alta. Una observación adicional es la diferencia de permeabilidad de los empaques en distintos ambientes. Se observa que en las condiciones de la incubadora los valores de permeabilidad son ligeramente menores que en condiciones del cuarto ambientado, exceptuando el caso del Nylon que duplica su permeabilidad en las condiciones del cuarto ambientado. Como observación final resaltamos la capacidad de absorción de agua en los desecantes, siendo el desecante granulado quien tiene mayor capacidad de absorción de agua.

3.3 Resultados del Ensayo COF

Los resultados del ensayo de coeficientes de fricción se muestran en las tablas de la 53 a la 58, en donde se encuentran tabulados las mediciones máximas, mínimas y promedio para cada material. En el caso de las laminaciones, los coeficientes examinados son los del lado exterior e interior de las muestras. Para el caso de materia prima se examinaron ambos lados de las muestras, que corresponden a las superficies que se espera laminar con el plástico (Plast/Plast) o el metalizado (Met C/T). A continuación de las tablas se encuentran los gráficos correspondientes a los valores de coeficientes de fricción, estático y dinámico, en las figuras desde la 53, hasta la 58. Para analizar estos resultados de mejor manera, se separaron las figuras de las laminaciones y de la materia prima.

TABLA 53			
Coeficientes de Fricción de L1			
Coeficiente de Fricción		Lado Exterior	Lado Interior
Estático	Max	0,0688	0,0625
	min	0,0625	0,0625
	prom	0,0656	0,0625
Dinámico	Max	0,0688	0,0615
	min	0,0625	0,0623
	prom	0,0656	0,0619

TABLA 54			
Coeficientes de Fricción de L2			
Coeficiente de Fricción		Lado Exterior	Lado Interior
Estático	Max	0,1175	0,0750
	min	0,0635	0,0630
	prom	0,0828	0,0702
Dinámico	Max	0,1175	0,0750
	min	0,0635	0,0630
	prom	0,0828	0,0702

TABLA 55			
Coeficientes de Fricción de L3			
Coeficiente de Fricción		Lado Exterior	Lado Interior
Estático	Max	0,1025	0,0750
	min	0,0825	0,0563
	prom	0,0950	0,0625
Dinámico	Max	0,1025	0,0750
	min	0,0825	0,0563
	prom	0,0950	0,0625

TABLA 56			
Coeficientes de Fricción de BOPP 20			
Coeficiente de Fricción		Plast/Plast	Met C/T
Estático	Max	0,4125	0,0675
	min	0,3850	0,0750
	prom	0,3992	0,0713
Dinámico	Max	0,3000	0,0675
	min	0,3000	0,0750
	prom	0,3000	0,0713

TABLA 57			
Coeficientes de Fricción de BOPP 30			
Coeficiente de Fricción		Plast/Plast	Met C/T
Estático	Max	0,2250	0,0650
	min	0,2000	0,0800
	prom	0,2117	0,0683
Dinámico	Max	0,2000	0,0650
	min	0,1850	0,0800
	prom	0,1900	0,0683

TABLA 58			
Coeficientes de Fricción de NYLON 25			
Coeficiente de Fricción		Plast/Plast	Met C/T
Estático	Max	0,8250	0,2750
	min	0,7100	0,1600
	prom	0,7700	0,2179
Dinámico	Max	0,8100	0,0750
	min	0,6250	0,1075
	prom	0,7283	0,0871

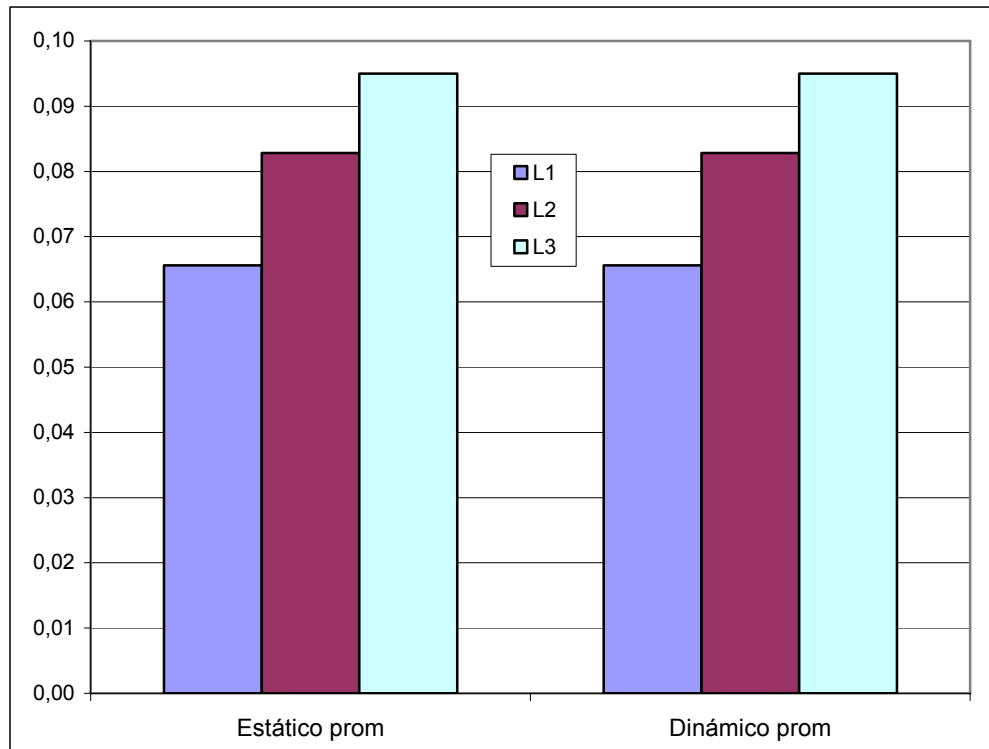


Figura 3.31: Coeficientes de Fricción Externos (Laminaciones)

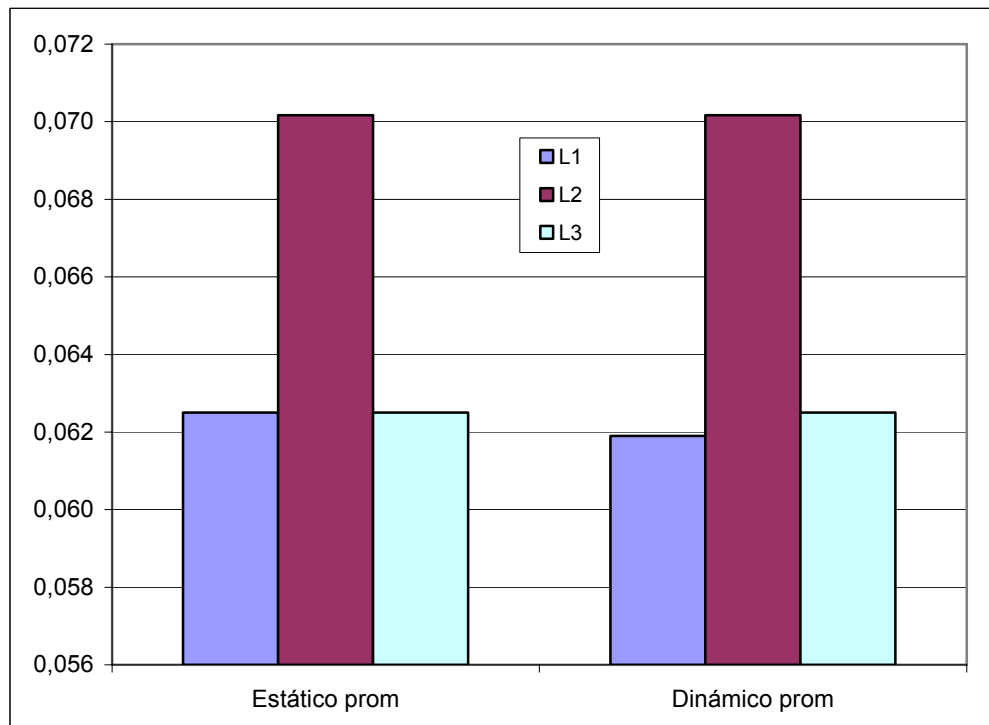


Figura 3.32: Coeficientes de Fricción Internos (Laminaciones)

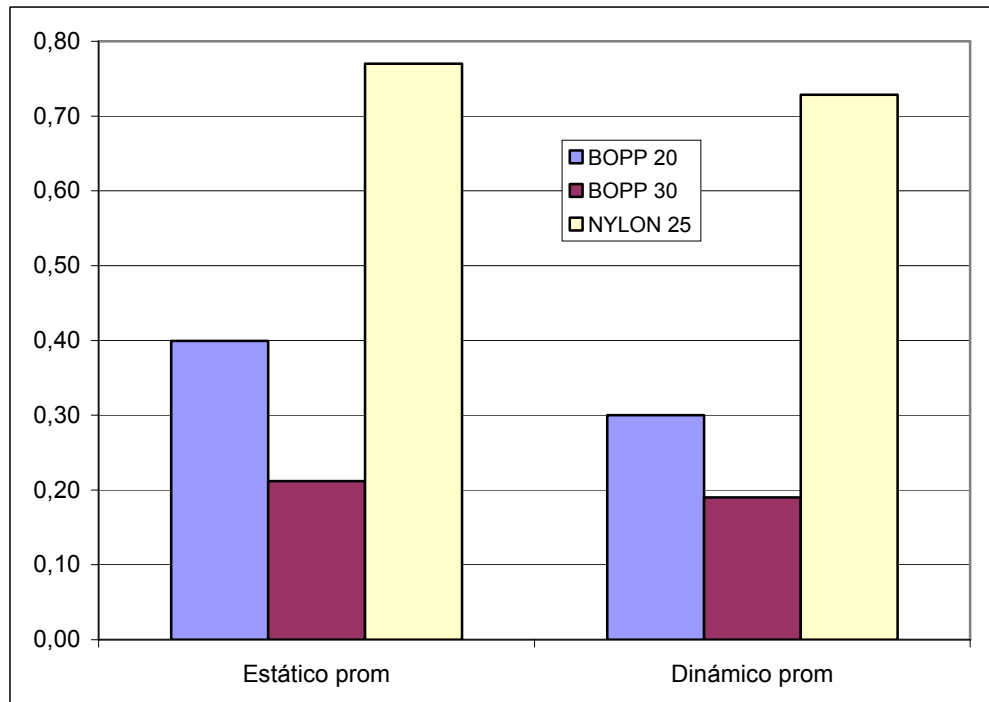


Figura 3.33: Coeficientes de Fricción Plast/Plast (Material)

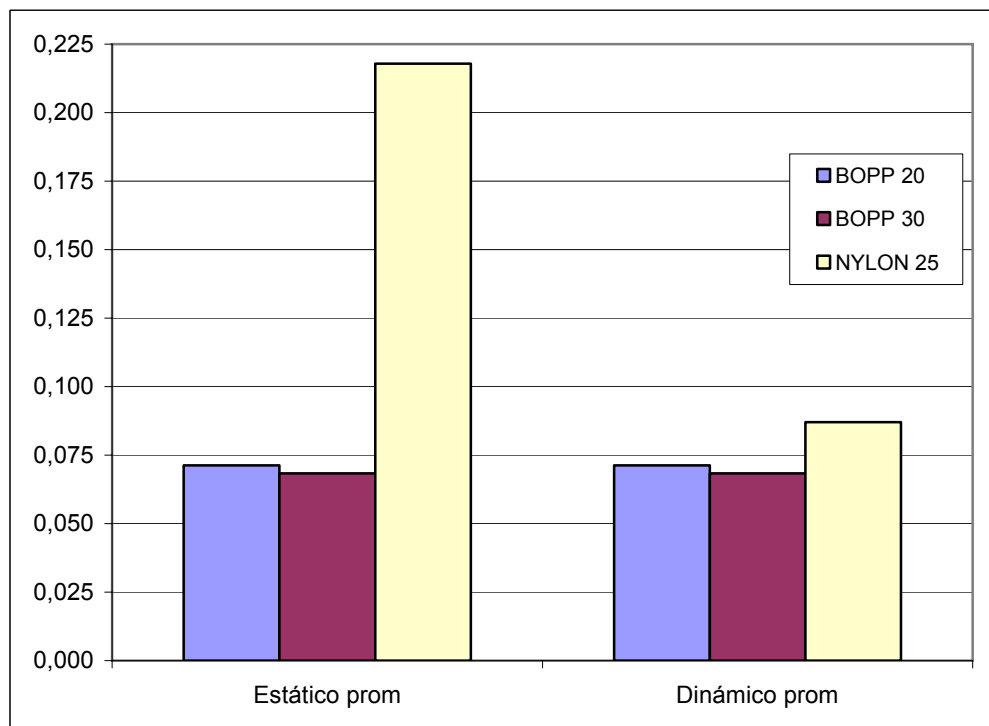


Figura 3.34: Coeficientes de Fricción Met C/T (Material)

El resultado más claro observado en las gráficas de Coeficientes de Fricción es la notoria superioridad en los valores correspondientes a materia prima. Los rangos de coeficiente de fricción para las laminaciones esta en el orden de 0.060 a 0.10, mientras que para la materia prima el rango varía entre 0.065 y 0.80. La segunda observación es la variación de los coeficientes de fricción estáticos y dinámicos entre cada material. En el caso de las laminaciones, ambos coeficientes se mantienen iguales, excepto en el caso del coeficiente interno para la laminación L1, donde el coeficiente estático es ligeramente mayor al dinámico. Para la materia prima los coeficientes hacia el lado de la laminación plástica varían en todos los materiales, siendo más notorio en la película de BOPP 20. En el lado de la metalización, los coeficientes estáticos y dinámicos permanecen iguales para el BOPP, mientras que para el Nylon este varía drásticamente, siendo el coeficiente estático mucho mayor al dinámico.

3.4 Resultados del Ensayo de Impacto

A continuación se muestran los resultados obtenidos del ensayo de impacto para todos los materiales estudiados. Cabe recalcar que el peso máximo utilizado en el dardo fue de 850 gramos, el que corresponde al resultado de la laminación L1, la misma que no falló durante el ensayo. En la tabla 59 y en la figura 3.35 se observan los distintos pesos de falla obtenidos para cada material.

TABLA 59		
PRUEBA DE IMPACTO AL DARDO		
Material	Espesor (micras)	Peso de Falla W_F (gr)
L1	40	850 (No rompe)
L2	54	309,60
L3	114	508,40
BOPP 20	20	353,80
BOPP 30	30	519,30
Nylon 25	25	750

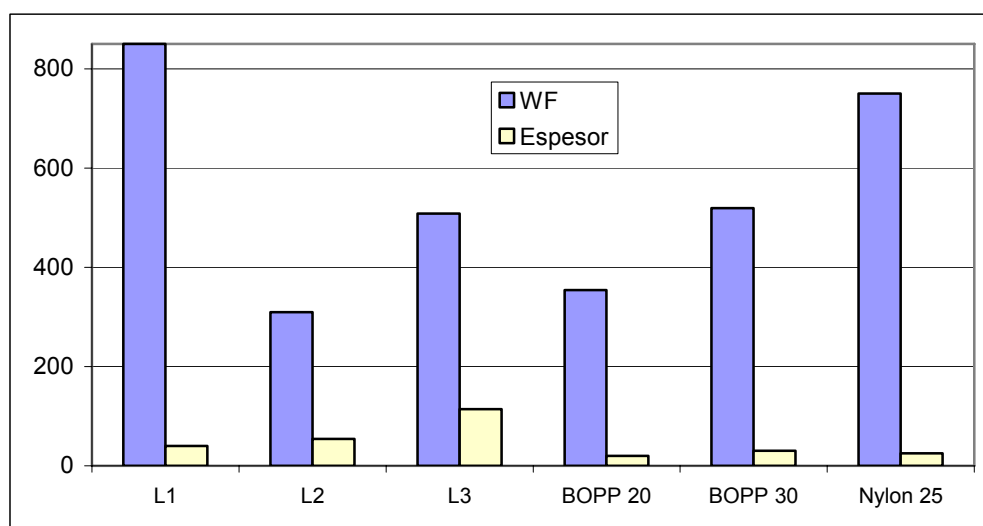


Figura 3.35: IMPACTO AL DARDO

La resistencia al impacto fue la propiedad fuerte de la materia prima, ya que solamente el BOPP 20 tiene una resistencia al impacto debajo de 500 gramos. Las laminaciones de PET y PE (L2 y L3) tuvieron valores aproximadamente de 300 y 500 gramos respectivamente, mientras la resistencia de la laminación de BOPP supera la escala utilizada ya que no falló con peso máximo utilizado (850 gramos).

3.5 Aplicación del diseño de empaques flexibles laminados

Un comportamiento claramente establecido en los capítulos anteriores es que las propiedades de barrera en los materiales cambian para distintas condiciones atmosféricas, por lo que es necesario ver el comportamiento de estas propiedades a distintas temperaturas. Para obtener la energía de activación E_P de los materiales estudiados utilizamos el modelo de la ecuación de Arrhenius (ecuación 1.20), de la siguiente manera:

$$P_2 = P_1 e^{\frac{E_P}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

De los resultados obtenidos en el ensayo WVTR a temperaturas conocidas (294.15° K y 309.45° K), podemos despejar el valor de E_P de la ecuación 1.20. Los datos de E_P obtenidos se encuentran en la tabla 3.42.

TABLA 60					
ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (E_P)					
Material	g- μ /hr-mm Hg-cm ²		° Kelvin		kJ/mol
	P1	P2	T1	T2	
L1	1,413E-06	1,290E-06	294,55	309,45	-4,658
L2	2,870E-05	2,541E-05	294,55	309,45	-6,199
L3	2,449E-05	2,341E-05	294,55	309,45	-2,290
BOPP 20	8,862E-06	1,023E-05	294,55	309,45	7,303
BOPP 30	9,027E-06	1,036E-05	294,55	309,45	6,988
Nylon 25	1,085E-04	4,416E-05	294,55	309,45	-45,709

Una vez obtenidos los valores de E_P para cada material podemos reutilizar la ecuación 1.20 para iterar los valores de permeabilidad en un rango más amplio de temperaturas, los mismos que se encuentran graficados en las figuras desde la 3.36 hasta la 3.41.

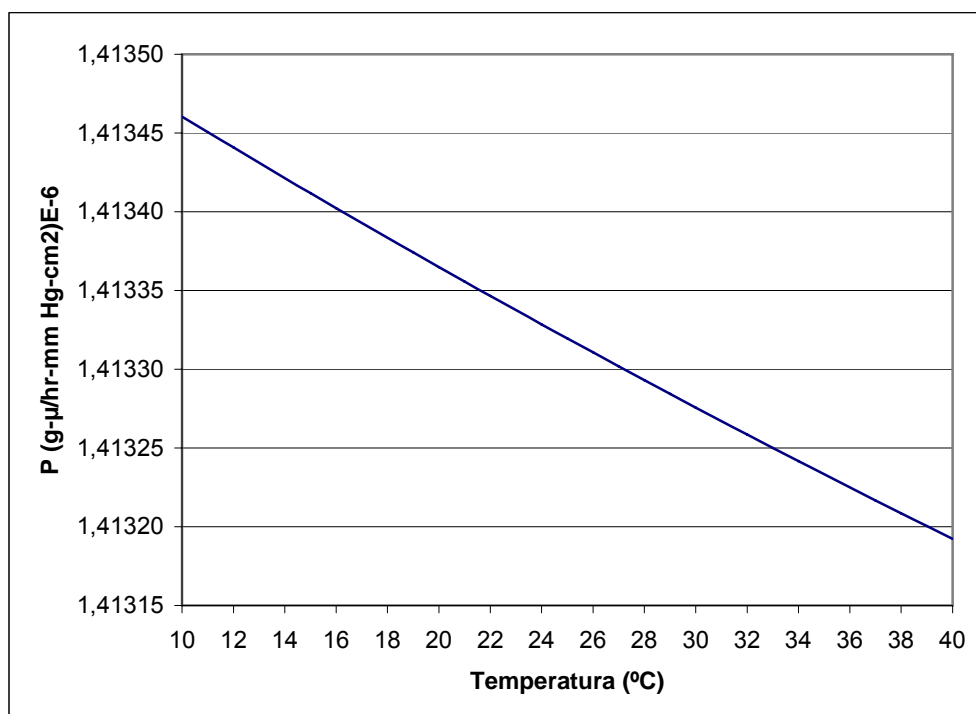


Figura 3.36: Variación de Permeabilidad con la Temperatura L1

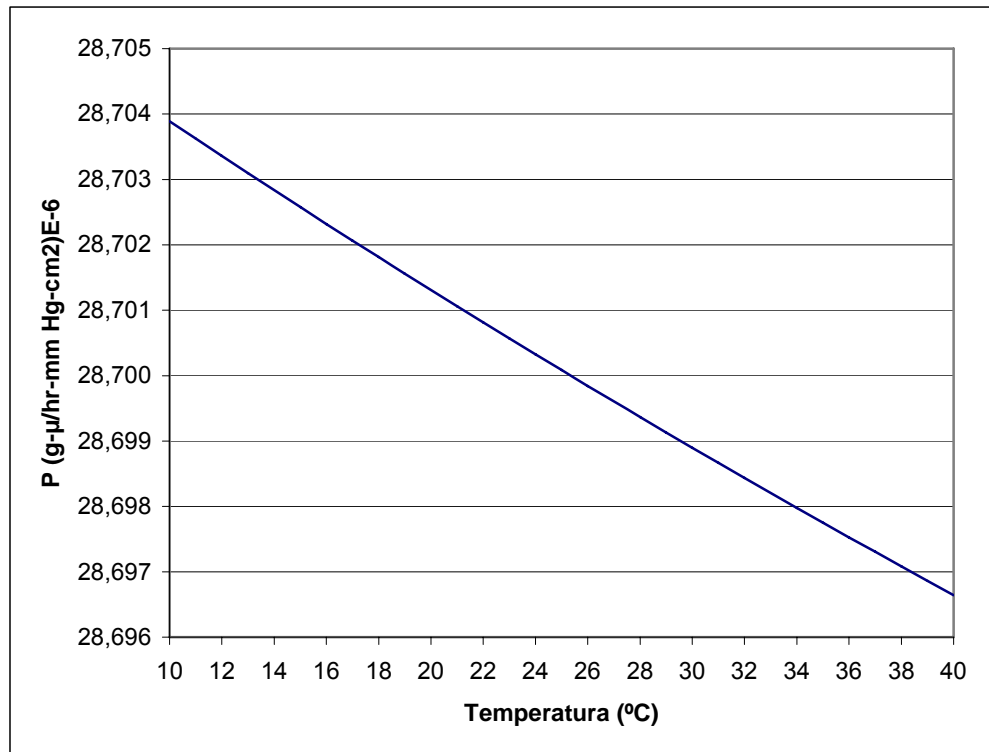


FIGURA 3.37: Variación de Permeabilidad con la Temperatura L2

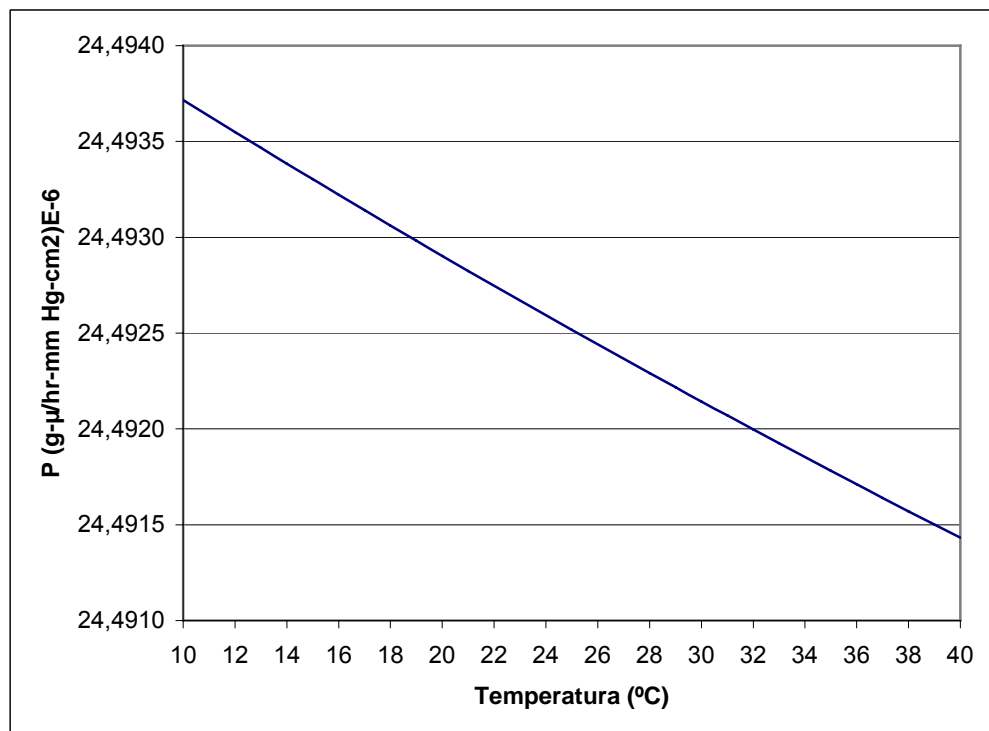


Figura 3.38 Variación de Permeabilidad con la Temperatura L3

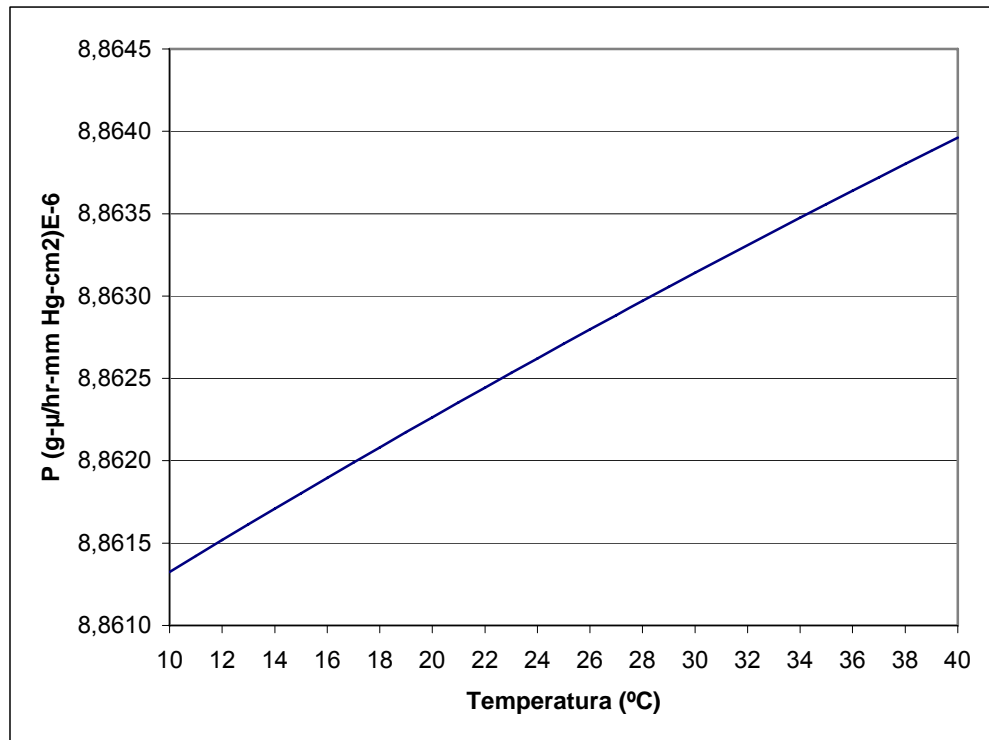


Figura 3.39: Variación de Permeabilidad con la Temperatura BOPP 20

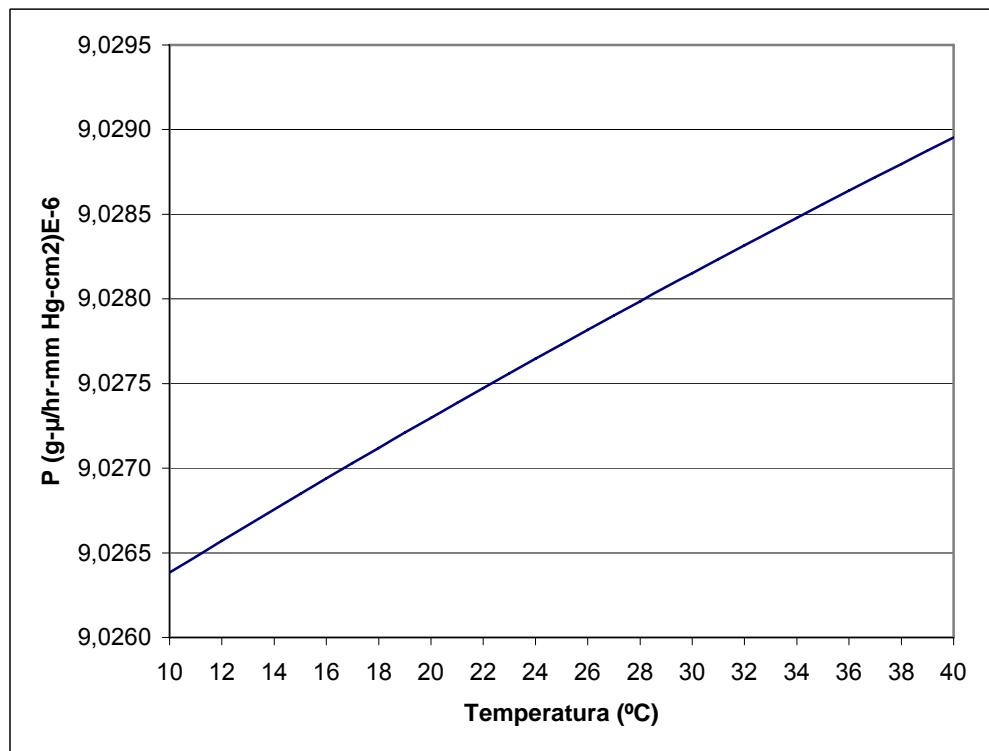


Figura 3.40: Variación de Permeabilidad con la Temperatura BOPP 30

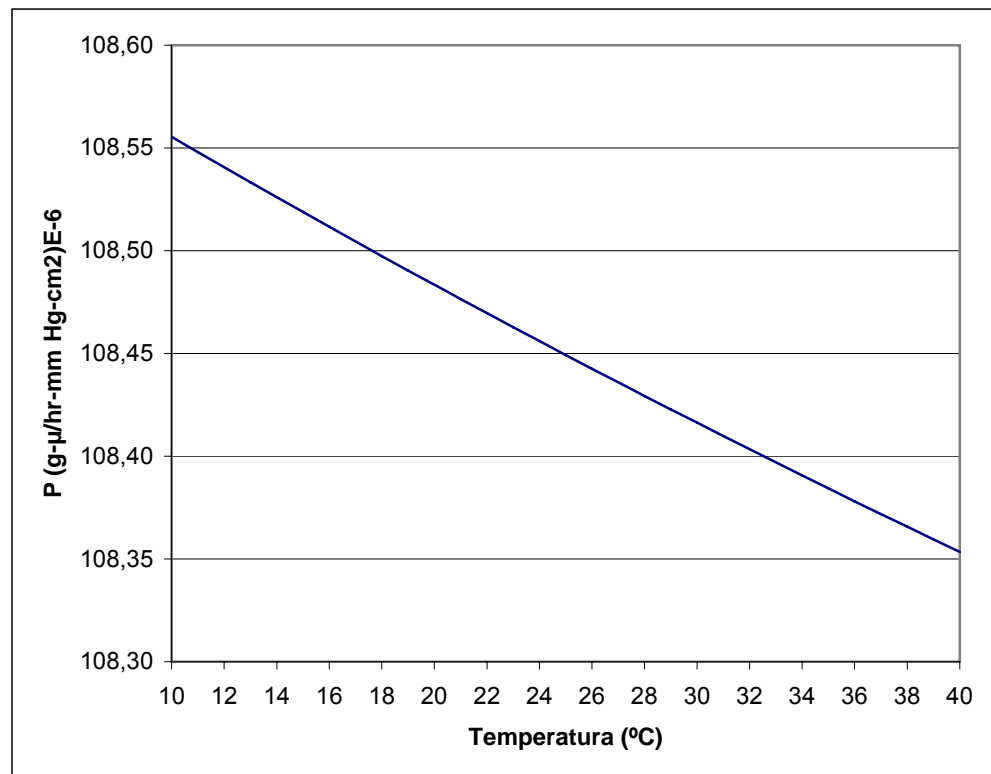


Figura 3.41: Variación de Permeabilidad con la Temperatura Nylon 25

La observación principal del comportamiento de la permeabilidad con el cambio de temperatura es que casi todos los materiales tienden a tener una disminución de permeabilidad a medida que aumenta la temperatura, exceptuando la materia prima BOPP. Podemos apreciar además que la variación de la permeabilidad en las laminaciones L2 y L3, junto con las películas de BOPP 20 y BOPP 30, son similares en cantidad. En la laminación L1 esta variación es notablemente menor, mientras que para la película de Nylon la variación es mucho mayor.

Análisis de Variación del Tiempo en Percha “Shelf Life” para Algunos Alimentos con las Condiciones Ambientales de Quito y Guayaquil.

Una vez obtenido los valores de permeabilidad de cada uno de los materiales en estudio, se procede a analizar el tiempo de conservación de diversos alimentos en cada un de los empaques, es decir el cálculo de la vida en percha, conocida como Shelf Life.

Se utilizan los mismos alimentos analizados en la tesis del Ing. Xavier Alarcón, cada uno con su respectiva isoterma de absorción, con la que encontramos los valores de actividad inicial y crítica del agua en el alimento. El rango que abarca estos valores corresponde al peso que necesitaría ganar el producto empacado para considerar terminada su vida en percha. Asimismo la isoterma nos indica el valor promedio de humedad relativa del producto empacado. En cada caso se asumirá un valor de 100 cm² de área de transferencia y 25 gramos de peso del producto empacado; valores que servirán para cálculos posteriores según las siguientes ecuaciones:

$$\ell = \frac{P_T t A \Delta p}{q} \quad (\text{Ecuación 1.21})$$

Despejando t de la ecuación 1.21

$$t = \frac{q \ell}{P_T A \Delta p}$$

Donde:

ℓ : Espesor en micras

P_T : Coeficiente de permeabilidad total de la multicapa en $\text{g-}\mu\text{/hr-mm Hg-cm}^2$

t : Tiempo de vida en percha (Shelf Life) en horas

A : Área del empaque en cm^2

q : Cantidad de H_2O ganada o perdida por el producto en g

Δp : Diferencia de presión en ambos lados del empaque, mm Hg

$$\Delta p = \frac{p_s (HR_{out} - HR_{in})}{100} \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Donde:

P_s : Presión de saturación de vapor de agua (tabla 1.14)

HR_{out} : Humedad relativa del ambiente fuera del empaque

HR_{in} : Humedad relativa promedio del interior del empaque, (isoterma de adsorción).

$$q = w(m_c - m_o)$$

Donde:

w : Peso de alimento empacado

m_c : Actividad crítica de agua en alimentos

m_0 : Actividad inicial de agua en alimentos

Con estas ecuaciones procedemos a calcular la vida en percha de 4 productos: Cereal de Trigo, Galletas, Papas Chips y Agua; empacados en los materiales estudiados:

Shelf Life para empaques de Cereal de Trigo:

La curva de absorción para este producto es la mostrada en la figura 3.42.

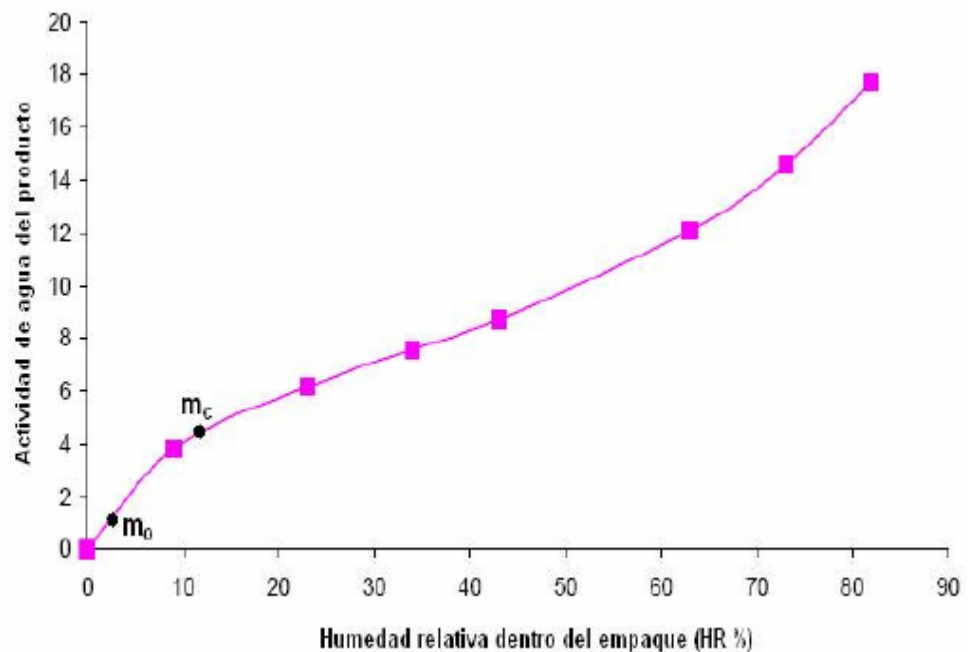


Figura 3.42 ISOTERMA DE ADSORCION PARA CEREAL DE TRIGO

Con estos datos se procede a calcular los tiempos de almacenamiento t (SHELF LIFE), y los resultados obtenidos para

todas las películas se muestran en las tablas desde la 61 hasta 67:

TABLA 61						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN MATERIAL L1						
T	32	25	20	23	18	14
L	40	40	40	40	40	40
P_T	1,41326E-06	1,41332E-06	1,41336E-06	1,41334E-06	1,41338E-06	1,41342E-06
A	100	100	100	100	100	100
w	25	25	25	25	25	25
m_c	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
m_o	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
q	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
P_S	36,663	23,756	17,535	21,068	15,477	12,159
HR_{out}	42,75	42,75	42,75	47,3	47,3	47,3
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
ΔP	12,740	8,255	6,093	8,280	6,082	4,778
t (horas)	19438,54	29998,50	40639,95	29909,30	40712,59	51821,02
t (días)	809,94	1249,94	1693,33	1246,22	1696,36	2159,21

TABLA 62						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN MATERIAL L2						
T	32	25	20	23	18	14
L	56	56	56	56	56	56
P_T	2,86984E-05	2,87001E-05	2,87013E-05	2,87006E-05	2,87018E-05	2,87028E-05
A	100	100	100	100	100	100
w	25	25	25	25	25	25
m_c	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
m_o	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
q	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
P_s	36,663	23,756	17,535	21,068	15,477	12,159
HR_{out}	42,75	42,75	42,75	47,3	47,3	47,3
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
ΔP	12,740	8,255	6,093	8,280	6,082	4,778
t (horas)	1340,16	2068,16	2801,78	2062,00	2806,77	3572,57
t (días)	55,84	86,17	116,74	85,92	116,95	148,86

TABLA 63						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN MATERIAL L3						
T	32	25	20	23	18	14
L	114	114	114	114	114	114
P_T	2,44920E-05	2,44925E-05	2,44929E-05	2,44927E-05	2,44931E-05	2,44934E-05
A	100	100	100	100	100	100
w	25	25	25	25	25	25
m_c	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
m_o	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
q	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
P_s	36,663	23,756	17,535	21,068	15,477	12,159
HR_{out}	42,75	42,75	42,75	47,3	47,3	47,3
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
ΔP	12,740	8,255	6,093	8,280	6,082	4,778
t (horas)	3196,73	4933,46	6683,62	4918,82	6695,62	8522,63
t (días)	133,20	205,56	278,48	204,95	278,98	355,11

TABLA 64						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN MATERIAL BOPP 20						
T	32	25	20	23	18	14
L	20	20	20	20	20	20
P_T	8,86331E-06	8,86271E-06	8,86226E-06	8,86253E-06	8,86208E-06	8,86171E-06
A	100	100	100	100	100	100
w	25	25	25	25	25	25
m_c	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
m_o	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
q	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
P_s	36,663	23,756	17,535	21,068	15,477	12,159
HR_{out}	42,75	42,75	42,75	47,3	47,3	47,3
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
ΔP	12,740	8,255	6,093	8,280	6,082	4,778
t (horas)	1549,74	2391,90	3240,65	2384,87	3246,56	4132,66
t (días)	64,57	99,66	135,03	99,37	135,27	172,19

TABLA 65						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN MATERIAL BOPP 30						
T	32	25	20	23	18	14
L	30	30	30	30	30	30
P_T	9,02832E-06	9,02773E-06	9,02730E-06	9,02756E-06	9,02712E-06	9,02676E-06
A	100	100	100	100	100	100
w	25	25	25	25	25	25
m_c	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
m_o	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
q	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
P_s	36,663	23,756	17,535	21,068	15,477	12,159
HR_{out}	42,75	42,75	42,75	47,3	47,3	47,3
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
ΔP	12,740	8,255	6,093	8,280	6,082	4,778
t (horas)	2282,13	3522,27	4772,12	3511,91	4780,80	6085,65
t (días)	95,09	146,76	198,84	146,33	199,20	253,57

TABLA 66						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN MATERIAL NYLON 25						
T	32	25	20	23	18	14
L	25	25	25	25	25	25
P_T	1,08403E-04	1,08449E-04	1,08483E-04	1,08463E-04	1,08497E-04	1,08526E-04
A	100	100	100	100	100	100
w	25	25	25	25	25	25
m_c	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
m_o	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
q	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
P_S	36,663	23,756	17,535	21,068	15,477	12,159
HR_{out}	42,75	42,75	42,75	47,3	47,3	47,3
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
ΔP	12,740	8,255	6,093	8,280	6,082	4,778
t (horas)	158,39	244,34	330,92	243,59	331,47	421,82
t (días)	6,60	10,18	13,79	10,15	13,81	17,58

En resumen los datos de Shelf Life para los materiales del estudio a distintas temperaturas se muestran en la tabla 3.49 y se comparan en la figura 3.43. Las figuras donde se grafica la variación de Shelf Life se trunca la escala para apreciar mejor la diferencia entre materiales de menos valor de Shelf Life, indicando en texto el valor que corresponde a la laminación L1.

TABLA 67						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EN DÍAS						
Material	Temperatura					
	32	25	20	23	18	14
L1	809,94	1249,94	1693,33	1246,22	1696,36	2159,21
L2	55,84	86,17	116,74	85,92	116,95	148,86
L3	133,20	205,56	278,48	204,95	278,98	355,11
BOPP 20	64,57	99,66	135,03	99,37	135,27	172,19
BOPP 30	95,09	146,76	198,84	146,33	199,20	253,57
Nylon 25	6,60	10,18	13,79	10,15	13,81	17,58

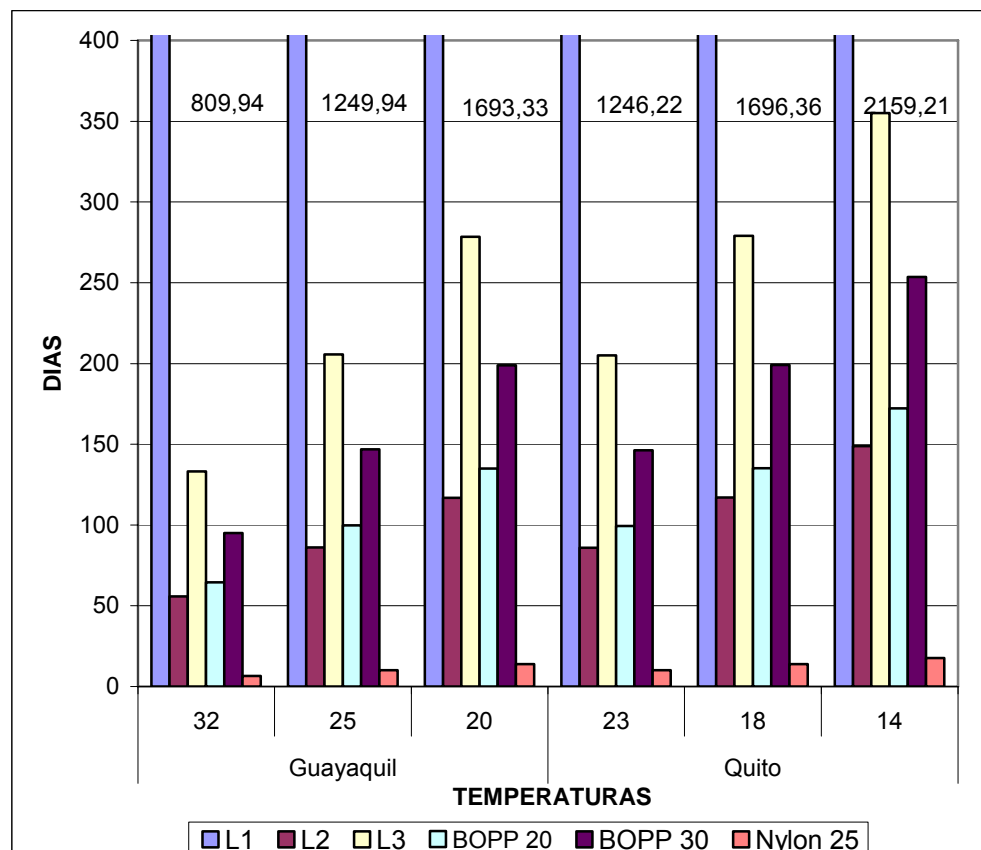


Figura 3.43: SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO

Shelf Life para empaques de Galletas:

La curva de absorción para este producto es la mostrada en la figura 3.44.

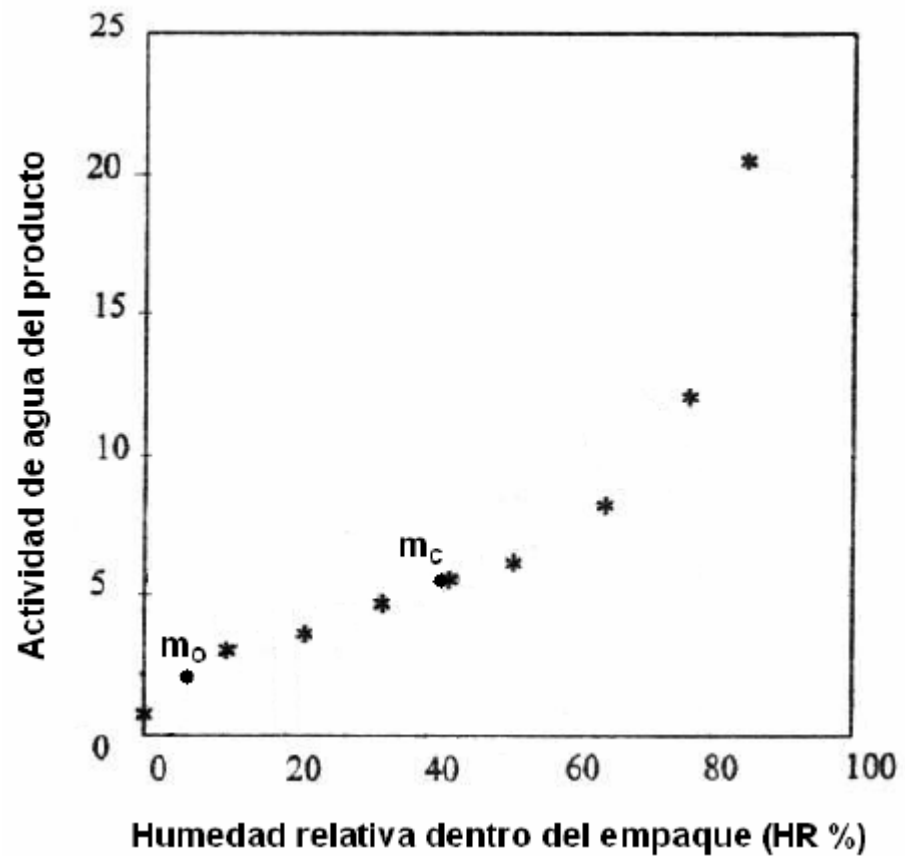


Figura 3.44 ISOTERMA DE ADSORCION PARA GALLETAS

Con estos datos se procede a calcular t (SHELF LIFE) con el mismo procedimiento del primer cálculo. Esta vez solo mostraremos los resultados finales en la tabla 3.50 y figura 3.45.

TABLA 68						
SHELF LIFE PARA GALLETAS EN DÍAS						
Material	Temperatura					
	32	25	20	23	18	14
L1	1631,62	2517,99	3411,20	2246,63	3058,11	3892,52
L2	112,49	173,60	235,17	154,89	210,83	268,35
L3	268,32	414,10	561,00	369,48	502,94	640,17
BOPP 20	130,08	200,77	272,01	179,14	243,86	310,42
BOPP 30	191,56	295,65	400,56	263,80	359,11	457,12
Nylon 25	13,29	20,51	27,78	18,30	24,90	31,68

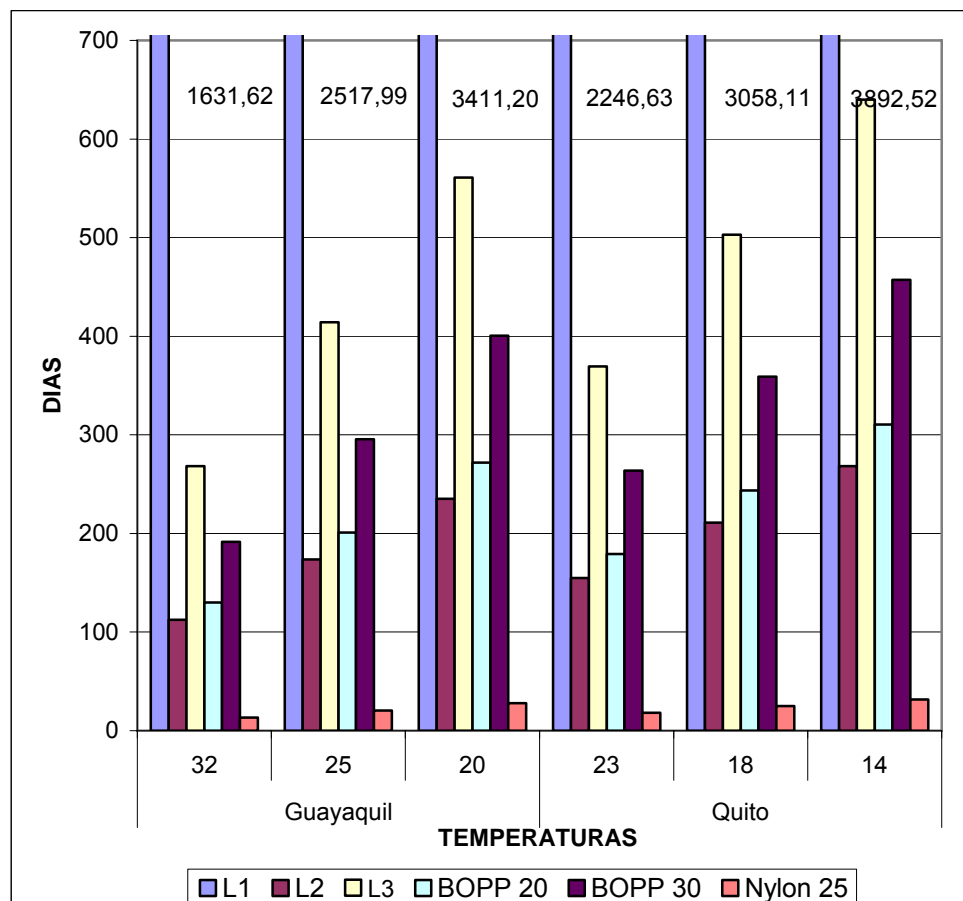


Figura 3.45: SHELF LIFE PARA GALLETAS

Shelf Life para empaques de Papas Chips:

La curva de absorción para este producto es la mostrada en la figura 3.46.

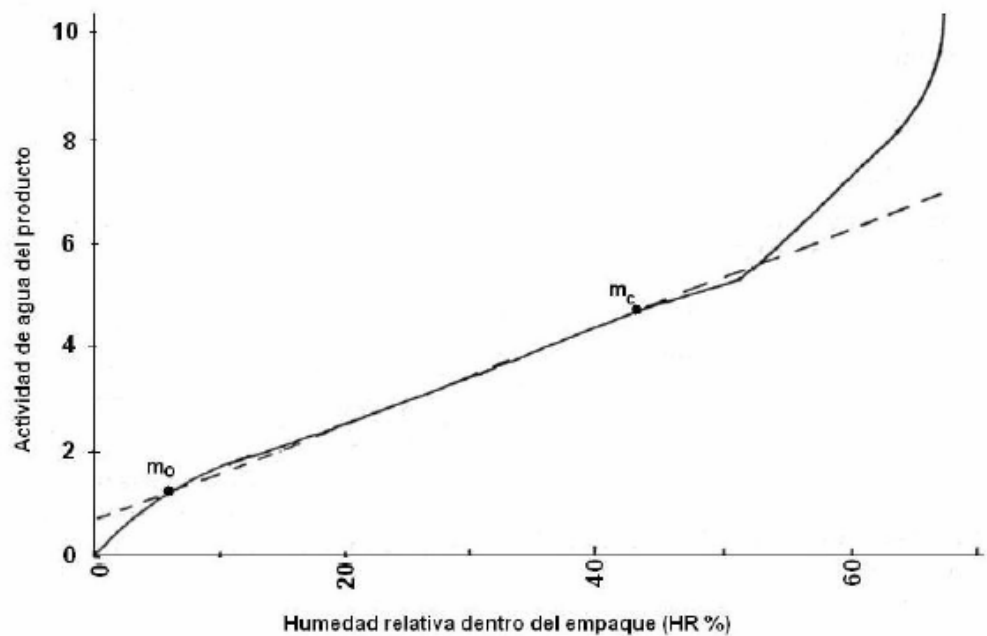


Figura 3.46 ISOTERMA DE ADSORCION PARA PAPAS CHIPS

Con estos datos se procede a calcular t (SHELF LIFE) con el mismo procedimiento del primer cálculo. Esta vez solo mostraremos los resultados finales en la tabla 3.51 y figura 3.47.

TABLA 69						
SHELF LIFE PARA PAPAS CHIPS EN DÍAS						
Material	Temperatura					
	32	25	20	23	18	14
L1	1540,35	2377,14	3220,40	2133,50	2904,13	3696,52
L2	106,20	163,89	222,02	147,09	200,21	254,84
L3	253,32	390,94	529,62	350,87	477,61	607,94
BOPP 20	122,80	189,54	256,80	170,12	231,58	294,79
BOPP 30	180,84	279,11	378,15	250,51	341,03	434,10
Nylon 25	12,55	19,36	26,22	17,38	23,64	30,09

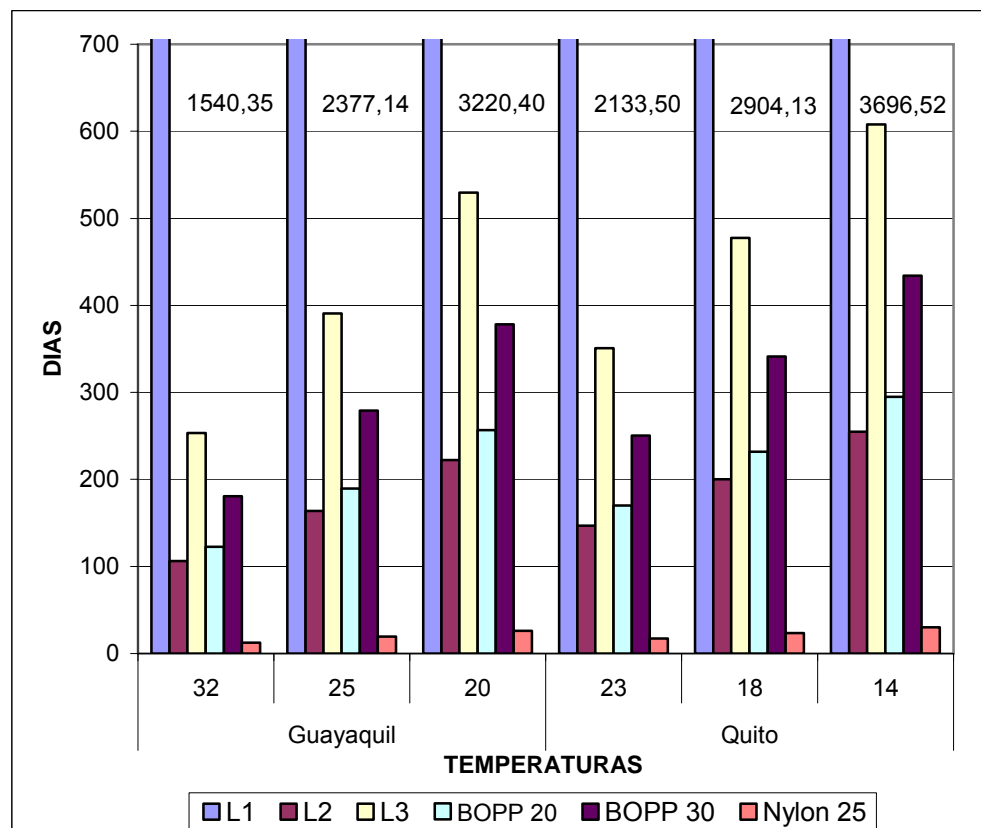


Figura 3.47: SHELF LIFE PARA PAPAS CHIPS

Cálculo de Shelf Life para almacenamiento de Agua, utilizando las películas en estudio:

En este caso no utilizaremos la isoterma de absorción, sino que asumiremos una humedad del producto de 100% (agua) y el producto se considerará perdido cuando pierda un 10% de su peso, es decir que el valor de q en la tabla será de 2.5 gramos. Con estos datos se procede a calcular t (SHELF LIFE) con el mismo procedimiento del primer cálculo. Esta vez solo mostraremos los resultados finales en la tabla 3.52 y figura 3.48.:

TABLA 70						
SHELF LIFE PARA AGUA EN DÍAS						
Material	Temperatura					
	32	25	20	23	18	14
L1	1404,64	2167,70	2936,66	2655,27	3614,36	4600,54
L2	96,84	149,45	202,46	183,06	249,18	317,16
L3	231,00	356,49	482,96	436,68	594,42	756,62
BOPP 20	111,98	172,84	234,17	211,72	288,22	366,89
BOPP 30	164,91	254,52	344,83	311,78	424,43	540,27
Nylon 25	11,45	17,66	23,91	21,62	29,43	37,45

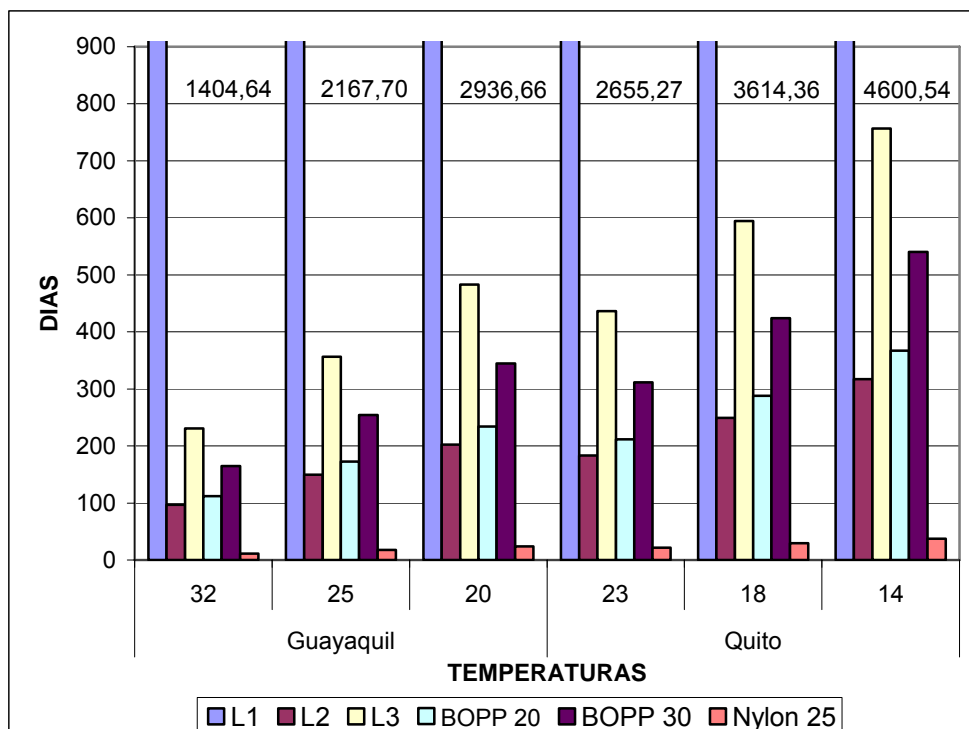


Figura 3.48: SHELF LIFE PARA AGUA

Cabe dejar en claro que el cálculo de Shelf Life se hizo asumiendo que sólo existe transmisión de vapor de agua a través de las películas, más no otro gas o componente diferente. El patrón de durabilidad de alimentos en cada empaque se repite para cada alimento, dejando claro que este aumenta a medida que se reduce la temperatura del sitio de almacenamiento del empaque. Las laminaciones L1 y L3 muestran su superioridad ante el resto de materiales probados. Sin embargo los valores obtenidos por la materia prima de BOPP son mayores que la laminación L3. El valor de Shelf Life para los alimentos empacados en Nylon es realmente bajo.

3.6 Análisis comparativo entre laminación flexible y coextrusión de Polietilenos

A continuación se presentará el análisis comparativo entre las películas laminadas, además de un análisis adicional comparando los resultados finales entre este estudio y los resultados finales de la tesis de grado del Ing. Xavier Alarcón sobre películas coextruidas. En la tabla 71 se muestra los datos principales de las películas tanto del estudio de laminación, como coextrusión.

TABLA 71			
COMPOSICIÓN DE LAS PELÍCULAS PLÁSTICAS COEXTRUIDAS, LAMINADAS Y MATERIA PRIMA			
Tipo	Nomenclatura	Producto Empacado	Composición
Coextrusión	C1	Leche	60.42% LDPE + 32.44% LLDPE + 7.14% C. BLANCO
	C2	Agua	43.33% LDPE + 16.67% HDPE + 40% METALOCENO
	C3	Aceite	67% LDPE + 28.7% LLDPE + 3.64% C. BLANCO + 0.65% C. AMARILLO
	C4	Manteca	67.26% LDPE + 29.17% LLDPE + 3.57% C. BLANCO
	C5	Sal	53.33% LDPE + 46.67% LLDPE
Laminación	L1	Gelatina	50% BOPP + 50% BOPP Met
	L2	Ají	21,43% PET + 78,57% PE
	L3	Pescado	10,53% PET + 89,47% PE
Materia Prima	BOPP 20	-	100% BOPP
	BOPP 30	-	100% BOPP
	NYLON 25	-	100% NYLON

En la tabla 72 se encuentran resumidos los resultados de los ensayos realizados para las películas laminadas, y en la Tabla 73 se muestran los resultados para la materia prima. En la primera parte del análisis comparativo estableceremos la relación entre las propiedades mecánicas y las propiedades de barrera para los materiales laminados. En las figuras desde las 3.49 hasta la 3.53 se encuentran los gráficos comparativos entre cada propiedad mecánica y la permeabilidad de cada película, además del resumen de las propiedades mecánicas y de barrera.

TABLA 72			
PROPIEDADES DE PELÍCULAS LAMINADAS			
MATERIAL	L1	L2	L3
DARDO (gr)	850,0	309,6	508,4
RESISTENCIA MD (kgf/cm²)	365,00	144,44	83,33
RESISTENCIA TD (kgf/cm²)	677,50	164,81	80,70
ELONGACIÓN MD % X10	230,00	126,00	112,00
ELONGACIÓN TD % X 10	58,00	90,00	78,00
ESPESOR (micras)	40	56	114
P (g-μ/hr-mm Hg-cm²) Uio X 10E7	15,89	311,61	261,44

TABLA 73			
PROPIEDADES DE MATERIA PRIMA			
MATERIAL	BOPP 20	BOPP 30	Nylon 25
DARDO (gr)	353,8	519,3	750,0
RESISTENCIA MD (kgf/cm ²)	89,04	106,47	157,28
RESISTENCIA TD (kgf/cm ²)	85,10	99,67	151,21
ELONGACIÓN MD % X10	220,92	320,45	86,70
ELONGACIÓN TD % X 10	237,00	340,94	94,68
ESPESOR (micras)	20	30	25
P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²) Uio X 10E7	95,45	94,98	1183,82

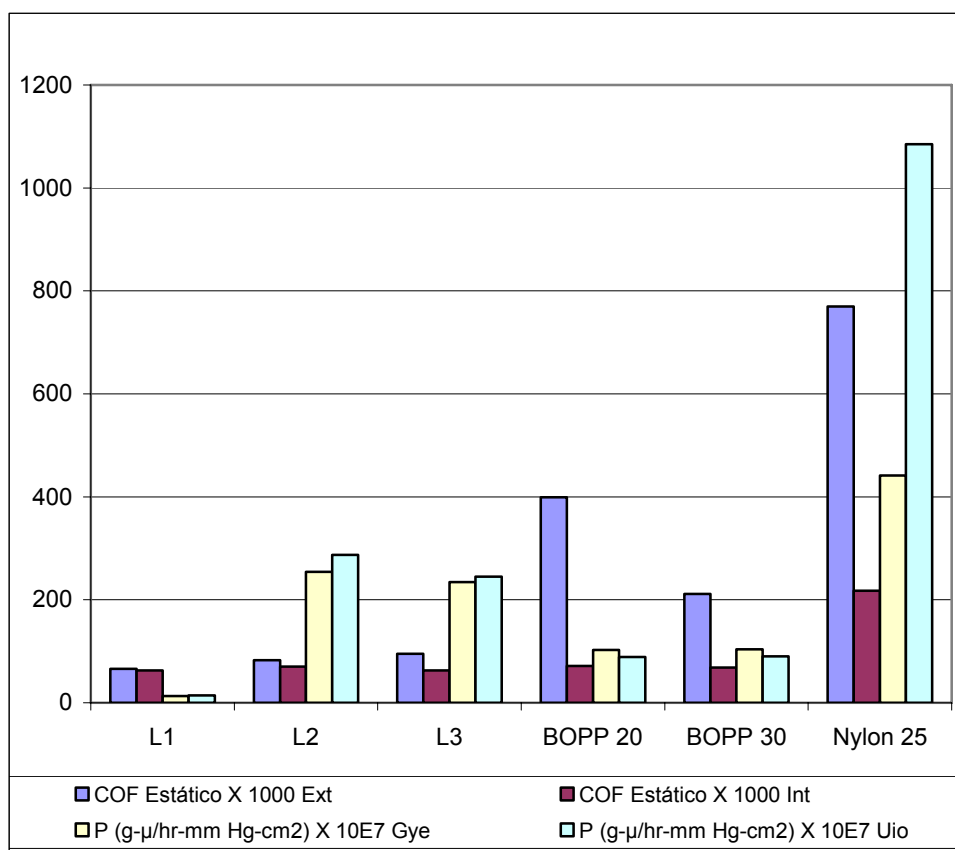


Figura 3.49: COF vs Permeabilidad

Al analizar la relación entre la Permeabilidad y los Coeficientes de fricción de los materiales podemos encontrar 4 comportamientos distintos. Las laminaciones de PE y PET (L2 y L3) siguen la misma tendencia de coeficientes de fricción bajos y coeficientes de permeabilidad media; donde a mayor fricción externa, menor es la permeabilidad. El segundo caso es el de la materia prima de BOPP en sus dos espesores, teniendo coeficientes de fricción elevados y coeficientes de permeabilidad bajos. El Nylon es un material que tiene elevados coeficientes de fricción y permeabilidad. La laminación de BOPP, L1, obtuvo los mejores resultados con coeficientes de permeabilidad imperceptibles y fricción menor al resto de películas.

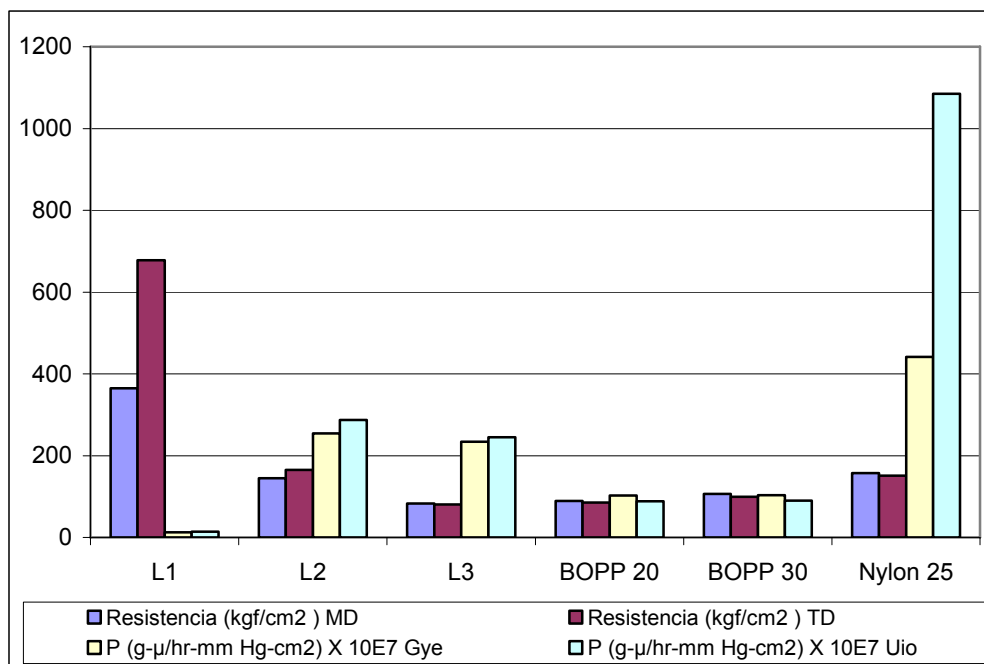


Figura 3.50: Resistencia vs. Permeabilidad

En el análisis comparativo de resistencia a la tensión con la permeabilidad de los materiales se demostró la superioridad de la laminación comparada con la materia prima. La laminación L1 obtiene los mayores valores resistencia a la tensión con la permeabilidad más baja, mientras la laminación L2 obtiene valores mayores de resistencia a la tensión con una permeabilidad media. Solamente la laminación L3 obtuvo similares resultados de resistencia a la tensión que la materia prima de BOPP, donde el BOPP la supera por tener menor permeabilidad. El Nylon alcanza un buen valor de resistencia a la tensión, similares a la laminación L3, pero con una permeabilidad muy alta, es decir con una pobre barrera al vapor de agua.

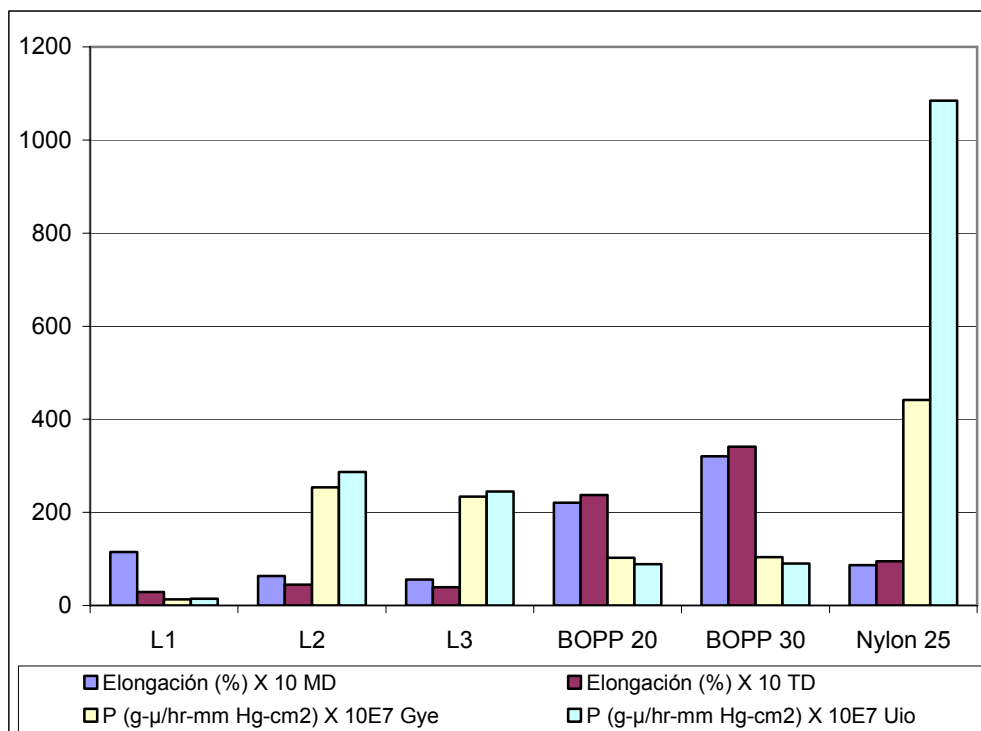


Figura 3.51: Elongación vs. Permeabilidad

La elongación en los materiales del estudio muestra un comportamiento generalizado donde la elongación en dirección de la máquina es mayor que la elongación en dirección transversal para las laminaciones, mientras que en la materia prima la elongación transversal es mayor que la elongación en dirección de la máquina. Para esta propiedad, el BOPP no laminado obtiene el mayor valor de elongación, donde a mayor espesor, mayor elongación; siendo estos materiales de permeabilidad baja. Lo contrario ocurre con las laminaciones de PE y PET (L2 y L3), que obtienen los valores más bajos de elongación, donde a mayor espesor, menor elongación; con permeabilidades de valor medio. En Nylon alcanza una elongación

media siendo la película de mayor permeabilidad. Finalmente la laminación de BOPP (L1), obtiene el menor valor de elongación transversal y permeabilidad, a pesar de ser la laminación de mayor elongación en dirección de la máquina.

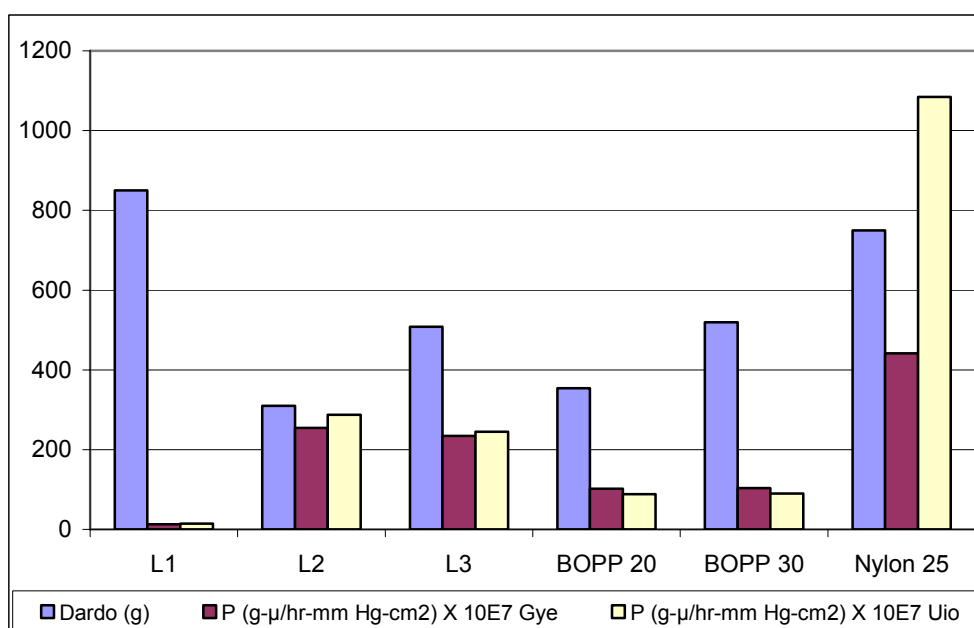


Figura 3.52: Peso de falla vs. Permeabilidad

La resistencia al impacto de las películas estudiadas muestra los mayores valores para la laminación de BOPP (L1) y el Nylon como materia prima, siendo las películas de mayor y menor permeabilidad respectivamente. Las laminaciones de PE y PET (L2 y L3) alcanza valores medios parecidos a los valores del BOPP como materia prima, en donde a mayor espesor se alcanza una mejor resistencia al impacto.

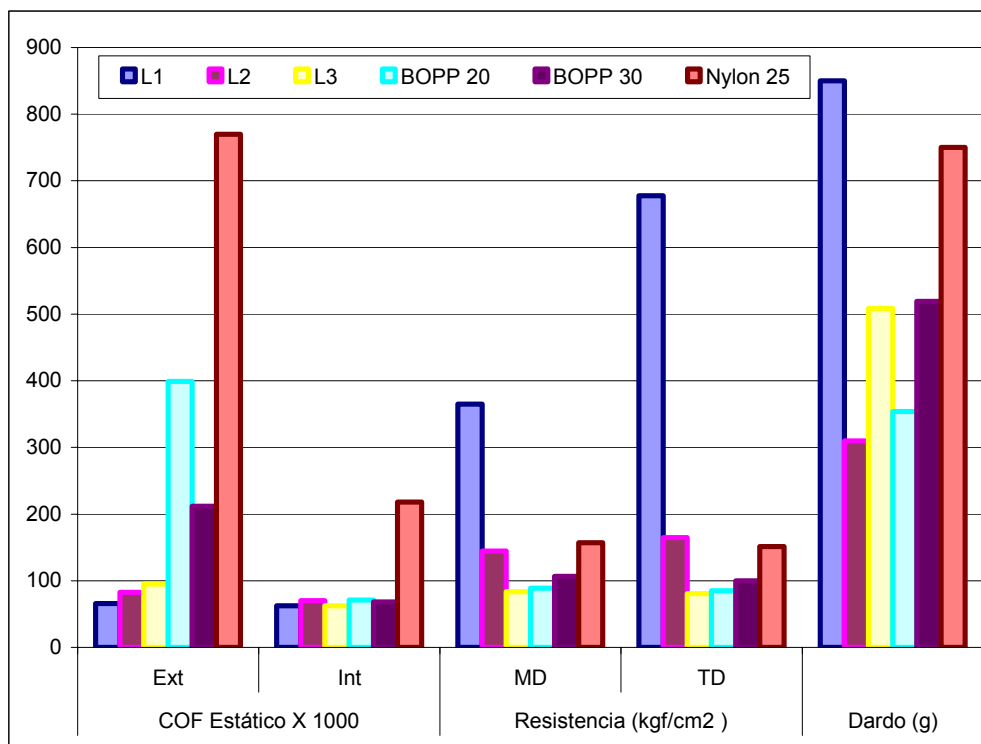


Figura 3.53: Propiedades Mecánicas

Haciendo una recopilación de las propiedades mecánicas de las películas estudiadas, podemos apreciar que las mejores propiedades las tiene la laminación L1, la misma que es la que tiene menor coeficiente de permeabilidad. También se observa que las películas de BOPP 20 sin laminar y la laminación L2 tienen propiedades mecánicas similares, siendo las películas del BOPP de menor espesor y de mejor barrera al vapor de agua. La misma relación existe entre la laminación L3 y el BOPP 30. El Nylon tiene buena propiedades de resistencia a la tensión y al impacto pero su defecto es el alto coeficiente de fricción y permeabilidad.

En la tabla 74 se encuentran el resumen de los resultados obtenidos en el estudio de coextrusión. A continuación en las figuras desde la 3.54 hasta a 3.57, se encuentran graficadas todas las propiedades de las películas multicapas obtenidas mediante laminación y coextrusión.

TABLA 74					
PROPIEDADES DE PELÍCULAS COEXTRUIDAS ⁽¹⁾					
MATERIAL	C1	C2	C3	C4	C5
DARDO (gr)	613,4	1035,1	875,0	631,1	130,8
RESISTENCIA MD (kgf/cm ²)	246,02	286,95	256,07	263,27	243,85
RESISTENCIA TD (kgf/cm ²)	266,34	314,11	296,73	291,96	221,67
ELONGACIÓN MD %	570,2	679,4	685,14	608,08	543,82
ELONGACIÓN TD %	893,6	1014,36	812,9	916,86	695,26
ESPESOR (micras)	73	110	108	75	53
P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²) Uio X 10E7	212,00	197,00	223,00	150,00	555,00

⁽¹⁾ ALARCÓN SALAS, XAVIER. "Estudio de la Relación entre la Estructura, Procesamiento, Propiedades Mecánicas y Transferencia de Vapor de Agua en Películas Multicapa de Polietileno utilizadas en Empaques Alimenticios" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005)

La figura 3.54 muestra los valores de resistencia al impacto para todas las muestras. Todas las películas coextruidas muestran una superioridad frente a las películas laminadas y materia prima, exceptuando la película C5 que es la de menor resistencia al impacto de todas. La única película laminada que alcanza valores para competir la superioridad de las películas coextruidas es la laminación de BOPP (L1), la misma que puede tener un valor mayor al mostrado en la gráfica, ya que no falló con esa carga de impacto. La materia prima que alcanza valores competentes de resistencia al impacto al ser comparada con el resto de películas es el Nylon.

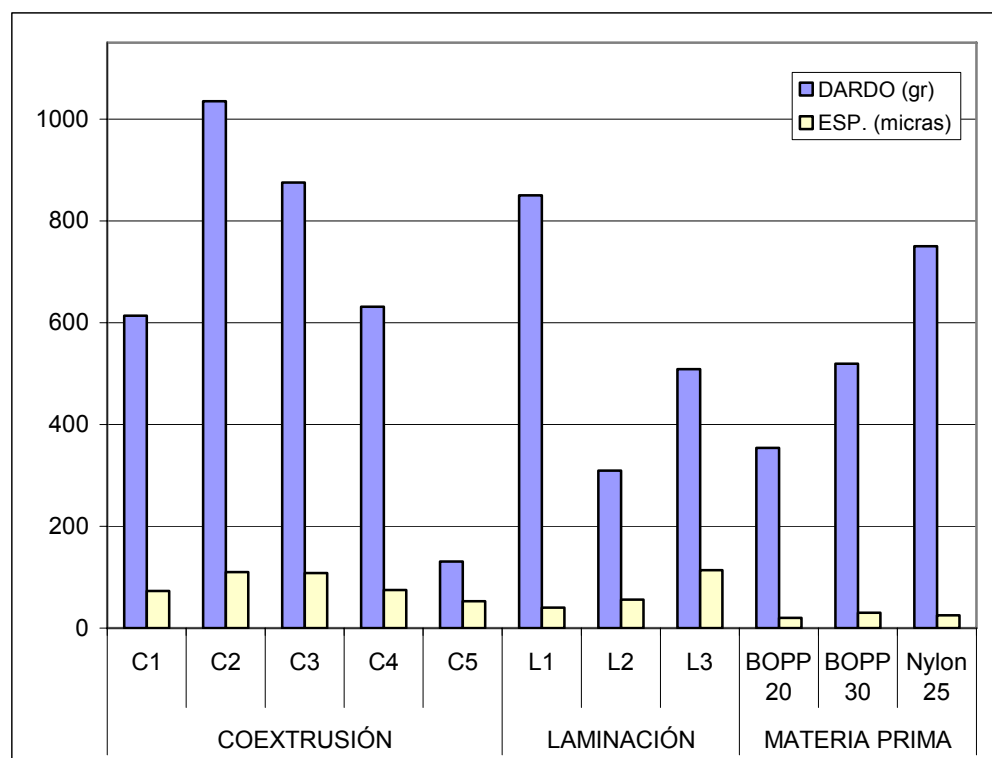


Figura 3.54: IMPACTO AL DARDO (gr)

En la figura 3.55 se aprecia de manera indiscutible la superioridad de la laminación L1 al analizar su resistencia a la tensión. Exceptuando la película laminada de BOPP metalizada, las películas coextruidas tienen mayor resistencia a la tensión que el resto de películas. El BOPP como materia prima y la laminación de PE y PET (L3) tienen la menor resistencia a la tensión. El Nylon y la laminación de PE y PET (L3) tienen valores similares de resistencia a la tensión, un poco mayor que las anteriores, pero no alcanzan los valores de las películas coextruidas.

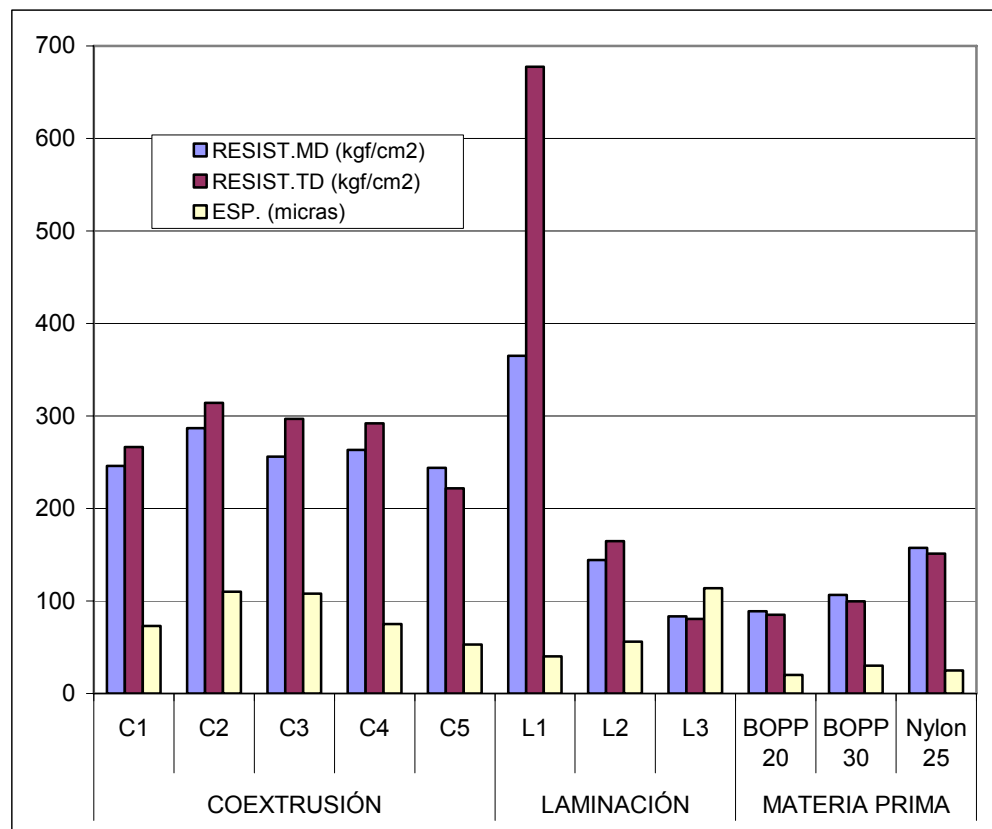


Figura 3.55: RESISTENCIA MD Y TD

En la figura 3.56 se aprecia de manera muy notoria la superioridad en la elongación de las películas coextruidas sobre las películas laminadas. Las películas de BOPP como materia prima y como laminación son las únicas películas del estudio que obtienen una elongación apreciable, aún así su valor de elongación está muy por debajo de la elongación de los materiales coextruidos.

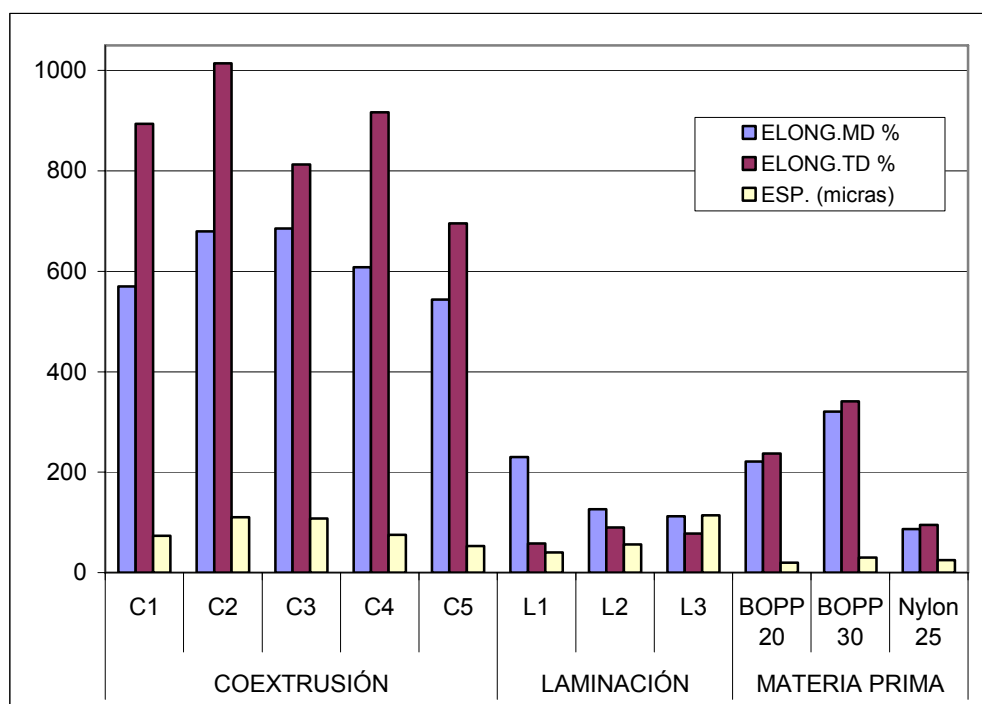


Figura 3.56: ELONGACIÓN MD Y TD

En la figura 3.57 se compara los coeficientes de permeabilidad utilizando el mismo desecante y las mismas condiciones de medición para todas las películas. Debido a que las condiciones en la incubadora fueron distintas, y el desecante utilizado en la primera

parte fue distinto, se descartaron esos valores. La única prueba apta para el estudio comparativo fue con el desecante granulado en condiciones del cuarto ambientado. Se aprecia que el BOPP es el material que obtiene mejor barrera al vapor de agua, especialmente la laminación con metalizado. Las películas multicapa que contienen PE, como las coextrusiones y las laminaciones L2 y L3, presentan un rango similar de permeabilidad, en donde las coextrusiones alcanzan mejores niveles de permeabilidad, exceptuando la coextrusión C5. El Nylon es el material de coeficiente de permeabilidad mayor en todo el estudio, indicando su pobre permeabilidad al vapor de agua.

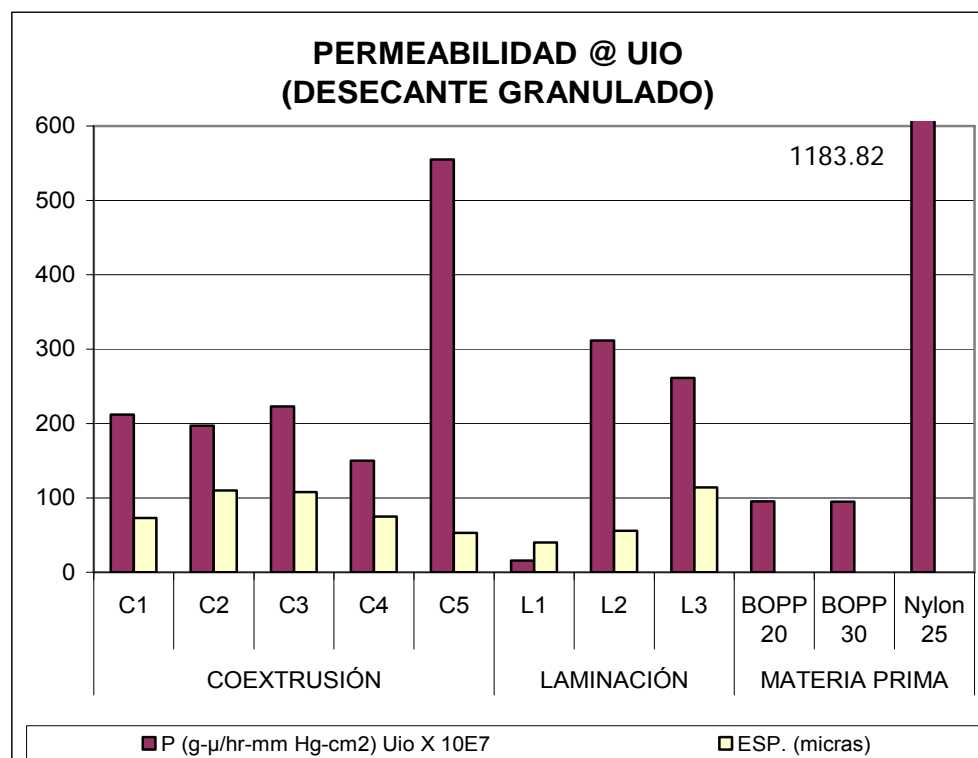


Figura 3.57: PERMEABILIDAD @ UIO (DESECANTE GRANULADO)

Finalmente se analiza las diferencias de Shelf Life para cuatro tipos de productos alimenticios empacados en las películas de ambos estudios: Cereal de trigo, galletas, papas chips y agua. La información se muestra en las tablas desde la 75 hasta la 78. En las figuras desde la 3.59 hasta la 3.62 se observan se aprecia los valores de Shelf Life para condiciones de Guayaquil y Quito a diferentes temperaturas para todas las películas analizadas.

TABLA 75							
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EN DÍAS							
		Temperatura					
		Guayaquil			Quito		
Material		32	25	20	23	18	14
Laminación	L1	809,9	1249,9	1693,3	1246,2	1696,4	2159,2
	L2	55,8	86,2	116,7	85,9	116,9	148,9
	L3	133,2	205,6	278,5	205,0	279,0	355,1
Coextrusión	C1	44,9	72,0	99,9	140,6	196,8	255,5
	C2	65,2	111,7	163,7	223,3	328,2	446,2
	C3	52,3	94,3	143,1	190,2	291,2	408,0
	C4	43,2	88,8	151,5	188,4	318,7	486,8
	C5	13,0	20,2	27,6	39,3	53,8	68,7
Materia prima	BOPP 20	64,6	99,7	135,0	99,4	135,3	172,2
	BOPP 30	95,1	146,8	198,8	146,3	199,2	253,6
	Nylon 25	6,6	10,2	13,8	10,1	13,8	17,6

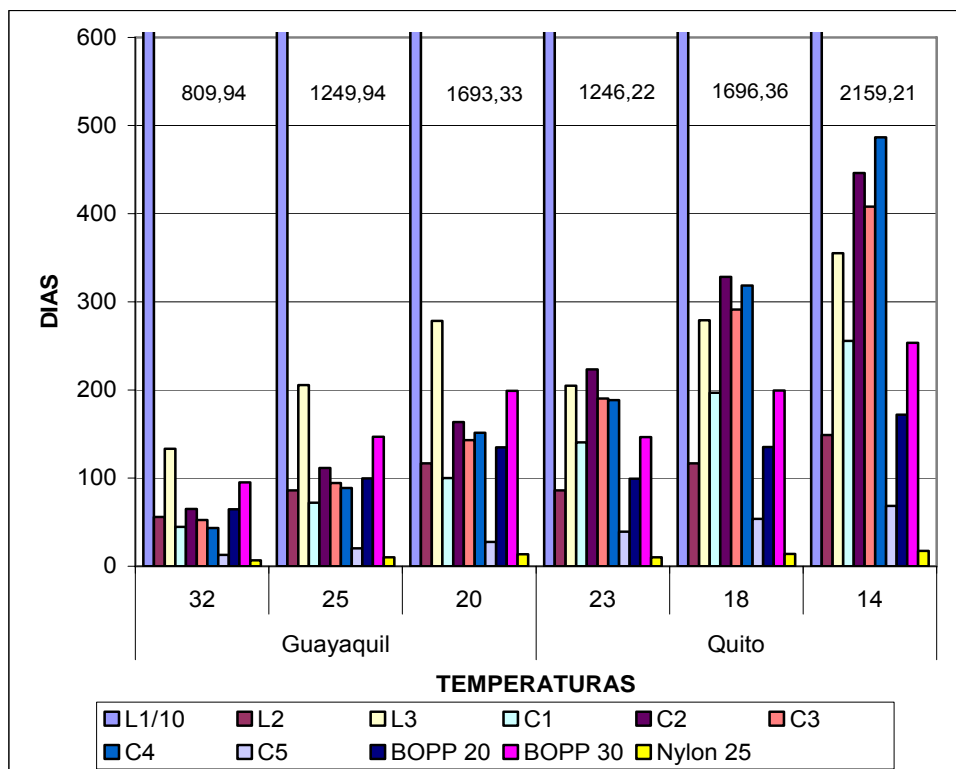


Figura 3.58: COMPARATIVO DE SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO

TABLA 76							
SHELF LIFE PARA GALLETAS EN DÍAS							
		Temperatura					
		Guayaquil			Quito		
Material		32	25	20	23	18	14
Laminación	L1	1631,6	2518,0	3411,2	2246,6	3058,1	3892,5
	L2	112,5	173,6	235,2	154,9	210,8	268,4
	L3	268,3	414,1	561,0	369,5	502,9	640,2
Coextrusión	C1	59,3	95,5	132,0	240,9	337,4	438,0
	C2	86,1	147,5	216,3	382,7	562,6	764,9
	C3	69,1	124,6	189,0	326,0	499,2	699,4
	C4	57,0	117,3	200,1	323,0	546,3	834,5
	C5	17,2	26,7	36,5	67,3	92,1	117,8
Materia prima	BOPP 20	130,1	200,8	272,0	179,1	243,9	310,4
	BOPP 30	191,6	295,6	400,6	263,8	359,1	457,1
	Nylon 25	13,3	20,5	27,8	18,3	24,9	31,7

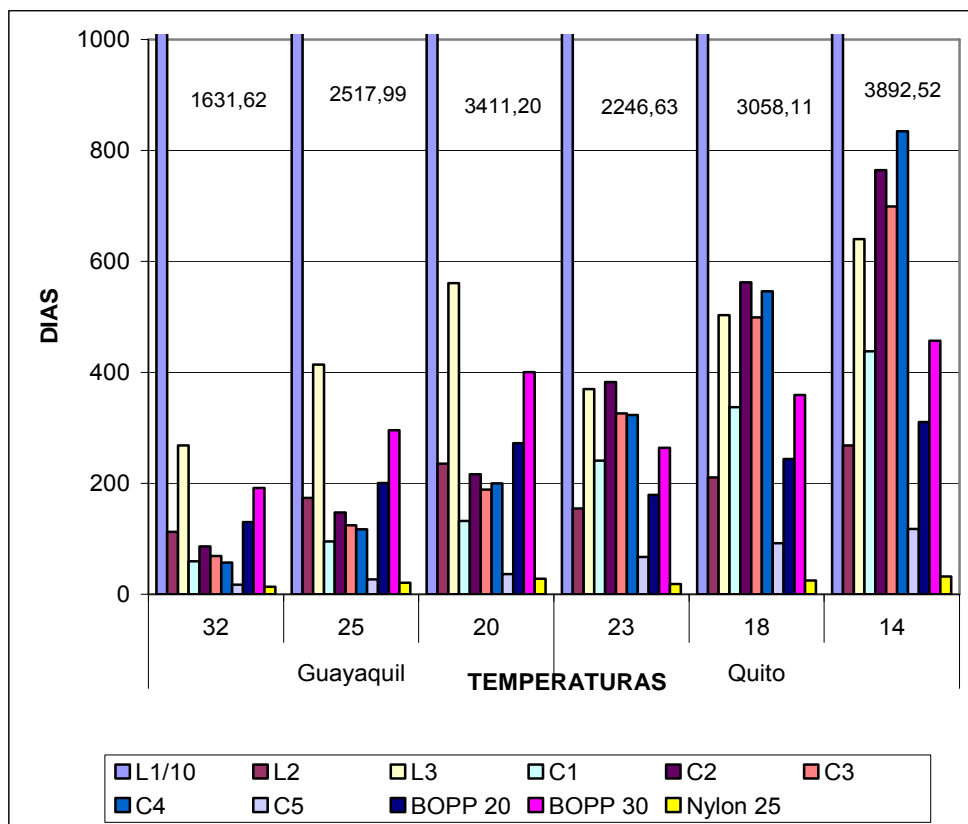


Figura 3.59: COMPARATIVO DE SHELF LIFE PARA GALLETAS

TABLA 77							
SHELF LIFE PARA PAPAS CHIPS EN DÍAS							
Material		Temperatura					
		Guayaquil			Quito		
		32	25	20	23	18	14
Laminación	L1	1540,4	2377,1	3220,4	2133,5	2904,1	3696,5
	L2	106,2	163,9	222,0	147,1	200,2	254,8
	L3	253,3	390,9	529,6	350,9	477,6	607,9
Coextrusión	C1	57,1	91,6	127,1	229,4	321,2	416,9
	C2	82,9	142,0	208,2	364,4	535,6	728,2
	C3	66,6	120,0	181,9	310,4	475,3	665,8
	C4	54,9	112,9	192,6	307,5	520,1	794,4
	C5	16,6	25,7	35,1	64,1	87,7	112,2
Materia prima	BOPP 20	122,8	189,5	256,8	170,1	231,6	294,8
	BOPP 30	180,8	279,1	378,2	250,5	341,0	434,1
	Nylon 25	12,6	19,4	26,2	17,4	23,6	30,1

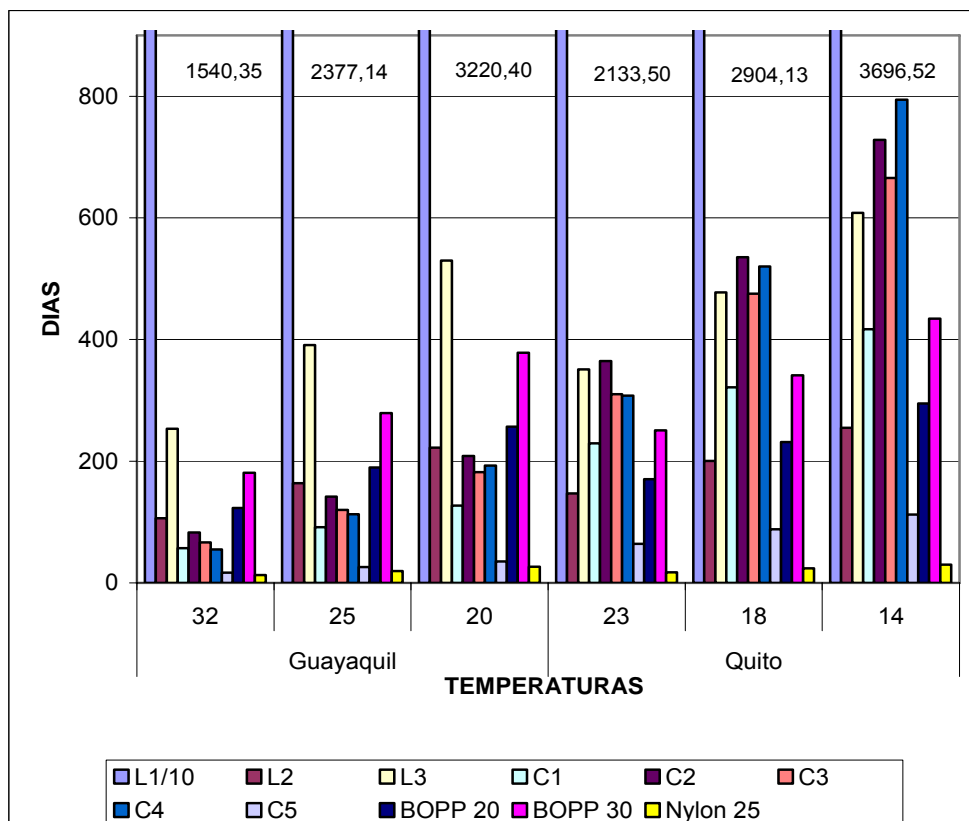


Figura 3.60: COMPARATIVO DE SHELF LIFE PARA PAPAS CHIPS

TABLA 78							
SHELF LIFE PARA AGUA EN DÍAS							
		Temperatura					
		Guayaquil			Quito		
Material		32	25	20	23	18	14
Laminación	L1	1404,6	2167,7	2936,7	2655,3	3614,4	4600,5
	L2	96,8	149,4	202,5	183,1	249,2	317,2
	L3	231,0	356,5	483,0	436,7	594,4	756,6
Coextrusión	C1	461,9	741,0	1027,6	337,3	472,4	613,1
	C2	670,7	1148,4	1684,2	535,8	787,6	1070,9
	C3	583,3	970,4	1471,5	456,4	689,9	979,1
	C4	443,9	913,5	1557,8	452,2	764,8	1168,2
	C5	134,0	208,2	284,2	94,3	129,0	165,0
Materia prima	BOPP 20	112,0	172,8	234,2	211,7	288,2	366,9
	BOPP 30	164,9	254,5	344,8	311,8	424,4	540,3
	Nylon 25	11,4	17,7	23,9	21,6	29,4	37,4

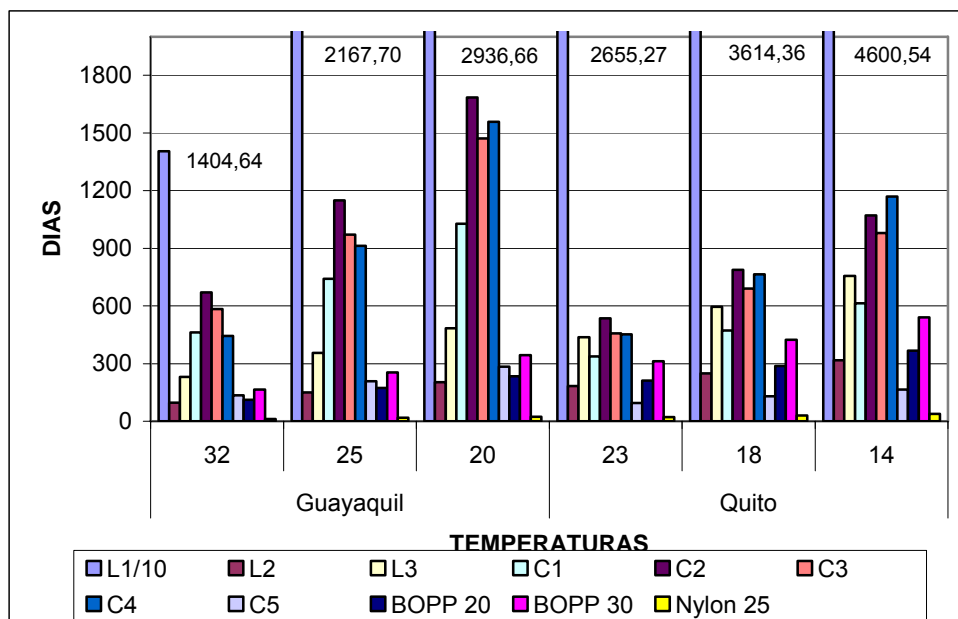


Figura 3.61: COMPARATIVO DE SHELF LIFE PARA AGUA

Para apreciar de mejor forma los valores de Shelf Life en la escala mostrada, se trunca la escala del valor de Shelf Life correspondiente a la laminación L1, ya que es este el material que alcanza la mayor vida útil para los alimentos analizados. Todas las películas coextruidas excepto la C5, alcanzan altos valores de vida útil, mayores al resto de películas analizadas a excepción de la laminación L1. La laminación de PE y PET (L2) tiene un valor aceptable de vida útil para alimentos, considerable para su espesor bajo. Lo contrario pasa con la segunda laminación de PE y PET que es la de mayor espesor. El BOPP 30 alcanza una Shelf Life similar que la laminación L3, aún cuando es materia prima de espesor mucho menor. El Nylon es el material que obtiene la menor Shelf Life, debido a su alto coeficiente de permeabilidad.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. Los empaques flexibles laminados ofrecen una combinación de mejores propiedades mecánicas y de barrera al vapor de agua que los empaques compuestos únicamente de materia prima. Al tener propiedades de varios materiales presentes en un mismo empaque, este ofrece una mejor protección a los productos alimenticios.
2. El correcto estudio de las propiedades mecánicas y de barrera de las películas disponibles nos permite obtener un diseño específico para un alimento en particular. El diseño apropiado para cada alimento permite obtener un mejor rendimiento de cada empaque, alcanzando una vida útil óptima para el alimento utilizando la cantidad mínima de material, lo que implica un ahorro considerable en el costo de producción.

3. Se presentan ciertos comportamientos particulares en las propiedades de las películas laminadas, como lo es la relación inversamente proporcional entre resistencia a la tensión y elongación, que indica que a mayor resistencia, menor será la elongación de la película. Un segundo comportamiento es la relación entre la permeabilidad y la vida útil del alimento empacado, donde a mayor permeabilidad, menor es el tiempo de vida del alimento. En el análisis de la vida útil del alimento envasado en las películas del estudio, se aprecia que en menores temperaturas del ambiente de almacenamiento, se alarga la vida útil del alimento.
4. Al relacionar propiedades mecánicas y la permeabilidad al vapor de agua existe una tendencia entre la elongación en tensión y el coeficiente de permeabilidad. Las películas que permiten una mayor elongación tienen mejores barrera al vapor de agua, como se aprecia en las laminaciones de PET con PE (L2 y L3), en el BOPP y en el Nylon como materia prima. Se deja de lado la laminación L1, ya que la presencia del metalizado cambia este comportamiento.
5. El BOPP es el material de menor permeabilidad en el estudio realizado, el mismo que mejora sus propiedades mecánicas al ser

laminado con un producto metalizado. La laminación metalizada de BOPP llega a ser tan competitiva o mejor que las películas coextruidas de mayor espesor, siendo esta la película multicapa de menor espesor.

6. El BOPP tiene una resistencia al impacto aceptable, ya que con menor espesor alcanza valores similares que una laminación, como es el caso del BOPP 20 junto la laminación L2, o el caso del BOPP 30 y la laminación L3.
7. La materia prima mejora notablemente los coeficientes de fricción al ser laminadas. En el caso del BOPP, el coeficiente de fricción para la superficie externa disminuye aproximadamente hasta el 16% del valor inicial de coeficiente de fricción. La materia prima necesita tener siempre una cara con coeficiente de fricción alto, debido a la rugosidad que requieren los adhesivos para formar multicapas, o las tintas en el caso de una impresión sobre la película.
8. El Nylon es un material que tiene buenas propiedades mecánicas como resistencia a la tensión y al impacto, su defecto son sus altos coeficientes de permeabilidad al vapor de agua y fricción. Este material tiene excelente barrera a la permeación de oxígeno. Una

multicapa con este material obtendría excelentes propiedades si se lamina con un material que mejore su permeabilidad al agua y reste rugosidad al ser laminado.

9. Restringiendo la comparación entre laminación y coextrusión para películas conformadas por materia prima similar, se logra comparar las películas compuestas de PE como son todas las películas coextruidas y las laminaciones L2 y L3. Se observa que las películas coextruidas obtienen mejores propiedades mecánicas a medida que su espesor aumenta como en el caso de C2 y C3, más su permeabilidad se relaciona con los componentes de la película en sí. La propiedad que resalta en la comparación de procesamiento de multicapas es la elongación, donde las películas coextruidas muestran una notable superioridad frente a las películas laminadas, incluso frente a la materia prima.

10. Al restringir la comparación de procesamiento de películas multicapa utilizando componentes y espesores similares como en el caso de la película coextruida C5 y la película laminada L2, se observa que la laminación tiene mejores propiedades mecánicas y de barrera, excepto la resistencia a la tensión. Esto nos indica la que ventaja principal de la laminación sobre la coextrusión es la obtención de

películas de menor espesor con propiedades mecánicas y de barrera aceptables. En el caso de necesitar películas de espesor mayor resulta mejor el uso de películas coextruidas.

11.El uso de materiales de ensayo alternativos como fue la variación de desecantes en el ensayo WVTR, permite una mejor visión de los resultados en las propiedades de los materiales. Se pudo apreciar una diferencia en el comportamiento de los desecantes, específicamente en las laminaciones de PET con PE (L2 y L3) y en el Nylon. La ganancia de peso del desecante debido a la permeación de vapor de agua a través del empaque en condiciones similares es mayor utilizando desecante granulado. Esta variación no se logró apreciar en las películas conformadas de BOPP, debido a sus valores bajos de permeabilidad.

12.Cabe recalcar que para el cálculo de vida útil de los alimentos envasados en distintos materiales, sólo se consideró la transmisión de vapor de agua, y no el las propiedades de barrera a otros agentes como el oxígeno.

13.Una particularidad de los ensayos realizados fueron las condiciones creadas para medir la transferencia de vapor de agua. La incubadora

nos permitió alcanzar temperaturas altas similares a la ciudad de Guayaquil, más la humedad relativa no pudo ser simulada, ya que tiene un valor incluso menor que humedad relativa del cuarto acondicionado que simula las condiciones de Quito. Este defecto en la simulación de ambientes nos lleva a obtener Energías de Activación negativas en casi todos los materiales estudiados.

Recomendaciones:

1. La manipulación del tamaño y superficie de las muestras es muy importante durante los ensayos, por lo que se deben de manejar las muestras con precaución. Los ensayos mecánicos deben ser realizados con películas libres de imperfecciones superficiales, ya que son concentradores de esfuerzo, los que afectan la medición de cualquier parámetro mecánico.
2. Para la realización del ensayo WVTR es aconsejable monitorear el comportamiento de la incubadora y el cuarto acondicionado, para estar seguros de la continuidad de las condiciones ambientales. Cambios drásticos causan errores en la determinación de las propiedades de barrera de las películas.

3. En el caso de utilizar desecantes diferentes para el ensayo WVTR, se debe permitir que el empaque tenga su superficie total libre para receptar en toda su superficie la transmisión de vapor de agua.
4. Los implementos de laboratorio para medir coeficientes de fricción deben ser manejados con extremo cuidado y limpieza. Rayones o suciedad en las superficies de medición causan alteraciones en la medición de fricción.
5. Tener alternativas en aplicaciones de los equipos existentes, como en el caso del equipo de medición de resistencia al impacto al dardo, el mismo que puede ser modificado para alcanzar mayores alturas para la caída libre, tener variaciones en los dardos utilizados y una mayor gama de pesas para medir valores en una escala superior.
6. Para un mejor desarrollo de estos ensayos se recomienda a los directivos de la facultad la implementación de equipos para el análisis de películas plásticas para evitar contratiempos con las políticas de privacidad de las empresas. Los equipos utilizados son realmente sencillos y ameritan un estudio para su respectiva implementación.

7. Sería de gran ayuda la implementación de más proyectos combinados con otras carreras para complementar el análisis real de los alimentos en nuestro caso, logrando compartir conocimientos que se aplican en la industria para un mismo cargo, siendo conocimientos de carreras diferentes.

APÉNDICES

APÉNDICE A

MATERIALES ADICIONALES DE MAYOR USO EN LA INDUSTRIA PLÁSTICA

Poliétilenos Ramificados

Entre los Poliétilenos Ramificados adicionales se encuentran los siguientes:

Acetato Etileno Vinilo (EVA)

El Acetato Etileno Vinilo (EVA) se produce de la copolimerización de etileno Acetato Vinilo. Las resinas de EVA se reconocen por su flexibilidad, resistencia y sellabilidad al calor. El Acetato Vinilo es una moléculas polar, por lo que la inclusión de estas moléculas disminuyen la cristalinidad, aumentan la flexibilidad, aumenta el rango de temperatura de sellado, mejora las propiedades de barrera y aumentan la densidad. El EVA es un copolímero en el cual las propiedades son dependientes de la proporción de Acetato Vinilo y el peso molecular. A medida que el contenido de VA aumenta, la cristalinidad disminuye pero la densidad aumenta. Otra propiedad afectada es la mejora de la claridad, mejor flexibilidad a bajas temperaturas, por lo tanto incrementa su resistencia al impacto. El aumento de la polaridad con el VA incrementa la fuerza de adhesión y la adherencia en caliente. El

incremento del peso molecular refleja un aumento en la viscosidad, dureza, fuerza de sello y adherencia en caliente y flexibilidad.

Debido a su excelente adhesión y fácil procesamiento, el EVA se usa como recubrimientos de coextrusión y láminas de sello coextruída. El EVA tiene una estabilidad termal limitada y una baja temperatura de fundición, por lo que su procesamiento debe realizarse a bajas temperaturas. De cierta forma esto se considera una ventaja para empaques de alimentos congelados.

Ácido Etileno Acrílico (EAA)

El Ácido Etileno Acrílico (EAA) resulta de la copolimerización del Etileno con Ácido Acrílico (AA). Es un termoplástico flexible con propiedades de barrera y resistencia química similar al LDPE. El EAA es superior en fuerza, dureza, adherencia y adhesión, debido al incremento de interacciones intermoleculares de los enlaces de hidrógeno. A medida que el contenido de AA aumenta, disminuye la cristalinidad, por lo que aumenta la claridad y disminuye la temperatura de sellado. De manera similar, el incremento en la polaridad causa mejora en la fuerza de adhesión.

Ionómeros

Al neutralizar copolímeros como el EAA utilizando cationes de Na^+ , Zn^{++} o Li^+ , se produce un material de mejor transparencia, dureza y más resistente a la temperatura. Estos materiales se denominan ionómeros debido a la combinación de enlaces covalentes e iónicos en la cadena polimérica. Fueron desarrollados en 1965 por R. W. Rees y D. Vaughan, mientras trabajaban para la empresa DuPont desarrollando el material conocido como Surlyn.

La presencia de enlaces iónicos produce un aumento en el peso molecular del material. Los enlaces iónicos reducen la habilidad de reordenamiento en las moléculas, por lo que disminuyen su cristalinidad. Además producen mejora en las propiedades de elongación como la viscosidad, causando buena resistencia al rasgado. Las propiedades de barrera de los ionómeros son muy bajas, pero al ser combinados con otros polímeros producen materiales compuestos de propiedades excelentes.

Los ionómeros se usan frecuentemente en aplicaciones críticas de recubrimientos, laminaciones y films. Se utilizan en combinación con Nylon, PET, LDPE, y PVDC en laminaciones y recubrimientos por extrusión. Las cualidades de sus compuestos son la resistencia a

materiales agresivos y la capacidad de soportar el sellado en un amplio rango de temperaturas. Los ionómeros se adhieren muy bien a láminas de aluminio y pueden resistir temperaturas muy bajas (-90°C , menor que LDPE). Existen más de 50 grados comerciales de ionómeros con un amplio rango de propiedades. En general, los ionómeros de sodio tienen buenas propiedades ópticas, de adherencia y resistencia a aceites. Los ionómeros de zinc son inertes al agua, tiene buenas propiedades adhesivas para coextrusión y recubrimientos por coextrusión.

Policloruro de Vinilo (PVC)

El Policloruro de Vinilo (PVC) es un homopolímero termoplástico proveniente del monómero de cloruro de vinilo. 80% del PVC comercial utilizado para embalaje es producido por polimerización de adición como suspensión, emulsión o solución. El PVC tiene fuerte atracción entre partículas cercanas debido a su polaridad, por la presencia de enlaces C-Cl. Es rígido en estado normal a temperatura ambiente. Su temperatura de fundición es 212°C , y su temperatura de descomposición es muy cercana, por lo que es complicado procesar un PVC rendidor sin modificar su composición. La descomposición produce HCl, que es altamente corrosivo, especialmente en presencia de agua. Para reducir los problemas asociados con la descomposición, se añaden estabilizadores al PVC.

El PVC sin plastificantes (PVC rígido) tiene una temperatura de vitrificación de 82° C, lo que dificulta su procesamiento; por lo que es necesario añadir plastificantes, que tienen propiedades lubricantes a nivel molecular, incrementando la flexibilidad del material. Los plastificantes también aumentan la fluidez en bajas temperaturas, lo que disminuye la temperatura de procesamiento. La naturaleza polar del PVC le permite una buena afinidad con los plastificantes, así como con otros aditivos. Como resultado, se puede producir una gran variedad de PVC, desde un material con alta dureza para contenedores rígidos, hasta láminas suaves y flexibles.

Casi todas las propiedades del PVC se ven afectadas por la cantidad y el tipo de aditivos utilizados en su formulación. El PVC sin aditivos tiene buenas propiedades de barrera, mientras que el PVC con alto contenido de plastificantes muestra propiedades de barrera bajas. La adición de plastificantes líquidos, permite la formulación de un PVC flexible con propiedades relativamente buenas de permeabilidad. En la tabla, se muestran las propiedades de un film de PVC.

TABLA A.1	
PROPIEDADES DEL PVC	
Densidad	1.23 g/cm ³
Resistencia a la tensión	34.5 MPa
Resistencia al rasgado	116 N/mm
Temperatura de servicio	-29° – 66° C
Temperatura de sellado	143° – 160° C
Permeabilidad O ²	3342 cm ³ μm/m ² día kPa
WVTR @ 38° C, 90% HR	6096 g μm/m ² día

Al pasar de los años, los campos de salud y medioambientales han cuestionado el uso del PVC. Uno de los problemas es el nivel residual del monómero de cloruro de vinilo (VCM), el mismo que puede migrar hacia los productos empacados, el mismo que fue clasificado como cancerígeno bajo ciertas condiciones. Durante el proceso de polimerización, se mantiene casi intacto el monómero de VCM, solo que se encuentra atrapado dentro de la resina. Para remover estos residuos se han aplicado una serie de procesos de vacío, lo mismos que han reducido sustancialmente la concentración de VCM en la resina.

Otro problema ambiental es el PVC material de desecho, especialmente cuando este es incinerado. La quema de PVC produce HCl, y contribuye a la formación de dióxidos de cloro, lo que son causantes de varios problemas ambientales, entre estos, la lluvia ácida. Los problemas ambientales han desplazado el uso de PVC por materiales más amigables con la naturaleza como el PET.

Poliestireno

El poliestireno (PS) es una adición del polímero estireno. El PS utilizado en embalaje es un polímero amorfo que no puede cristalizarse, es muy duro y altamente quebradizo. Su falta de cristalinidad lo hace altamente transparente. No se puede utilizar en aplicaciones con altas temperaturas, ya que fluye como líquido aproximadamente a los 100° C. Por ser un material amorfo, no tiene una temperatura de fundición definida, pero gradualmente se suaviza en un rango amplio de temperatura. La facilidad que tiene este material para fluir bajo tensión y temperaturas moderadas, lo hacen idóneo para los procesos de extrusión y termoformado. Su carácter quebradizo se puede eliminar mediante una orientación biaxial de las láminas de PS. En general, el PS es un polímero de costo muy bajo, con propiedades de barrera contra agua y gases bajas. Su reactividad química es mayor que el PE y el PP.

El PS se puede encontrar en los siguientes grados:

- PS cristal, utilizado cuando se necesita claridad, pero suele ser un material amorfo y quebradizo.
- PS de alto impacto (HIPS), un PS mezclado con caucho de butadieno, el que mejora la resistencia al impacto del material.
- Espuma PS es una forma de PS cristal tratado con agente para soplado, generalmente un hidrocarburo o dióxido de carbono, el que reduce el

carácter quebradizo notablemente, al punto que este material es utilizado como material de aislamiento o amortiguamiento.

TABLA A.2	
PROPIEDADES DEL PS	
Densidad	1.04 – 1.05 g/cm ³
T _g	74° – 105° C
Módulo de Tensión	35.8 – 51.7 MPa.
Elongación	1.2 – 2.5%
Resistencia al rasgado	4 – 20 g/25 μm
WVTR	1750 – 3900 g μm/m ² @ 37.8° C, 90% HR
Permeabilidad al O ² , 25° C	98000 – 150000 cm ³ gμm/m ² d atm.
Permeabilidad CO ² , 25° C	350000 cm ³ gμm/m ² d atm.
Absorción de agua	0.01 – 0.03%

APÉNDICE B

ENSAYOS ADICIONALES PARA PELÍCULAS PLÁSTICAS

Resistencia al Rasgamiento/Ruptura (ASTM D-1922)

El ensayo de resistencia a la ruptura utiliza un péndulo de impacto para medir la fuerza necesaria para provocar una abertura a una distancia fija del borde de la muestra. El procedimiento indica que se necesitan diez muestras del plástico cortadas en dirección del maquinado y en dirección transversal. Se sujeta la muestra en el verificador, luego un cuchillo se utiliza para formar una abertura en la muestra que termina a una distancia de 43 mm del extremo opuesto en la muestra. El péndulo se suelta para propagar la abertura a través de los siguientes 43mm. La pérdida de energía en el péndulo se usa para calcular una medida de la fuerza de rasgado.

Hay 3 muestras estándar para prueba de rasgado. La muestra preferida para la prueba en películas plásticas es la muestra de radio constante. Esta muestra proporciona un radio constante desde el inicio de la medida de fuerza de rasgado - útil para materiales donde el rasgado no se puede propagar en la dirección intencional. Otra muestra común es un rectángulo de 63 mm x 76 mm. Para textiles, un rectángulo modificado aumenta la

altura en los bordes de la muestra, para así ayudar a minimizar de los bordes externos desenredados.

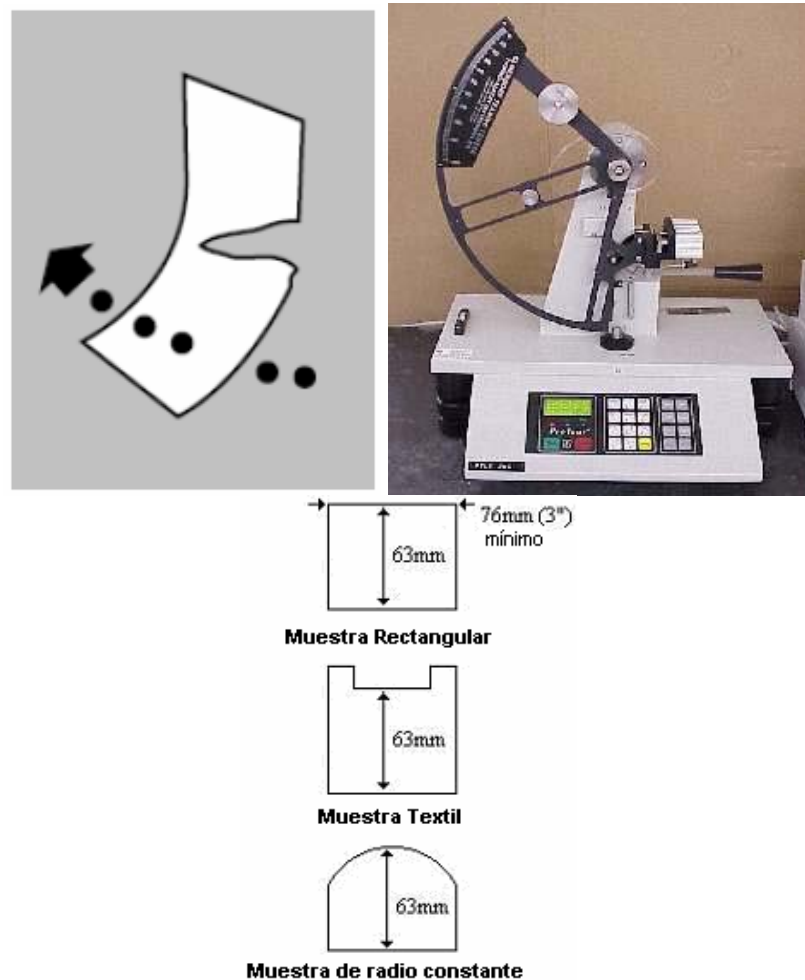


FIGURA B.1: ENSAYO DE RESISTENCIA AL RASGAMIENTO

Los resultados de la prueba se muestran como fuerza de rasgado en mN (o gramo-fuerza). Otro resultado es el espesor de la muestra, aunque no hay ninguna relación directa entre el espesor y la fuerza de rasgado. Así, sólo se comparan resultados para muestras del mismo espesor. El equipo utilizado para esta prueba suele ser un péndulo eléctrico para pruebas de rasgado.

Fuerza de Sello (ASTM F88)

El ensayo de Fuerza de Sello mide la fuerza requerida para separar un sello caliente de dimensiones estandarizadas. La fuerza de sello en sí mide la resistencia a la separación del sello. Los datos obtenidos del ensayo de fuerza de sello, pueden ser utilizados como parámetros para dimensionar un sello adecuado para la aplicación pertinente. Como probeta normalmente se utiliza una zona de empaque sellado de una pulgada de ancho, la misma que se coloca en una máquina de ensayo de tensión. La fuerza requerida para separar el sello es aplicada y reportada por la máquina. En la figura se puede apreciar un esquema del ensayo.

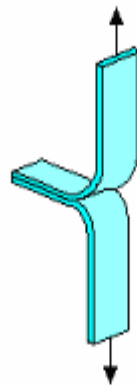


FIGURA B.2: ENSAYO DE FUERZA DE SELLO

Transmisión de Gases (ASTM D-1434)

El ensayo de transmisión de gases mide la permeabilidad de gases a través de una película plástica. El tamaño de la muestra es de un metro cuadrado y se mide la cantidad de gas que atraviesa a través de la película durante 24

horas, con un diferencial de presión de una atmósfera a temperatura constante. Se utiliza celdas con especificaciones estandarizadas para medir la velocidad de transmisión de gas. Se coloca la muestra dentro de la celda, de tal manera que esta separe cada lado de la celda por completo. A partir de la división de la celda, se suministra gas en cada compartimiento de la celda, y se evacua un lado dejando una diferencia de presión de 1 atmósfera. Luego se deja que el gas se transfiera a través de la película por un tiempo determinado. Finalmente con el tiempo transcurrido por completo, se mide los diferenciales de presión en la muestra. Empleando la geometría de la celda y la muestra de película, en conjunto con las medidas de presión y temperatura del gas que ha penetrado la muestra, se puede calcular la velocidad de transmisión a gas. Puede variarse el ensayo colocando otro gas en el compartimiento vaciado para observar el fenómeno de transferencia a con la presencia de otros gases como aire.

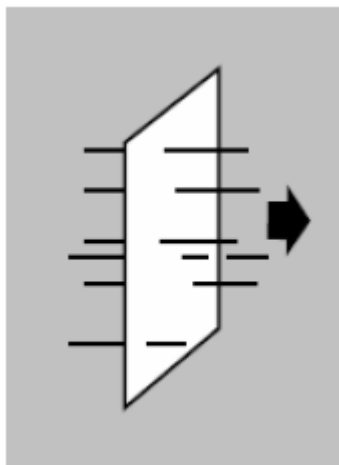


FIGURA B.3: ENSAYO DE TRANSMISIÓN DE GASES

Brillo (ASTM D-2457)

El brillo especular es una medida de la luz reflejada por la superficie de un material. El brillo puede ser inherente en el material, como resultado del proceso de moldeo, o resultado de textura en la superficie. El brillo también puede verse afectado por factores medioambientales como la abrasión superficial o ambiental.

Las medidas del brillo siempre se toman como referencia con una norma, especificando el ángulo de reflexión (20° , 60° , o 85°) según sea necesario. El equipo de medición de brillo se calibra con el ángulo apropiado, luego se verifica la posición del medidor según establece la norma. Finalmente se realiza la medición y se reporta el resultado. Cualquier muestra rectangular que sea mayor que la base del medidor de brillo puede utilizarse para realizar la prueba, tomando en cuenta un tamaño mínimo de 45 x 145mm.

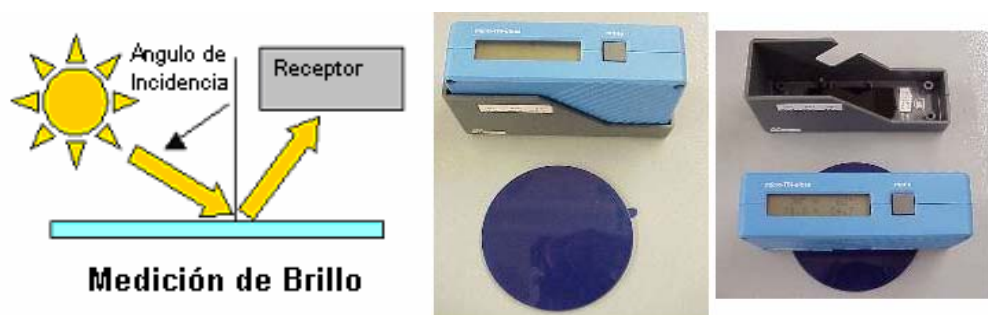


FIGURA B.4: ENSAYO DE MEDICIÓN DE BRILLO

Los datos obtenidos son los siguientes, según el ángulo del medidor:

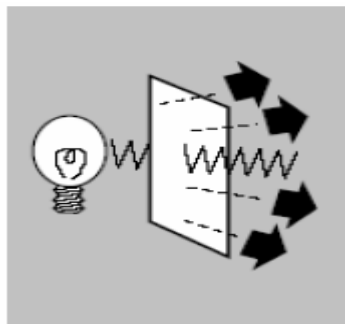
Porcentaje de brillo a 20° para películas de brillo intenso

Porcentaje de brillo a 60° para películas de brillo intermedio

Porcentaje de brillo a 85° para películas de brillo bajo

Opacidad (ASTM D-1003)

El ensayo de opacidad mide el esparcimiento de la luz a medida que atraviesa un material transparente, donde la luz puede ser transmitida o dispersada. El nivel de opacidad puede ser una propiedad inherente en el material, como resultado del proceso de moldeo, o resultado de la textura de la superficie, así como puede ser producto de factores medioambientales como abrasión superficial. En la prueba se mide la transmisión luminosa, que se refiere a la cantidad de luz que atraviesa directamente la muestra; además de medir el nivel de opacidad que se refiere a la parte de la luz que se dispersa.



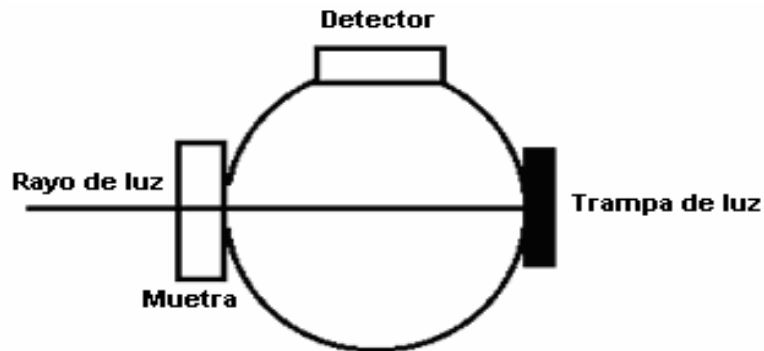


FIGURA B.5: ENSAYO DE OPACIDAD

El procedimiento establece la utilización de un espectrofotómetro automatizado, donde se especifica la luminosidad, el ángulo de observación y el color de referencia. Una vez calibrados los parámetros, se inserta la muestra y el equipo toma tres lecturas, reportando el promedio de las lecturas. En la figura se muestra un esquema básico del medidor, que consta de un medidor, una trampa de luz y la muestra a ser analizada. El tamaño típico de la muestra es un disco de 50 mm o 100 mm de diámetro, aunque cualquier muestra que pueda ser adherida en el medidor puede ser probada. Los datos obtenidos de este ensayo se dan en porcentaje de los siguientes parámetros: opacidad, transmisión luminosa y transmisión difusa.

Claridad (ASTM D1746)

En ensayo de claridad abarca la medición del nivel de transparencia de una película plástica. Este ensayo puede ser utilizado con cualquier material, pero se enfoca sólo en materiales claros y coloridos, ya que sólo estos tienen un nivel de transparencia apreciable.

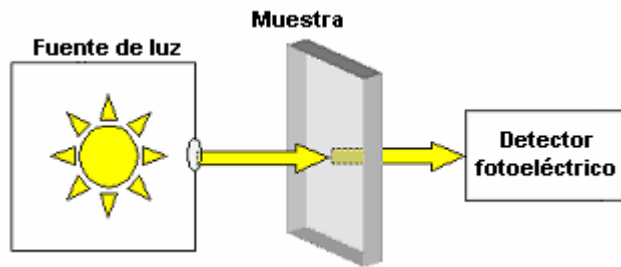


FIGURA B.6: ENSAYO DE CLARIDAD

Una fuente de luz emite un rayo de longitud de onda que varía entre 540 y 560 nm, hacia la superficie del material a ser probado. Un detector fotoeléctrico se calibra de tal manera que marca 100% cuando el material no está presente y marca 0% cuando se apaga la fuente de luz. Se coloca la muestra entre el detector y la fuente y se mide el porcentaje de luz transmitida a través del material. La información de esta prueba es muy sensible al equipo utilizado para la medición, por lo que se sugiere precaución al comparar muestras medidas con equipos diferentes.

BIBLIOGRAFÍA

1. SELKE, SUSAN; CULTER, JOHN; & HERNANDEZ, RUBEN. "Introduction". Plastics Packaging: Properties, Applications and Regulations. Hanser, Munich, 2004. Págs. 1-4.
2. SELKE, SUSAN; CULTER, JOHN; & HERNANDEZ, RUBEN. "Major Plastics in Packaging". Plastics Packaging: Properties, Applications and Regulations. Hanser, Munich, 2004. Págs. 91-107.
3. SELKE, SUSAN; CULTER, JOHN; & HERNANDEZ, RUBEN. "Adhesion, Adhesives and Heat Sealing". Plastics Packaging: Properties, Applications and Regulations. Hanser, Munich, 2004. Págs. 165-186.
4. SELKE, SUSAN; CULTER, JOHN; & HERNANDEZ, RUBEN. "Converting, Laminating and Coating". Plastics Packaging: Properties, Applications and Regulations. Hanser, Munich, 2004. Págs. 225-235.
5. SELKE, SUSAN; CULTER, JOHN; & HERNANDEZ, RUBEN. "Mass Transfer in Polymeric Packaging Systems". Plastics Packaging:

Properties, Applications and Regulations. Hanser, Munich, 2004. Págs. 225-235.

6. ASTM Standard Test Method for Tensile Test of thin plastics. ASTM Standard Method: ASTM D 882.
7. ASTM Standard Test Method for Impact Resistance of Plastic Film by the Free-Falling Dart Method. ASTM Standard Method: D 1709.
8. ASTM Standard Test Methods for Coefficient of Friction. ASTM Standard Method D 1894.
9. ASTM Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. ASTM Standard Method E96.
10. ALARCÓN SALAS, XAVIER. "Estudio de la Relación entre la Estructura, Procesamiento, Propiedades Mecánicas y Transferencia de Vapor de Agua en Películas Multicapa de Polietileno utilizadas en Empaques Alimenticios" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005).
11. Plastics Technology Laboratories Inc: (<http://www.ptli.com>)

12. The Plastics Web: (<http://www.ides.com>)