

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“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 DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

Xavier Alberto Alarcón Salas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2005

AGRADECIMIENTO

A mi director de tesis, Ing. Andrés Rigaíl y vocales, por su valiosa colaboración y paciencia, a las empresas: ASEPLAS, TRILEX, EXPOPLAST y EMPAQPLAST, las cuales me ofrecieron facilidades para tomar muestras y realizar ensayos, a mi querido colegio San José La Salle, formador de una vida con principios y metas, y un agradecimiento especial a toda mi familia y amigos, por su afectuoso e incondicional apoyo en todo este tiempo es algo que debo retribuirles enormemente.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MIS AMIGOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Omar Serrano V.
DELEGADO DEL DECANO
PRESIDENTE

Ing. Andrés Rigal C.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Julián Peña E.
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)

Xavier Alarcón Salas

RESUMEN

En la actualidad, la tecnología en empaques plásticos alimenticios tiene a las películas multicapa de polietileno como un nuevo elemento en expansión, debido a la ventaja en la relación costo-beneficio que brindan las mismas, con respecto a las películas monocapa que se vienen utilizando desde hace tiempo atrás.

Debido a la falta de preparación en el país en el área de polímeros, las industrias plásticas fabrican películas multicapa sin tomar en cuenta un diseño de empaque ni de condiciones de procesamiento de las mismas y las pocas que lo realizan, lo hacen en el sentido contrario de manera empírica y no de la forma adecuada, ya que procesan la película para posteriormente ver si les funciona con el alimento, sin tomar en cuenta temperaturas y humedades, es decir condiciones ambientales severas que hacen perder calidad al alimento empacado, complicándose el problema en nuestro país ya que el Ecuador es un país con diversidad de climas y regiones.

El objetivo de este estudio es analizar las películas multicapa y su relación con el tiempo de vida en percha (shelf life) de algunos alimentos, a determinadas condiciones ambientales, para poder así fabricar con los correctos parámetros de procesamiento, la película multicapa de polietileno necesaria y óptima.

Se procederá a visitar algunas industrias plásticas para tomar muestras y obtener las condiciones de procesamiento de películas multicapa, para posteriormente realizar los ensayos de tensión, de impacto al dardo, y de la tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) y realizar el análisis de propiedades mecánicas y de barrera al vapor de agua de las mismas, analizar cómo varía la permeabilidad con la temperatura, y su influencia en la variación del tiempo de vida en percha (shelf life) de alimentos, también un análisis de costos de materia prima vs. propiedades será muy útil en el estudio. Posteriormente se realizará un ejemplo patrón de los correctos parámetros de diseño de empaque y de procesamiento para un alimento específico en condiciones ambientales determinadas. Con este estudio, conociendo científicamente el correcto procesamiento y requerimientos del empaque, se espera optimizar al máximo los beneficios que las películas multicapa pueden brindar a sus fabricantes, y para el comprador y/o consumidor aumentar la confiabilidad en la calidad del empaque de su alimento.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	II
INDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	IV
SIMBOLOGIA	V
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VII
INDICE DE PLANOS.....	VIII
CAPITULO 1	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes de la tesis	1
1.2 Importancia del estudio	2
1.3 Objetivos de la tesis	3
1.4 Estructura de la tesis	4
CAPITULO 2	
2. BASES Y FUNDAMENTOS TEORICOS.....	7
2.1 Introducción en la Química de Polímeros.....	7

2.1.1 Estructura de los Polímeros.....	7
2.1.2 Hidrocarburos Orgánicos.....	8
2.1.3 Fuerzas de Unión.....	12
2.1.4 Termoplásticos Semicristalinos.....	15
2.1.5 Aditivos y Sustancias Auxiliares.....	17
2.2 Introducción a los Empaques Plásticos.....	22
2.2.1 Funciones del Empaque.....	23
2.2.2 El Producto.....	24
2.2.3 Características de los Materiales de Empaque.....	25
2.3 Deterioro y Alteración de los Alimentos.....	26
2.3.1 Deterioro Biológico.....	27
2.3.1.1 Efectos de los Cambios de Temperatura..	27
2.3.1.2 Crecimiento Bacteriano.....	28
2.3.2 Deterioro Abiótico.....	28
2.3.3 Rol del Agua en los Alimentos.....	29
2.3.4 Isoterma de Adsorción o Curva de Humedad de Equilibrio...31	

CAPITULO 3

3. TECNOLOGÍA DE LAS PELÍCULAS MULTICAPA.....	36
3.1 Materiales.....	36
3.1.1 LDPE.....	38
3.1.2 HDPE.....	40

3.1.2 LLDPE.....	42
3.1.2 Metalocenos.....	45
3.2 Procesamiento de Coextrusión de Películas Multicapa.....	47
3.2.1 Introducción.....	47
3.2.2 Características del Proceso de Coextrusión.....	48
3.2.3 Parámetros Importantes en el Diseño del Proceso.....	57
3.3 Propiedades y Ensayos de las Películas Multicapa.....	67
3.3.1 Tracción y Elongación (ASTM D-882).....	68
3.3.2 Resistencia al Impacto (ASTM D-3420).....	69
3.3.3 Resistencia al Rasgamiento/Ruptura (ASTM D-1922).....	70
3.3.4 Transmisión del Vapor de Agua “WVTR” (ASTM E-96).....	71
3.3.5 Transmisión de Gases (ASTM D-1434).....	73
3.3.6 Brillo (ASTM D-2457).....	74
3.3.7 Opacidad (ASTM D-1003).....	75
3.3.8 Coeficientes de Fricción (ASTM D1894-93).....	76
3.4 Fenómeno de Transferencia de Masa en Películas Plásticas.....	77
3.5 Diseño de Empaques Flexibles de Películas Multicapa.....	85

CAPITULO 4

4. ENSAYOS Y RESULTADOS.....	95
4.1 Datos de las Resinas.....	95
4.2 Condiciones de Procesamiento de las Películas.....	96

4.3 Ensayos de Tensión.....	100
4.4 Ensayos de Impacto al Dardo.....	107
4.5 WVTR (Método del Pouch) y Coeficientes de Permeabilidad.....	111

CAPÍTULO 5

5. ANALISIS DE LAS PELICULAS MULTICAPA EN ESTUDIO.....	133
5.1 Análisis de Propiedades Mecánicas vs. Barrera.....	133
5.2 Análisis de Costos de Materia Prima vs. Propiedades de las Multicapa.....	142
5.3 Análisis de Variación de la Permeabilidad con el Cambio de Temperatura.....	155
5.4 Análisis de Variación del Tiempo en Percha “Shelf Life” para Algunos Alimentos con las Condiciones Ambientales de Quito y Guayaquil.....	162
5.5 Caso de Aplicación: Diseño del Empaque y del Procesamiento de la Película Multicapa Requerida, para un Alimento Específico a Determinadas Condiciones Ambientales.....	177

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	188
6.1 Conclusiones	188
6.2 Recomendaciones	191

APÉNDICES.

BIBLIOGRAFÍA.

ABREVIATURAS

ASTM	Sociedad Americana de Ensayos y materiales
Aw	Actividad de Agua
BUR	Relación de Soplado
cm ²	Centímetros Cuadrados
DDR	Relación de Halado
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos
g	Gramos
HDPE	Polietileno de Alta Densidad
HMW	Alto Peso Molecular
HRE	Humedad Relativa de Equilibrio
H ₂ O	Agua
IBC	Enfriamiento Interno de la Burbuja
J	Joule
K	Kelvin
LDPE	Polietileno de Baja Densidad
LLDPE	Polietileno de Baja Densidad Lineal
mmHg	Milímetros de Mercurio
MD	Dirección Máquina
MI	Índice de Fluidez
MW	Peso Molecular
MWD	Distribución del Peso Molecular
μ	Micras
N	Newton
Pa	Pascal
PE	Polietileno
psi	Libras por Pulgadas Cuadradas
RH	Humedad Relativa
Rpm	Revoluciones por Minuto
s	Segundos
TD	Dirección Transversal
Tg	Temperatura de Transición Vítrea
ULDPE	Polietilenos de Ultra Baja Densidad
VLPDE	Polietilenos de Muy Baja Densidad
WVTR	Taza de Transmisión de Vapor de Agua

SIMBOLOGÍA

A	Área del Empaque
D_b	Diámetro de la Burbuja
D_d	Diámetro del Dado
D	Diámetro de la Extrusora
e_i	Espesor Inicial
e_f	Espesor Final
E_p	Energía de Activación
H_o	Abertura del Cabezal (Die Gap)
m_o	Humedad Inicial del Headspace del Empaque
m_c	Humedad Crítica del Headspace del Empaque
N	Velocidad Angular del Husillo
P	Coefficiente de Permeabilidad
p_s	Presión de Saturación de Vapor de Agua
q	Cantidad de Peso Ganado por el Alimento
RH_{in}	Humedad Relativa en el Interior del Empaque
RH_{out}	Humedad Relativa Fuera del Empaque
t	Tiempo de Almacenamiento (Shelf Life)
T	Temperatura
T_z	Tensión Axial de la Burbuja
V_E	Velocidad Específica de Enfriamiento
W_F	Peso de Falla por Impacto
Z	Altura de la Línea de Congelamiento
Φ	Angulo de la Hélice del Husillo
m	Salida
η_{ef}	Factor de Eficiencia
ℓ	Espesor de la Película
ΔP	Sobrepresión Interna de la Burbuja
Δp	Diferencia de Presión en Ambos Lados del Empaque
ρ_{pel}	Densidad de la Película
ρ_{melt}	Densidad de la Masa Fundida

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Hidrocarburos Saturados.....	8
Figura 2.2	Hidrocarburos No Saturados.....	9
Figura 2.3	Modelo de Polimerización.....	10
Figura 2.4	Estructura de Polímeros.....	11
Figura 2.5	Moléculas de Polímeros.....	12
Figura 2.6	Fuerzas de Dispersión.....	13
Figura 2.7	Fuerzas Dipolares.....	13
Figura 2.8	Fuerzas de Inducción.....	14
Figura 2.9	Fuerzas de Puente de Hidrógeno.....	14
Figura 2.10	Molécula de Polietileno.....	14
Figura 2.11	Regiones Cristalina (A) y Amorfa (B) en Poliolefinas.....	16
Figura 2.12	Empaques Plásticos.....	24
Figura 2.13	Isoterma de Adsorción.....	32
Figura 3.1	Familia del Polietileno.....	37
Figura 3.2	Molécula Ramificada de LDPE.....	38
Figura 3.3	Molécula Lineal de HDPE.....	41
Figura 3.4	Estructura de una Molécula de LLDPE.....	43
Figura 3.5	Catálisis de Metaloceno (Sitio Unico).....	45
Figura 3.6	Sacos de Pellets de LLDPE de 25 Kg.....	46
Figura 3.7	Película Multicapa de Polietileno.....	47
Figura 3.8	Extrusora.....	50
Figura 3.9	Cabezal para Coextrusión de 3 Capas.....	50
Figura 3.10	Distribución del Flujo en el Cabezal.....	51
Figura 3.11	Coextrusión por Soplado.....	52
Figura 3.12	Rodillos Estabilizadores de Burbuja.....	53
Figura 3.13	Torre de 3 Pisos para Coextrusión.....	54
Figura 3.14	Impresión sin Tratamiento Corona.....	55
Figura 3.15	Unidad de Embobinado.....	56
Figura 3.16	Impresión Flexográfica.....	57
Figura 3.17	Parámetros de la Burbuja.....	61
Figura 3.18	Curvas Isoparamétricas BUR vs Relación de Espesor, para X=20.....	63
Figura 3.19	Curvas Isoparamétricas BUR vs Relación de Espesor,	

	para X=5.....	63
Figura 3.20	Velocidad de Halado sin IBC.....	64
Figura 3.21	Velocidad de Halado con IBC.....	64
Figura 3.22	Flujo Másico de Extrusoras.....	67
Figura 3.23	Tracción y Elongación de Películas.....	68
Figura 3.24	Resistencia al Dardo.....	69
Figura 3.25	Resistencia al Rasgamiento.....	71
Figura 3.26	Transmisión del Vapor de Agua.....	72
Figura 3.27	Transmisión de Gases.....	74
Figura 3.28	Reflexión de la Luz.....	75
Figura 3.29	Transmisión de Luz.....	76
Figura 3.30	Fricción de la Película.....	77
Figura 3.31	Transmisión a través de la Película.....	80
Figura 3.32	Ley de Solubilidad de Henry.....	83
Figura 3.33	WVTR, Permeancia y Permeabilidad.....	86
Figura 3.34	Permeación a través de Multicapas.....	87
Figura 3.35	Actividad de Agua vs Humedad.....	91
Figura 3.36	Proceso de Predicción de Shelf Life.....	94
Figura 4.1	Máquina de Tracción Universal.....	101
Figura 4.2	Secuencia de Elongación de la Tira (TD).....	104
Figura 4.3	Micrómetro de Presión.....	108
Figura 4.4	Balanza Analítica KERN _{KB}	112
Figura 4.5	Balanza Analítica SARTORIUS BL210S.....	113
Figura 4.6	Selladora	113
Figura 4.7	Incubadora BINDER.....	113
Figura 4.8	Pouches Multicapa.....	118
Figura 4.9	Pouches en Atmósfera Controlada.....	118
Figura 4.10	WVTR de Pouch A para Guayaquil.....	121
Figura 4.11	WVTR de Pouch A para Quito.....	122
Figura 4.12	WVTR de Pouch B para Guayaquil.....	123
Figura 4.13	WVTR de Pouch B para Quito.....	124
Figura 4.14	WVTR de Pouch C para Guayaquil.....	125
Figura 4.15	WVTR de Pouch C para Quito.....	126
Figura 4.16	WVTR de Pouch D para Guayaquil.....	127
Figura 4.17	WVTR de Pouch D para Quito.....	128
Figura 4.18	WVTR de Pouch E para Guayaquil.....	129
Figura 4.19	WVTR de Pouch E para Quito.....	130
Figura 5.1	Comparación de las Pruebas Mecánicas.....	134
Figura 5.2	Resistencia al Impacto vs Coeficiente de Permeabilidad.....	136
Figura 5.3	Resistencia a la Tensión vs Coeficiente de Permeabilidad.....	137
Figura 5.4	Propiedades Mecánicas vs Coeficiente de Permeabilidad.....	138
Figura 5.5	Costo vs Resistencia al Impacto al Dardo.....	147

Figura 5.6	Costo vs Resistencia a la Tensión.....	149
Figura 5.7	Costo vs Elongación (MD y TD).....	151
Figura 5.8	Costo vs Permeabilidad.....	153
Figura 5.9	Propiedades vs Costos de Películas.....	154
Figura 5.10	Variación del Coeficiente de Permeabilidad con la Temperatura de Tricapa A.....	158
Figura 5.11	Variación del Coeficiente de Permeabilidad con la Temperatura de Tricapa B.....	158
Figura 5.12	Variación del Coeficiente de Permeabilidad con la Temperatura de Tricapa C.....	159
Figura 5.13	Variación del Coeficiente de Permeabilidad con la Temperatura de Tricapa D.....	159
Figura 5.14	Variación del Coeficiente de Permeabilidad con la Temperatura de Tricapa E.....	160
Figura 5.15	Isoterma de Adsorción para Cereal de Trigo.....	165
Figura 5.16	Isoterma de Adsorción para Galletas.....	171
Figura 5.17	Isoterma de Adsorción para Papas Chips.....	173

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Actividad de Agua de Algunos Alimentos.....	35
Tabla 2	Propiedades del LDPE.....	40
Tabla 3	Propiedades del HDPE.....	42
Tabla 4	Densidad del Polietileno en Función de la Temperatura...	60
Tabla 5	Coeficiente de Permeabilidad a 25°C y Energía de Activación (P en cc (STP) cm/m ² d atm, E _p en kJ/mol).....	89
Tabla 6	Presión de Saturación de Vapor de Agua.....	93
Tabla 7	Datos de las Resinas Utilizadas.....	95
Tabla 8	Formulación de la Multicapa A.....	96
Tabla 9	Formulación de la Multicapa B.....	96
Tabla 10	Formulación de la Multicapa C.....	97
Tabla 11	Formulación de la Multicapa D.....	97
Tabla 12	Formulación de la Multicapa E.....	98
Tabla 13	Parámetros de Procesamiento de las Películas.....	99
Tabla 14	Ensayos de Tensión de la Tricapa A.....	105
Tabla 15	Ensayos de Tensión de la Tricapa B.....	105
Tabla 16	Ensayos de Tensión de la Tricapa C.....	106
Tabla 17	Ensayos de Tensión de la Tricapa D.....	106
Tabla 18	Ensayos de Tensión de la Tricapa E.....	107
Tabla 19	Pruebas de Impacto al Dardo.....	111
Tabla 20	Peso en Gramos Ganado por el Desecante por la Permeación de H ₂ O en el Pouch, a condiciones de Guayaquil (31.67°C, 75.67% HR).....	119
Tabla 21	Peso en Gramos Ganado por el Desecante por la Permeación de H ₂ O en el Pouch, a condiciones de Quito (21°C y 47.83% HR).....	120
Tabla 22	Coeficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa A a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR).....	121
Tabla 23	Coeficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa A a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR).....	122
Tabla 24	Coeficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa B a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR).....	123

Tabla 25	Coefficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa B a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR).....	124
Tabla 26	Coefficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa C a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR).....	125
Tabla 27	Coefficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa C a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR).....	126
Tabla 28	Coefficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa D a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR).....	127
Tabla 29	Coefficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa D a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR).....	128
Tabla 30	Coefficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa E a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR).....	129
Tabla 31	Coefficiente de permeabilidad al H ₂ O del film tricapa E a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR).....	130
Tabla 32	Valores de P, para las Películas Tricapas en Estudio.....	132
Tabla 33	Resistencia Específica al Impacto.....	140
Tabla 34	Elongación Específica.....	141
Tabla 35	Costo de las Resinas Utilizadas.....	143
Tabla 36	Costo de la Película A.....	144
Tabla 37	Costo de la Película B.....	144
Tabla 38	Costo de la Película C.....	145
Tabla 39	Costo de la Película D.....	145
Tabla 40	Costo de la Película E.....	146
Tabla 41	Energía de Activación (E _p) de las Películas.....	156
Tabla 42	Shelf Life para Cereal de Trigo Empacado en Tricapa A...	166
Tabla 43	Shelf Life para Cereal de Trigo Empacado en Tricapa B...	167
Tabla 44	Shelf Life para Cereal de Trigo Empacado en Tricapa C...	168
Tabla 45	Shelf Life para Cereal de Trigo Empacado en Tricapa D...	169
Tabla 46	Shelf Life para Cereal de Trigo Empacado en Tricapa E...	170
Tabla 47	Shelf Life para Galletas, en Días.....	172
Tabla 48	Shelf Life para Papas Chips en Días.....	174
Tabla 49	Shelf Life para Agua en Días.....	176
Tabla 50	Cálculo del Empaque para Papas Chips (Guayaquil).....	180
Tabla 51	Parámetros de Procesamiento de Tricapa a Producir.....	184
Tabla 52	Selección de Coextrusora.....	187

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Tornillo de Extrusora (PE)

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes de la Tesis

La presente tesis se desarrolla en base a una inquietud que surgió en los miembros de ASEPLAS, la cual fue planteada al resto de las empresas que pertenecen a este gremio y que tuvo una notoria acogida. Dicha inquietud surgió debido a que la industria alimenticia procesa y obtiene un producto final física, química y biológicamente estable y apto para el consumo humano, pero que debido a diferentes factores desconocidos por dicha industria, el producto alimenticio se ve degradado y alterado para su consumidor final, en la misma bodega o percha, antes de la fecha de vencimiento indicada en el empaque, ocasionando grandes problemas y pérdidas monetarias a la industria alimenticia y a las relacionadas con la misma, como lo son desde grandes supermercados hasta minimarkets y tiendas más pequeñas, y hasta en algunos casos

puede peligrosamente llegar al consumo del ser humano que confiando en la fecha de caducidad del mismo, ingiere un producto en mal estado, deteriorando y perjudicando así su salud.

1.2 Importancia del Estudio

A lo largo de estos años las industrias han procesado películas plásticas que utilizan en sus empaques, sin un diseño o estudio previo, siguiendo parámetros copiados de otros países, con condiciones de procesamiento, almacenamiento, climas y materia prima (alimentos) diferentes a nuestro país, o con condiciones de procesamiento sugeridas por el proveedor de la maquinaria, “recetas estandarizadas” que al ser aplicadas en nuestro país ocasionan frecuentemente los problemas antes mencionados sin considerar que por tratarse de ser productos alimenticios, tienen un consumidor final, poniendo así en juego la salud y la vida de una persona, algo invaluable en el ser humano.

Los empaques multicapa, aun siendo producidos de manera empírica en el país, son en la actualidad los más seguros y confiables de los empaques plásticos utilizados por la industria alimenticia, ya que por poseer mayor número de capas que los empaques monocapa, brinda mejores propiedades mecánicas y de

barrera para el alimento, de aquí la importancia de este estudio radica en la necesidad de las empresas plásticas que manufacturan los empaques, de diseñar y procesar de manera confiable y segura el adecuado y correcto empaque para cada ambiente, clima y región de los diferentes productos alimenticios ecuatorianos, dando así el correcto espesor y composición de película multicapa lo cual implica reducción de costos para la industria plástica, y para la alimenticia, la seguridad de que su producto conservará su calidad y sus propiedades en el tiempo determinado.

1.3 Objetivos de la Tesis

El objetivo general de esta tesis es determinar los requerimientos de los envases flexibles plásticos coextruidos, con respecto a la permeabilidad de agua, propiedades mecánicas, y su influencia en el tiempo de vida útil de los productos alimenticios empacados.

Existen ciertos objetivos específicos que están presentes, entre los cuales tenemos:

1. Determinar la permeabilidad y transmisión de vapor de agua en películas multicapa de polietileno, tomando en consideración condiciones estándares y condiciones atmosféricas de Guayaquil y Quito.

2. Determinar la relación de las propiedades mecánicas y la permeabilidad del agua en diferentes películas multicapa, a condiciones estándares y condiciones atmosféricas de Guayaquil y Quito.
3. Determinar los tiempos de almacenamiento de alimentos secos como sal, azúcar y líquidos como leche, yogurt, agua, aceite, manteca, tomando en consideración el material, el empaque, variación de su espesor, y condiciones climáticas de Guayaquil y Quito.
4. Determinar conociendo el empaque adecuadamente diseñado, las condiciones y parámetros de procesamiento a seguir en el proceso de coextrusión para obtener la película multicapa requerida para dicho empaque.

Todos estos objetivos específicos estarán presentes para el desarrollo de esta tesis y nos proporcionaran un mejor criterio para llegar a diseñar de manera correcta el empaque y condiciones de procesamiento.

1.4 Estructura de la Tesis

En esta sección se presentará una breve descripción de cada capítulo de esta tesis:

- Capítulo 2: en este capítulo se presentará una introducción teórica a los polímeros, a la alteración que sufren los alimentos y a las películas multicapa utilizadas en los empaques plásticos.

- Capítulo 3: en este capítulo se explicará todo lo relacionado a la tecnología de películas multicapa, como la materia prima utilizada, los parámetros y condiciones de procesamiento, las propiedades posee la película que influyen en la conservación del alimento, así también como la información teórica referente al fenómeno de transmisión de vapor de agua y el diseño de empaques de películas multicapa.

- Capítulo 4: en este capítulo se detallará los ensayos y pruebas aplicadas con sus respectivas normas, utilizadas para determinar las propiedades inherentes a la películas tanto mecánicas como de barrera, y también se mostrarán los resultados, los cuales nos servirán posteriormente como datos para un posterior análisis de diseño del empaque adecuado para un alimento determinado y del procesamiento de la película multicapa respectiva.

- Capítulo 5: en este capítulo con los resultados obtenidos de las muestras, se hará un análisis de propiedades mecánicas, de

barrera, de costos de materia prima, de variación de la permeabilidad con la temperatura, de variación de shelf life para algunos alimentos y se realizará un modelo de diseño tanto del empaque como de los correctos parámetros a usar en el proceso de coextrusión de películas multicapa, para un alimento en particular a condiciones ambientales determinadas.

- Capítulo 6: en este capítulo se puntualizan todas las conclusiones obtenidas durante esta tesis y se plantean recomendaciones para obtener mejores resultados.

CAPÍTULO 2

2. BASES Y FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Introducción en la Química de Polímeros

La materia esta formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros.

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, algunas más se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

2.1.1 Estructura de los Polímeros

Las valencias se representan con segmentos (guiones) al escribir las fórmulas (fórmulas estructurales)

El número de guiones de cada átomo es igual a la valencia del elemento

2.1.2 Hidrocarburos Orgánicos

Los plásticos son compuestos químicos orgánicos. Materiales orgánicos son compuestos constituidos fundamentalmente de los elementos carbono (C) e hidrógeno (H).

Hidrocarburos Saturados

El compuesto orgánico más simple es el metano (CH₄). Los átomos de carbono tienen también la posibilidad, bajo ciertas condiciones, de enlazarse entre sí formando largas cadenas. Ello lleva a una multiplicidad de compuestos de hidrocarburos conocidos:

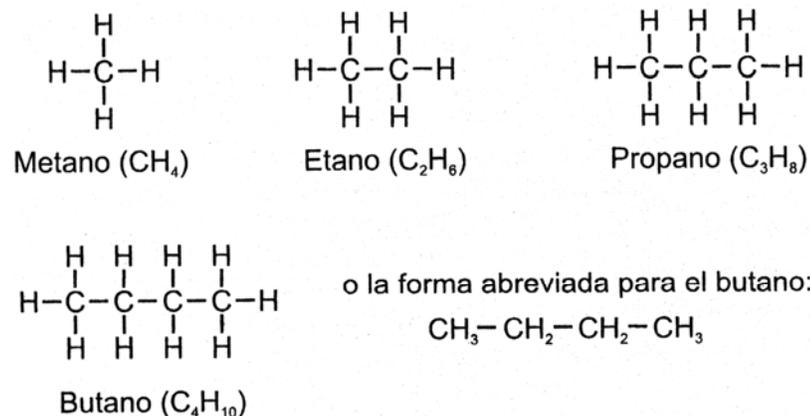


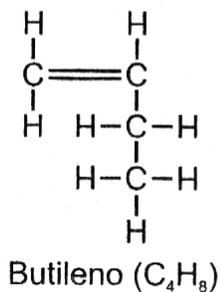
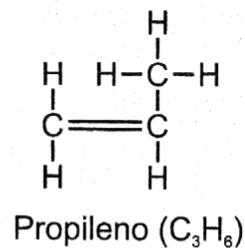
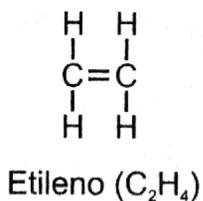
FIGURA 2.1 HIDROCARBUROS SATURADOS

En general se denominan estos hidrocarburos como alcanos o parafinas y se formulan de la siguiente manera: C_nH_{2n+2}

Se trata de hidrocarburos saturados, porque los carbonos se encuentran vinculados por un solo enlace o valencia.

Hidrocarburos No Saturados

También hay hidrocarburos en los cuales dos átomos de carbonos se unen por medio de 2 o 3 valencias. Se habla de enlaces bi y trivalentes. Ejemplos:



o la forma abreviada para el butileno

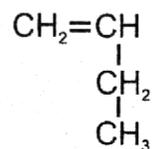


FIGURA 2.2 HIDROCARBUROS NO SATURADOS

Los hidrocarburos con un doble enlace se denominan alquenos u olefinas. Se formulan de la siguiente manera: C_nH_{2n}

Los polímeros consisten en grandes moléculas compuestas de otras más pequeñas y repetidas, llamadas monómeros, por medio de la polimerización se unen en una macromolécula muchas pequeñas moléculas de igual o similar constitución. Las moléculas deben poseer dobles enlaces para reaccionar. El calor y los catalizadores abren los dobles enlaces de forma tal que cada molécula se une a otra siguiente por medio de las valencias libres.

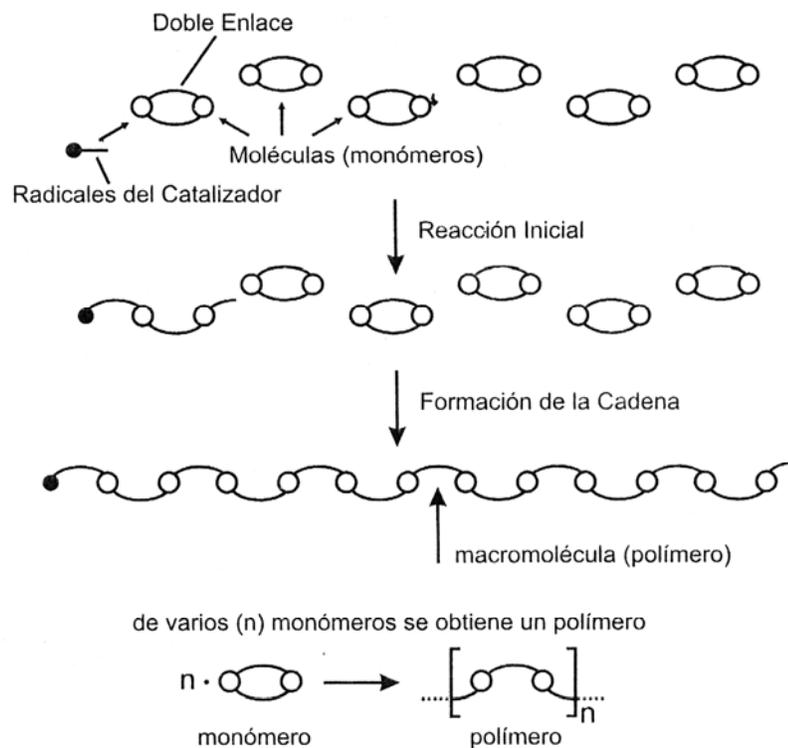


FIGURA 2.3 MODELO DE POLIMERIZACION

La “n” luego del paréntesis recto indica el número de monómeros incluidos en la cadena molecular y se lo denomina grado de polimerización.

Los materiales macromoleculares tienen un grado de polimerización siempre mayor a 1000.

Los polímeros que constan de un único tipo de monómero se denominan homopolímeros. Los que están formados por más de un tipo de monómeros reciben el nombre de copolímeros.

En el diagrama aparecen diversas estructuras de polímeros.

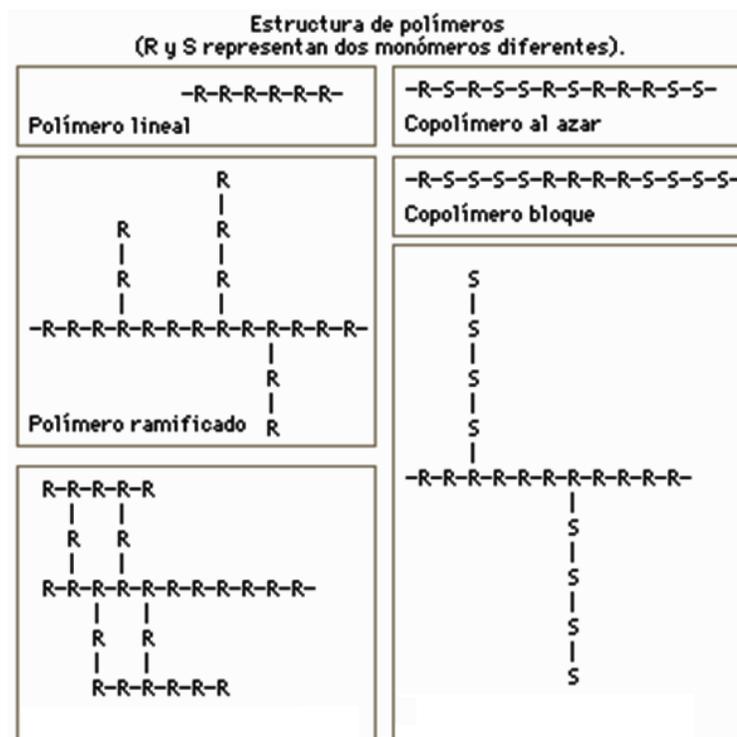


FIGURA 2.4 ESTRUCTURA DE POLIMEROS

2.1.3 Fuerzas de Unión

Los tipos de enlaces se dividen en: enlaces químicos (valencias principales) de la composición de las cadenas macromoleculares y las fuerzas de valencias secundarias, también conocidas como fuerzas intermoleculares.

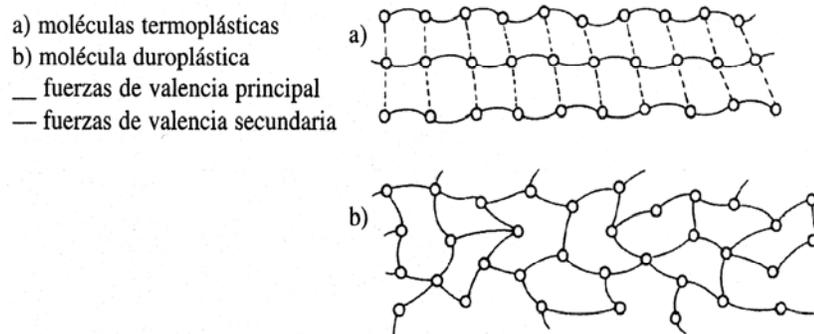


FIGURA 2.5 MOLECULAS DE POLIMEROS

Las fuerzas de valencia secundaria actúan entre las cadenas moleculares de los termoplásticos y las mantienen unidas entre sí. Son notoriamente más débiles que las fuerzas de las valencias principales y resultan de las fuerzas de atracción electrostáticas cuyo origen se debe buscar en la naturaleza de la estructura atómica.

Se distingue entre las siguientes fuerzas de valencias secundarias:

- Fuerzas de dispersión

- Fuerzas dipolares
- Fuerzas de inducción
- Fuerzas de puentes de hidrógeno

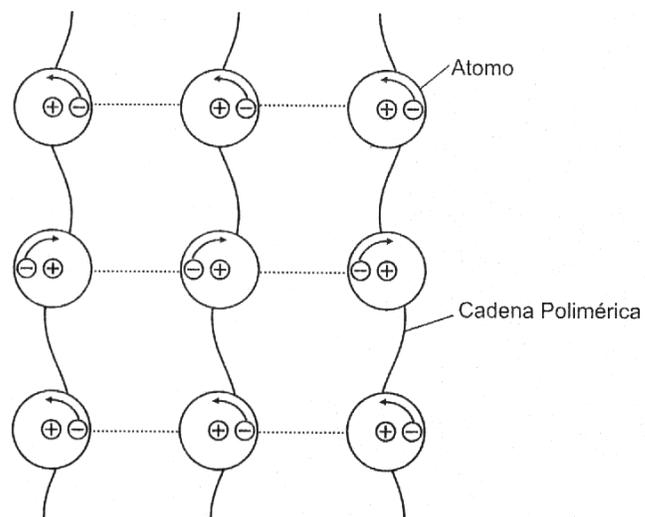


FIGURA 2.6 FUERZAS DE DISPERSION

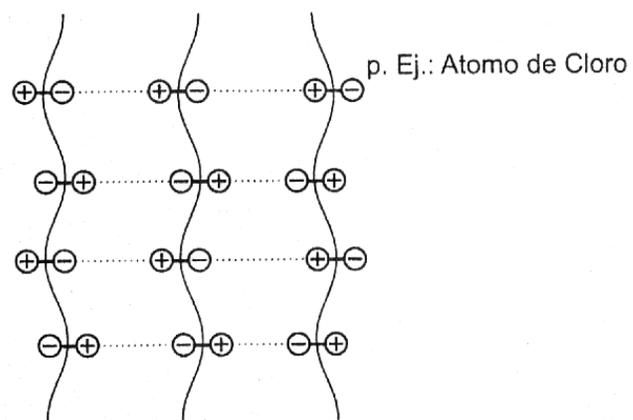


FIGURA 2.7 FUERZAS DIPOLARES

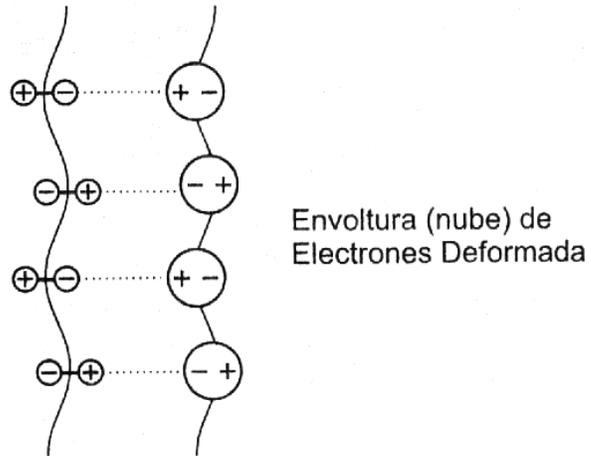


FIGURA 2.8 FUERZAS DE INDUCCION

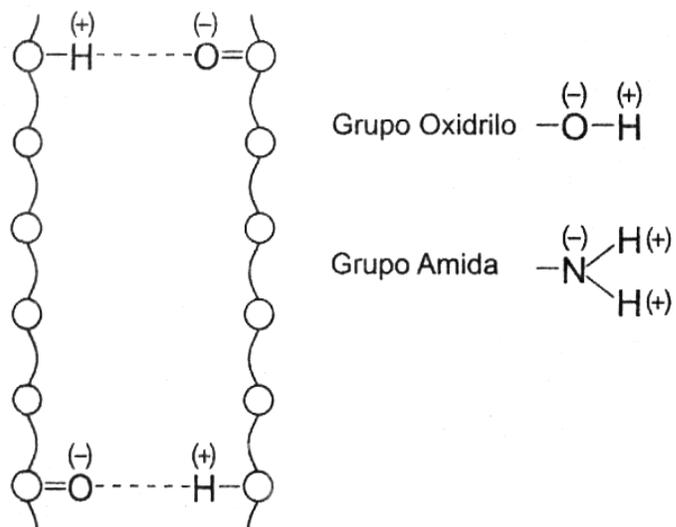


FIGURA 2.9 FUERZAS DE PUENTE DE HIDROGENO

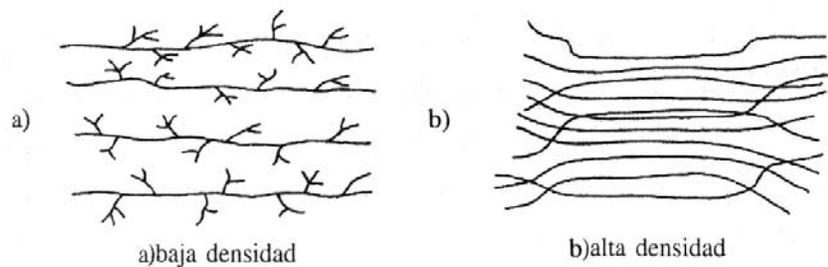


FIGURA 2.10 MOLECULA DE POLIETILENO

En el ejemplo de los polietilenos de baja y alta densidad, se pueden apreciar los diferentes efectos de las fuerzas de valencias secundarias. El polietileno de baja densidad muestra principalmente cadenas moleculares ramificadas, mientras que el polietileno de alta densidad, por el contrario, se distingue por una estructura lineal de sus cadenas moleculares, como se aprecia en la Fig.2.10.

La separación entre las cadenas es mayor en las cadenas ramificadas, con lo cual el efecto de las fuerzas de valencias secundarias es menor. Como consecuencia de esto presenta propiedades de resistencia, rigidez, capacidad de difusión de gases y resistencia al calor, disímiles a las de un polímero de cadena lineal.

2.1.4 Termoplásticos Semicristalinos

Las macromoléculas que presentan una estructura química y también geometría regular, pueden formar cristales en determinadas zonas. Se entienden como cristales, a agolpamientos paralelos en ciertas partes de la macromolécula o pliegues de la cadena (p. ej. esferolitos). Los termoplásticos que presentan esta estructura se denominan polímeros

semicristalinos. Una misma cadena puede pasar parcialmente por zonas amorfas y cristalinas, a veces puede pertenecer a varios cristales simultáneamente.

Los termoplásticos semicristalinos poseen una tonalidad blancuzca. Esto es a causa de una interrupción del pasaje de la luz, debida a un ordenamiento denso de las moléculas en los cristales.

Ejemplos de termoplásticos semicristalinos son: PE, PP, POM, PTFE, PET, PBT, y otros más.

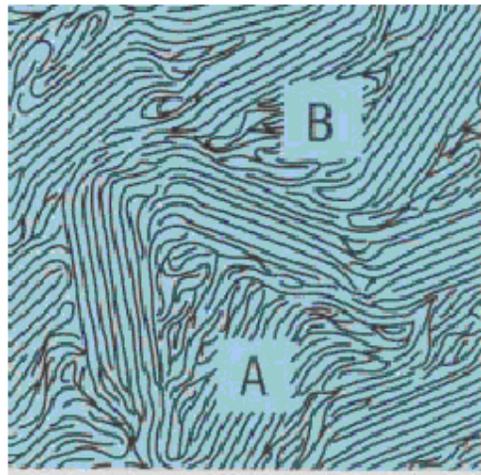


FIGURA 2.11 REGIONES CRISTALINA (A) Y AMORFA (B) EN POLIOLEFINAS

Por lo tanto, ningún polímero es completamente cristalino. La cristalinidad hace que los materiales sean resistentes, pero

también quebradizos. Un polímero totalmente cristalino sería demasiado quebradizo como para ser empleado como plástico. Las regiones amorfas le confieren tenacidad a un polímero, es decir, la habilidad de poder plegarse sin romperse.

2.1.5 Aditivos y Sustancias Auxiliares

Los plásticos no pueden ser procesados tal como salen de las reacciones de formación. Recién con el mezclado de aditivos y sustancias auxiliares, se obtiene una masa plástica pronta para el procesamiento. Muchos plásticos ya vienen provistos, por el fabricante, de los más importantes aditivos, de forma tal que el procesador los puede utilizar directamente. He aquí una breve descripción de los más utilizados:

Plastificantes

Las moléculas del plastificante, incrustadas entre las cadenas moleculares, reducen las fuerzas de las valencias secundarias de la rígida estructura molecular

Estabilizadores

Se utilizan para proteger a los plásticos de la influencia del calor, rayos UV, oxígeno del aire y humedad, lo cuales dañan

los polímeros de tal forma que, se produce una descomposición de las cadenas, con lo cual se perjudican notoriamente las propiedades mecánicas. Los grupos más importantes de estabilizadores son:

- Compuestos de plomo
- Jabones metálicos
- Compuestos orgánicos del estaño
- Compuestos orgánicos de nitrógeno
- Fosfitos orgánicos
- Compuestos epoxídicos
- Antioxidantes
- Protectores UV

Lubricantes

Sirven para atenuar las fricciones internas y externas de la masa fundida de plástico

Colorantes

Son sustancias solubles o insolubles que dan color, los que se pueden agregar para el coloreado de los plásticos

En el caso de los colorantes solubles, se habla de tintas y en el de los no solubles, de pigmentos, los cuales se dividen en pigmentos orgánicos e inorgánicos. Ej. pigmentos inorgánicos:

- Blanco blanco de titanio, blanco de cinc
- Amarillo amarillo cromo, amarillo níquel-titanio
- Rojo rojo molibdato, oxido de hierro rojo
- Azul azul ultramarino, azul cobalto
- Verde verde cromo, verde cobalto
- Marrón oxido de hierro marrón
- Negro negro humo, oxido de hierro negro

La cantidad de pigmentos orgánicos utilizados es grande, ya que se trata de compuestos orgánicos complicados y una gran cantidad de denominaciones comerciales puede ser referida a una descripción del pigmento por medio del "Colour-Index". Ej: Pigmento azul 15 = ftalocianina de cobre

Cargas o materiales reforzantes

Por cargas o materiales reforzantes se entienden a los agregados sólidos que influyen de variadas formas en las propiedades del plástico.

Las cargas no sirven únicamente para abaratar y "estirar" los plásticos por medio del aumento de su peso y volumen, sino que con ellas se pueden lograr mejoras deseadas de ciertas propiedades. En general también se mejoran tanto la resistencia a la deformación térmica como la contracción. Ej: carbonato de calcio, dolomita, caolín, talco, harina de cuarzo, mica.

Antiestáticos

Los antiestáticos disminuyen la resistencia eléctrica superficial de los plásticos, descargan rápidamente la electricidad estática. Los antiestáticos son compuestos químicos que migran hacia la superficie de los plásticos y absorben humedad del aire. La película de agua formada evita carga de electricidad estática.

Espumantes

Para la fabricación de plásticos espumados se deben agregar agentes espumantes, ya sea durante la fabricación del plástico o durante el proceso de moldeado.

Aditivos retardadores de llama

En razón de su composición química, los plásticos son en mayor o menor grado combustibles. En la construcción y la fabricación de automóviles y otra amplia gama de aplicaciones, se exigen, a menudo obligatoriamente, plásticos provistos de protección contra el fuego, a través del uso de determinadas sustancias se lograrán las siguientes formas de acción:

- Aislamiento del oxígeno del foco ígneo
- Influencia en la descomposición del plástico
- Influencia del mecanismo de combustión

Peróxidos orgánicos

Este tipo de sustancias se usa para reticular cadenas moleculares lineales, actúa también como dispersante. Un peróxido usado comúnmente es el peróxido de benzoilo (BP), que se comercializa como una pasta al 50% .

Aceleradores

Se utilizan para acelerar el proceso de una reacción química, por ejemplo la descomposición de un peróxido orgánico a temperaturas relativamente bajas, para que pueda desarrollarse el proceso de reticulación.

Inhibidores

Estas sustancias evitan, o retrasan una reacción química. Se las utiliza, p. ej., para aumentar el tiempo de "vida útil" de resinas endurecibles (resinas poliéster) bloqueando una reacción de reticulación anticipada.

2.2 Introducción a los Empaques Plásticos

El hombre tiene muchos competidores en la utilización de los alimentos que él produce, tales como: animales (ratas, insectos y microorganismos), que causan pérdidas en varios estadios de producción: cultivo, cosecha, procesamiento, almacenamiento, transporte y venta de los alimentos. Si un microorganismo es permitido crecer en el alimento, se inicia los procesos de deterioro, tales como putrefacción, fermentación o crecimiento de mohos. Los cuales, principalmente las bacterias y hongos, pueden afectar los alimentos y dejar sus toxinas u otras sustancias indeseables, causando enfermedades y hasta la muerte. En ese caso el empaque o envase previene del deterioro, asegurando así el consumo del producto.

En las sociedades modernas, la industria de alimentos es un gran usuario de empaques. Si nosotros tratamos de sacar un balance de la

forma en la cual la tecnología del empaque se ha introducido en el mundo moderno, es evidente que el empaque pesa grandemente en forma positiva, verificándose avances en la higiene y almacenamiento de los alimentos, aparte de eso el empaque ha servido y servirá para reducir las pérdidas y hacer un eficiente negocio.

2.2.1 Funciones del Empaque

Contener, un envase no permite que el producto se pierda, por permeabilidad, o por vía de salida del mismo, aísla al producto del medio donde se encuentra y facilita su transporte.

Proteger, protege al producto alimenticio de la contaminación evitando el daño o degradación permitiendo así que se encuentre en buenas condiciones físicas, químicas y organolépticas por un tiempo determinado.

Estas dos funciones están orientadas o forman parte de otra que es suministrar al consumidor un alimento de igual calidad a la de los productos frescos o recién preparados.

Comunicar, identificar el contenido tanto en cantidad, como en un tipo e instruye al consumidor cómo debe preparar el producto en el caso de que su uso no sea inmediato.

Diferenciar, identifica al fabricante, su marca y calidad. Se aprecia por los beneficios en el mercadeo; todos sus similares tienen una forma parecida, sin embargo los consumidores y lo induce a la compra. Actualmente han tomado mayor importancia estas dos funciones por la tendencia actual a la distribución por autoservicios; que hace que el producto se venda por sí mismo.



FIGURA 2.12 EMPAQUES PLASTICOS

2.2.2 El Producto

La pregunta que debemos hacernos será, cómo el producto puede ser deteriorado o dañado?, para responder a esta pregunta será necesario tomar las siguientes consideraciones:

- Naturaleza del producto, el material del cual está compuesto y la manera en que se puede deteriorar.
- El tamaño y la forma.
- El peso y la densidad.
- Su debilidad o fragilidad; qué parte se quiebra, dobla o mueve, se araña fácilmente, etc.
- Su dureza.
- Efecto de la humedad y la temperatura sobre cambios en el producto, o si el producto absorbe humedad o corroe.
- Compatibilidad, si el producto será afectado por cualquier tipo de material de empaque, qué productos pueden empacarse juntos, con protección si es necesario, y qué productos no deben empacarse juntos bajo ninguna circunstancia.

2.2.3 Características de los Materiales de Empaque

Las envolturas de los productos alimenticios no deben transferir ninguna sustancia extraña, excepto las que sean técnicamente inevitables, que no impliquen daño para la salud. Es decir deben ser inofensivos desde el punto de vista fisiológico o, mejor dicho, en lo que concierne al aspecto sanitario, este requisito lo deben cumplir todos los materiales de envasado.

Pero existen las características específicas de cada material que determinan que ésta pueda ser óptima para un producto y pésimo para otro, también puede cumplir en forma mediana su objetivo es decir aceptable, pero es económico; no es el óptimo pero funciona, es así que consideramos las siguientes características:

- Permeabilidad
 - Permeabilidad a los gases
 - Permeabilidad al vapor de agua
 - Permeabilidad a los aromas
- Condiciones o propiedades mecánicas
- Propiedades térmicas
- Propiedades ópticas

2.3 Deterioro y Alteración de los Alimentos

En todos los problemas de empackado, la primera consideración debe caer con el producto mismo, y el empackado de alimentos no es la excepción. La manera en la cual los alimentos se deterioran debe ser determinada, la influencia del transporte, almacenamiento y condiciones de venta en la velocidad en la cual el deterioro toma lugar serán factores importantes a considerar. El factor causante del

deterioro de muchos alimentos puede ser dividido en deterioro biológico y deterioro abiótico.

2.3.1 Deterioro Biológico

Este es causado por el proceso normal de añejamiento, el cual ocurre en todas las materias vivientes, tal como vegetales, frutas y también por cambios microbiológicos asociado con bacterias, mohos y levaduras. Este proceso de deterioro, puede ser frecuente disminuido o demorado por un adecuado procesamiento o empaçado de estos alimentos y por un adecuado control de temperatura y humedad dentro del almacenamiento.

2.3.1.1 Efectos de los Cambios de Temperatura.

La temperatura de almacenamiento es uno de los factores más importantes. El deterioro biológico de frutas frescas o vegetales por su maduración no puede ser disminuido o retardado solamente por el hecho de ser empaçado el producto; el cual muchas veces juega un rol higiénico, protección de la tierra durante el proceso de manejo y transporte. El empaque debe permitir que el producto respire, haciendo que se elimine el anhídrido

carbónico que se produce y la humedad e incorporar el oxígeno del medio ambiente.

2.3.1.2 Crecimiento Bacteriano.

Las especies de los microorganismos que producen el deterioro de los alimentos está en función de las condiciones del medio ambiente que la rodea, y puede ser grandemente influenciado por el pH y el contenido de humedad del alimento. La velocidad del crecimiento de los microorganismos responsables del deterioro depende de la temperatura de la humedad relativa de la atmósfera y de la composición de la atmósfera, especialmente del contenido de dióxido de carbono.

2.3.2 Deterioro Abiótico

Este es causado por cambios físicos y químicos en el producto, tales como la reacción de proteínas y azúcares (reacción de oscurecimiento), reacción hidrolítica, oxidación de las grasas (produciendo rancidez) y los cambios físicos de hinchamiento, deshidratación, derretido, etc. Algunos de estos deterioros pueden ser prevenidos por el empaçado mismo, previos procesos preservación de los alimentos han sido

adecuadamente llevados para darle la requerida vida de almacenamiento, la temperatura debe ser controlada.

La luz es responsable de la destrucción de algunas vitaminas, particularmente la riboflavina, la vitamina A y la vitamina C. Además puede deteriorar los colores de muchos alimentos.

Los alimentos que tienen sensibilidad a la luz pueden ser fácilmente protegidos contra ella por medio de envases que no permitan su paso.

2.3.3 Rol del Agua en los Alimentos

El agua es el más abundante e individual constituyente por peso en la mayoría de los alimentos y es un constituyente importante aún en aquellos alimentos en los cuales la proporción de agua ha sido reducido deliberadamente durante su manufactura o procesamiento, en razón de cambiar las propiedades o ayudar a su preservación. Este es difícilmente extraído ya que el agua influye en muchos aspectos de la calidad de los alimentos y los alimentos son frecuentemente divididos en tres principales categorías, de acuerdo a la proporción de agua que contiene: alimentos secos, alimentos de contenido de humedad intermedia y alimentos húmedos.

La cantidad de agua presentada en muchos alimentos puede variar sobre un limitado rango sin causar mucha alteración en el producto mismo. Por ejemplo, algunos panes pueden absorber 2% más humedad que el presente cuando ellos están recientemente horneados, y el consumidor no sería capaz de detectar su diferencia. Sin embargo, un descenso de la calidad será detectada por arriba de este nivel. En muchos casos, por tanto, nosotros definimos un contenido de humedad crítico para el producto con un límite superior e inferior dentro del cual el producto es satisfactorio. El principal cambio, los cuales son traídos por la ganancia de humedad (o pérdida) pueden ser resumidos abajo como sigue:

- **Cambios Físicos.** Esto incluye endurecimiento o "craking" el cual es causado por humedecimiento y subsiguiente secado de los pro-cristales; por la pérdida de textura o perdida de "crocantez o crispness" que toma lugar debido a la ganancia de la humedad.

- **Cambios Microbiológicos.** Esencialmente éstos son debido al crecimiento de mohos o bacterias la cual puede

ocurrir si el contenido de humedad del producto alcanza por arriba de un nivel crítico.

- **Cambios Químicos.** Estos sólo ocurren en presencia de humedad y son muy reducidos o lentos en su ausencia, tales como las reacciones entre el azúcar y las proteínas mezcladas juntas en ciertos alimentos a promovida su reacción por enzimas. La temperatura es un factor importante, y generalmente las altas temperaturas acelera las reacciones de este tipo.

2.3.4 Isotherma de Adsorción o Curva de Humedad de Equilibrio

Cuando el contenido de humedad de un alimento es ploteado contra la humedad relativa de equilibrio (HRE) o actividad de agua a temperatura constante, la curva obtenida es la llamada curva de adsorción. Las Isothermas para diferentes alimentos varían en su forma y en el contenido de agua presente a cada humedad relativa de equilibrio.

El contenido de agua de un alimento a una particular humedad es dependiente a los constituyentes de solubilidad en el agua y a la presencia de coloides. Cualquier material soluble en agua

en un alimento reduce la presión de vapor de agua por la disminución de la cantidad de agua libre presente. Alimentos altos en proteínas, almidón u otro material de alto peso molecular tiene relativamente alto contenido de humedad de equilibrio de baja humedad y este no incrementa grandemente a altas humedades.

Por otro lado los alimentos con alto contenido de azúcar tienen bajo contenido de humedad a bajas humedades pero como la humedad incrementa por arriba de un cierto límite los valores del contenido de agua se incrementa rápidamente y continúa incrementando.

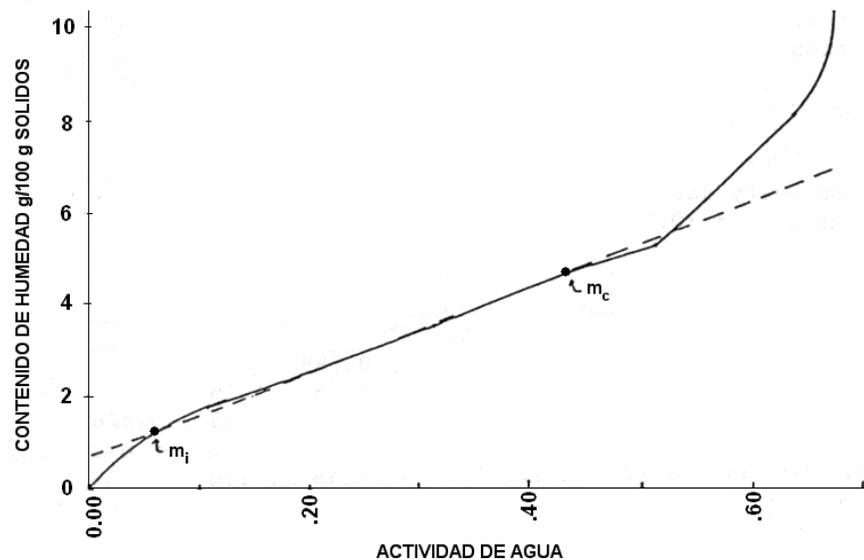


FIGURA 2.13 ISOTERMA DE ADSORCION

Frecuentemente cambios producidos por la humedad toma lugar cuando el contenido de humedad alcanza un nivel crítico. Como ya establecimos, la cantidad de agua presente en muchos alimentos puede variar sobre un limitado rango sin ningún cambio aparente.

El agua en una cantidad dada de aire también variará, pero la capacidad del aire para el vapor de agua es estrictamente limitada. La cantidad que puede mantener variará con la temperatura y el aire se convierte en "saturado" con vapor de agua donde está suficientemente presente para prevenir una presión de vapor del agua saturada a esta temperatura. La proporción de la real cantidad de vapor de agua a la que estaría presente el aire estuviera saturado expresado como un porcentaje, es llamado la humedad relativa.

La actividad de agua (A_w) es directamente proporcional a la presión del vapor de agua; y representa la proporción de la presión del vapor del agua del alimento a la presión del vapor de agua del agua pura bajo las mismas condiciones, expresadas como fracción. Así, un alimento con una A_w de 0,7 tendrá una humedad relativa de equilibrio de 70%.

Mientras que la temperatura y los cambios en el contenido de humedad son de vital importancia que llevan al deterioro del alimento, pero no son los únicos, nosotros podemos notar que el oxígeno, los daños físicos, pérdidas de sabor y el efecto de la luz también pueden causar dificultades.

Cuando un microorganismo se encuentra en un substrato con una actividad de agua menor que la que necesita, su crecimiento se detiene. Esta detención del crecimiento no suele llevar asociada la muerte del microorganismo, sino que éste se mantiene en condiciones de resistencia durante un tiempo más o menos largo. En el caso de las esporas, la fase de resistencia puede ser considerada prácticamente ilimitada.

La gran mayoría de los microorganismos requiere unos valores de actividad e agua muy altos para poder crecer. De hecho, los valores mínimos de actividad para diferentes tipos de microorganismos son, a título orientativo, los siguientes: bacterias $a_w > 0.90$, levaduras $a_w > 0.85$, hongos filamentosos $a_w > 0.80$. como puede verse, los hongos filamentosos son capaces de crecer en substratos con una actividad de agua

mucho menor (mucho más secos) de la que permite el crecimiento de bacterias o de levaduras. A continuación en la tabla 1 puede observar algunos rangos de actividad de agua o “humedades” de algunos alimentos

TABLA 1	
ACTIVIDAD DE AGUA DE ALGUNOS ALIMENTOS	
Rango de Aw	Alimentos
1.00 - 0.95	Frutas, vegetales, carne, pescado, leche
0.95 - 0.91	Queso, jugos de frutas concentrados
0.91 - 0.87	Salami, margarina, cakes
0.87 - 0.80	Leche condensada, yerbas, arroz
0.80 - 0.75	Jamón, mermeladas
0.75 - 0.65	Melazas, caña de azúcar, frutas secas, nuez
0.65 - 0.60	Miel, caramelos, dulces
0.5	Tallarines, espagueti
0.4	Huevos
0.3	Galletas, papas chips, pan grille
0.2	Vegetales secos, corn flakes

CAPÍTULO 3

3. TECNOLOGÍA DE LAS PELÍCULAS MULTICAPA

3.1 Materiales

Debido a que el presente estudio radica en películas multicapa de diversos tipos de polietileno, se mencionará a continuación, toda la información de la diversidad y variedad existente en la familia del PE, profundizando especialmente en los tipos de PE que se utilizarán en el procesamiento y obtención de las películas a analizar.

El polietileno 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. A continuación se ve en la figura 3.1, la familia del polietileno y en **negrilla**, los tipos de PE que utilizamos en la obtención de las películas tricapa del presente estudio:

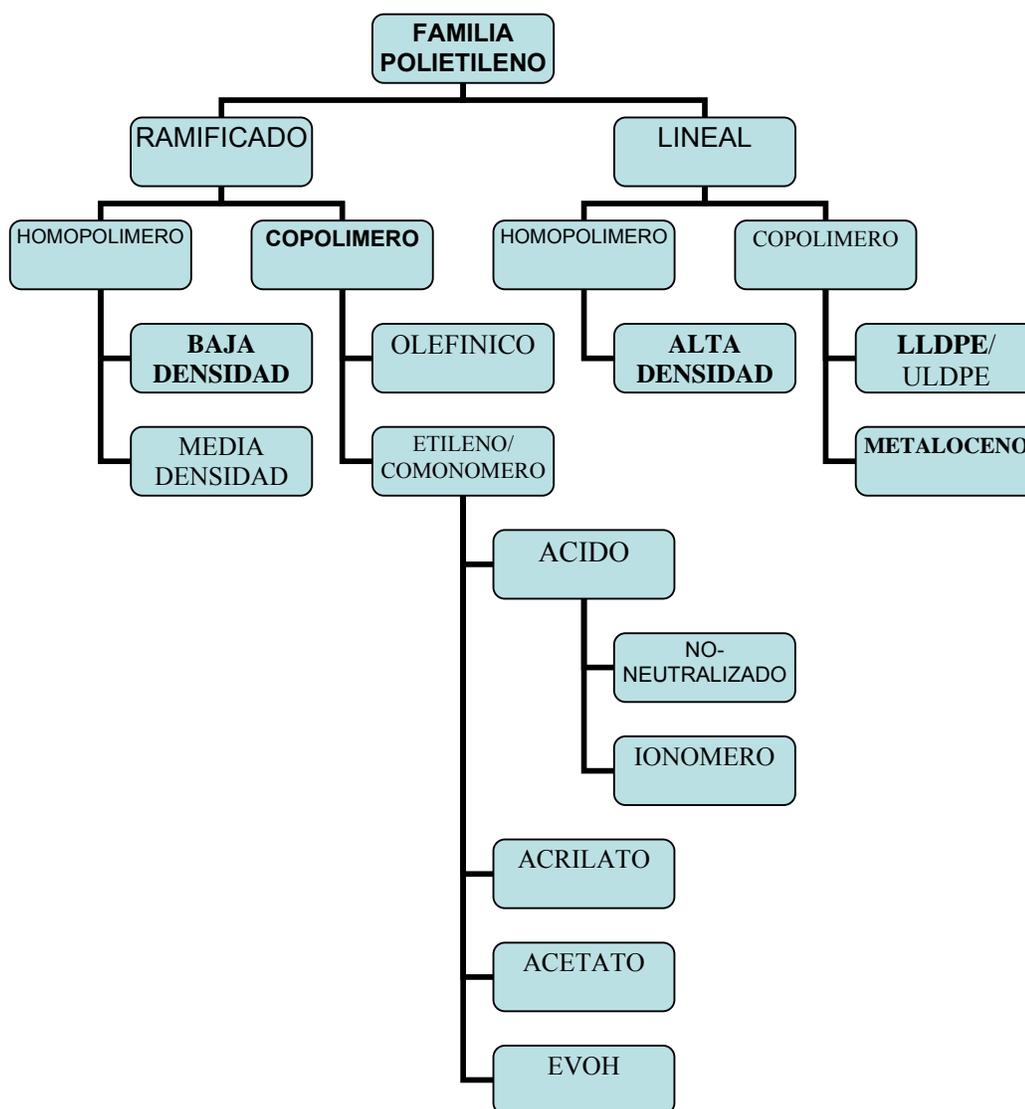


FIGURA 3.1 FAMILIA DEL POLIETILENO

3.1.1 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.

La polimerización del etileno bajo estas condiciones produce un polímero ramificado que es en realidad una mezcla de largas moléculas con columnas vertebrales de diferentes longitudes y cadena ramificadas a los lados.



FIGURA 3.2 MOLECULA RAMIFICADA DE LDPE

La presencia de cadenas ramificadas en la estructura limita la formación de cristales de polietileno introduciendo así irregularidades en la estructura.

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).

Un listado de las propiedades del LDPE, son presentados en la tabla 2:

TABLA 2	
PROPIEDADES DEL LDPE	
Densidad	0.91 a 0.925 g/cm
Tg	-120°C
T _{fusión}	105 - 115°C
Modulo de Tensión	172 - 517 Mpa (24900 - 75000 psi)
Elongación	100 - 965%
Resistencia al rasgado	200 - 300 g/25µm
WVTR	375-500 g µm /m ² d a 37.8°C, 90%HR
	0.95-1.3 g mil/100 in ² d a 95°F, 90%HR
Permeabilidad al O ₂ , 25°C	163000-213000 cm ³ µm / m ² d atm
	400-540 cm ³ mil / 100 in ² d atm
Permeabilidad al CO ₂ , 25°C	750000-1060000 cm ³ µm / m ² d atm
	1900-2700 cm ³ mil / 100 in ² d atm
Absorción del agua	<0.01%

3.1.2 Polietileno de Alta Densidad (HDPE)

El HDPE es un termoplástico no polar lineal, de aspecto blanquinoso, su rango de densidades es entre 0.94 a 0.965g/cm³

con un punto de fusión entre 128-138°C, es uno de los polímeros más versátiles, y el segundo de mayor uso en la industria del empaque plástico.

Las cadenas moleculares de los homopolímeros HDPE son largas y rectas con muy pequeñas ramificaciones., como se aprecia en la figura 3.3:

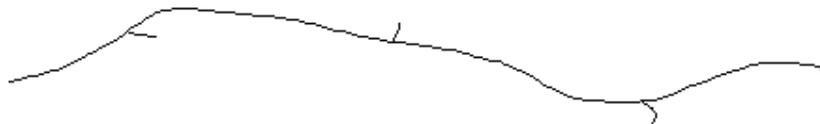


FIGURA 3.3 MOLECULA LINEAL DE HDPE

A medida que el HDPE se enfría por debajo de su punto de fusión, se forma en su estructura una larga fracción de regiones cristalinas ordenadas, en un porcentaje que va del 65 al 90% de cristalinidad y esto contribuye a que tenga una buena propiedad de barrera a la humedad, y volviéndolo opaco; por otro lado, posee una pobre barrera al oxígeno y a compuestos orgánicos, tiene buenas características de maquinabilidad.

En la tabla 3 se resume algunas propiedades del HDPE:

TABLA 3	
PROPIEDADES DEL HDPE	
Densidad	0.94 a 0.965 g/cm
Tg	-120°C
T _{fusión}	128 - 138°C
Modulo de Tensión	620 - 1089 Mpa (89900 - 158000 psi)
Elongación	10 - 1200%
Resistencia al rasgado	20 - 60 g/25µm
WVTR	125 g µm /m ² d a 37.8°C, 90%HR
	0.32 g mil/100 in ² d a 95°F, 90%HR
Permeabilidad al O ₂ , 25°C	40000-73000 cm ³ µm / m ² d atm
	100-185 cm ³ mil / 100 in ² d atm
Permeabilidad al CO ₂ , 25°C	200000-250000 cm ³ µm / m ² d atm
	500-640 cm ³ mil / 100 in ² d atm
Absorción del agua	<0.01%

3.1.3 Polietileno de Baja Densidad Lineal (LLDPE)

Como se pudo apreciar en la figura 3.1, el polietileno lineal puede ser producido como un homopolímero, resultando el

HDPE, o como un copolímero teniendo como comonómero, alquenos tales como:

- Buteno $\text{H}_2\text{C} = \text{CH CH}_2 \text{CH}_3$
- Hexeno $\text{H}_2\text{C} = \text{CH (CH}_2)_3 \text{CH}_3$
- Octeno $\text{H}_2\text{C} = \text{CH (CH}_2)_5 \text{CH}_3$

La presencia de un comonómero en el proceso de polimerización, utilizando una catálisis stereo-específica, resulta en la producción de una cadena polimérica con muy cortas ramificaciones colgantes, este polímero es denominado polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) o polietileno de ultra baja densidad lineal (ULDPE), dependiendo de la densidad alcanzada por la adición del comonómero. Mientras más grande sea la cantidad de comonómero añadido, más baja es la densidad del copolímero, por ejemplo si es utilizado hexeno, los grupos colgantes quedan como se aprecia en la figura 3.4:

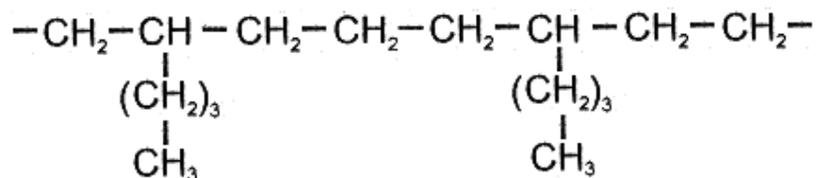


FIGURA 3.4 ESTRUCTURA DE UNA MOLECULA DE LLDPE

Normalmente la cantidad de comonomero tiene un rango entre 1 a 10% de su base molar. Las propiedades físicas del LLDPE son controladas por su peso molecular (MW) y densidad (0.916-0.94 g/cm³). Debido a su incrementada regularidad de su estructura y estrecha distribución molecular, LLDPE mejora las propiedades mecánicas en comparación al LDPE a la misma densidad, y su mayor resistencia, resulta en un incremento de 10-15°C en su punto de fusión comparado al mismo.

El LLDPE posee mayor resistencia a la tensión, mayor resistencia al perforado, rasgado y mayor elongación que el LDPE, sin embargo, el LDPE posee mayor claridad y brillo y mejor propiedades de sellado que el LLDPE. El LLDPE y el LDPE suelen ser mezclados para optimizar los beneficios obtenidos de ambos materiales, con el LLDPE añadiendo resistencia y el LDPE brindando mejor sellado al calor y mayor procesabilidad

Se ha encontrado que para densidades debajo de 0.91 g/cm³ debido a la incorporación de altos niveles de comonomero, el nivel de hexeno extraíble incrementa a un nivel más allá del permitido por la FDA, estos extraíbles pueden también oxidar,

causando una pérdida de olores y sabores. Dichos polietilenos con grandes cantidades de comonómero y consecuentemente densidades por debajo de el rango del LLDPE son denominados polietilenos de muy baja densidad (VLDPE) o polietilenos de ultra baja densidad (ULDPE).

3.1.4 Metallocenos

En los noventas una nueva familia de polietilenos, basada en catálisis de metallocenos, surgió, dicha catálisis ofrece una mejor capacidad de elegir las propiedades del polietileno lineal y otras poliolefinas, particularmente tienen la capacidad darle mayor uniformidad en la incorporación de comonómeros. La catálisis de metalloceno, contiene un solo tipo de ubicación geométrica, suele llamarse catálisis de sitio único como se ve en la figura 3.5:

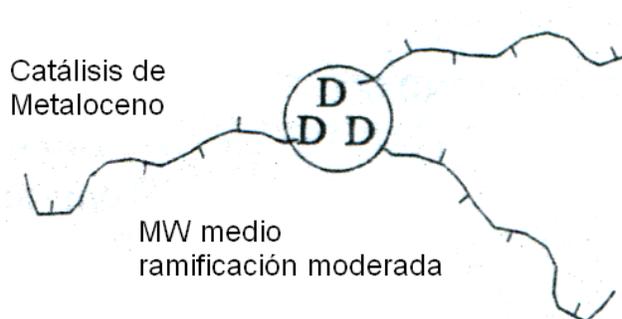


FIGURA 3.5 CATALISIS DE METALOCENO (SITIO UNICO)

Esto produce el copolímero deseado, incorporando monómero en proporción con la cantidad añadida de reactor, esto mejora

las propiedades, el así como el control sobre el MWD, lo cual resulta en una mayor claridad y menos extraíbles, permitiendo un alto nivel de incorporación de comonomero. La resistencia a la tensión y al rasgado son mejoradas también.

El procesado es similar al del LLDPE, una MWD más estrecha de los metalocenos resulta en una alta viscosidad y mayores esfuerzos cortantes, por lo tanto esto exige un mayor requerimiento en la potencia de la extrusora.

Todos estos cuatro tipos de polietileno, que se utilizarán en la elaboración de las películas multicapa se los encuentra e importan en forma de pellets (gránulos sólidos) contenidos en sacos de 25 Kg (55,115 lb), como se puede apreciar en la figura 3.6:



FIGURA 3.6 SACOS DE PELLETS DE LLDPE DE 25 KG.

3.2 Procesamiento de Coextrusión de Películas Multicapa.

3.2.1 Introducción

La coextrusión de películas multicapa toma una importancia trascendental en el mercado del empaque en los últimos años. La razón básica para el impulso de la coextrusión es muy simple: la economía, ya que la coextrusión ofrece al convertidor entre un 20 y un 40% de ahorros en costos de manufactura, comparado con procesos multietapas. La coextrusión es el proceso más avanzado dentro de la transformación de polietilenos, y consiste en la extrusión simultánea de varias capas de polietileno de diferente tipo que, en nuestro caso, van a dar lugar a los filmes multicapa, como se puede apreciar en la figura 3.7:

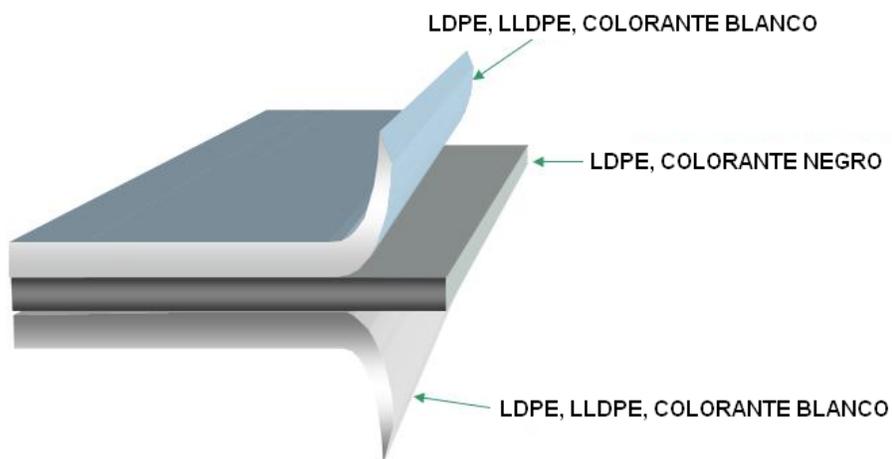


FIGURA 3.7 PELICULA MULTICAPA DE POLIETILENO

Las ventajas que tiene la coextrusión tricapa sobre la monoextrusión (extrusión en una sola capa) son:

- Procesar resinas de menor precio.
- Reducir consumo de resinas de mayor precio.
- Bajar espesores, sin alterar propiedades del film.
- Disminuir consumo de color/aditivo
- Mejorar barreras (H₂O, O₂, gas, aroma)
- Mejorar propiedades mecánicas y de slip
- Mejorar: sellabilidad, flexibilidad, propiedades ópticas
- Menos etapas de conversión (laminación)
- Menor tiempo de proceso

3.2.2 Características del Proceso de Coextrusión

La diferencia fundamental de la coextrusión con la monoextrusión, desde el punto de vista constructivo de la maquinaria, es que se dispone de dos o más extrusoras.

Los componentes básicos de una línea de coextrusión de película son los siguientes:

- Extrusoras

- Cambiador de mallas o filtros
- Dados o cabezales o moldes.
- Anillo de aire de enfriamiento
- IBC(Enfriamiento interno de la Burbuja)
- Estabilizador de burbuja
- Plegador de burbuja (dispositivo para caída de burbuja).
- Conjunto de tiro superior.
- Conjunto de tiro secundario
- Sistema de centrado de la película en las bobinas
- Torre estructural
- Rodillos guidores o locos.
- Sistema de corte
- Tratador superficial (Tratamiento Corona)
- Unidad de embobinado
- Unidad de impresión (Opcional)

Como se puede apreciar en la Figura 3.8, se muestra un dibujo en corte, el mecanismo de funcionamiento de la extrusora, de la tolva (vea a la izquierda) se entrega la resina al tornillo en forma de gránulos. El tornillo empuja el gránulo por el cilindro. Se calienta la resina hasta su punto de fusión y se entrega a través del adaptador.

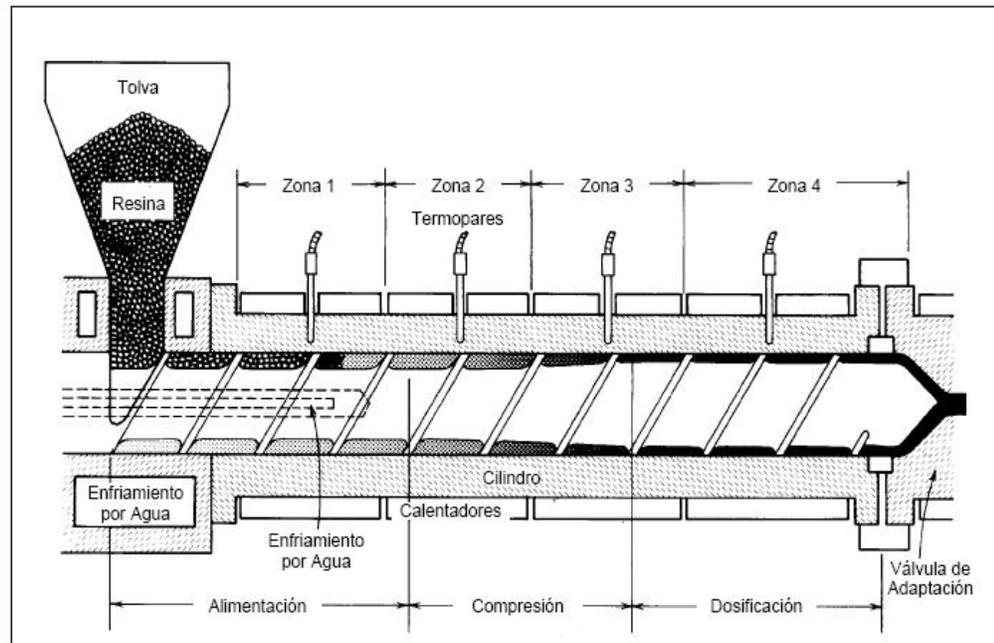


FIGURA 3.8 EXTRUSORA

Dichas extrusoras entregan el polímero a un mismo cabezal, diseñado especialmente para manejar el flujo de cada extrusora y distribuirlos de acuerdo a los requerimientos del empaque.



FIGURA 3.9 CABEZAL PARA COEXTRUSION DE 3 CAPAS

En la figura 3.9 se pudo apreciar un cabezal exteriormente y en la Figura 3.10 se muestra el esquema internamente del sistema de tres extrusoras, conectadas a un cabezal que distribuye cada flujo formando una capa en la estructura de la película, lo que equivaldría a tener un sistema de tres extrusoras y de tres capas.

Las posibilidades de formación de múltiples estructuras se encuentra limitado, básicamente, por el diseño del cabezal.

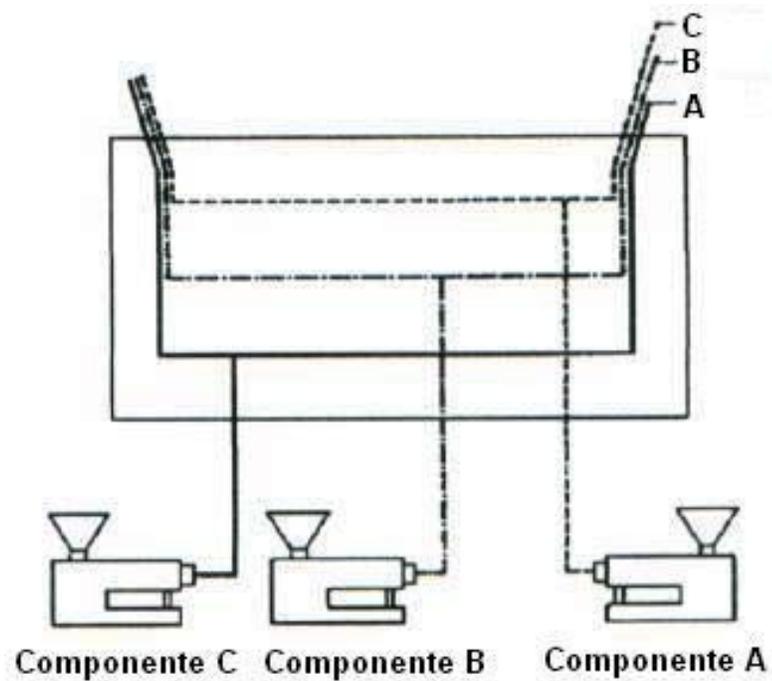


FIGURA 3.10 DISTRIBUCION DEL FLUJO EN EL CABEZAL

Como se puede apreciar en la figura 3.11, el fundido sale del cabezal o dado circular y se forma lo que parece un foco de luz elongado que es en realidad, un tubo inflado de película de plástico. Al subir, el aire frío enfría el fundido para solidificarlo, y en la parte superior, el marco plegador colapsa el tubo. El aire atrapado dentro del tubo determina cuanto de ancho expandirá el tubo a medida que el plástico sale del dado.

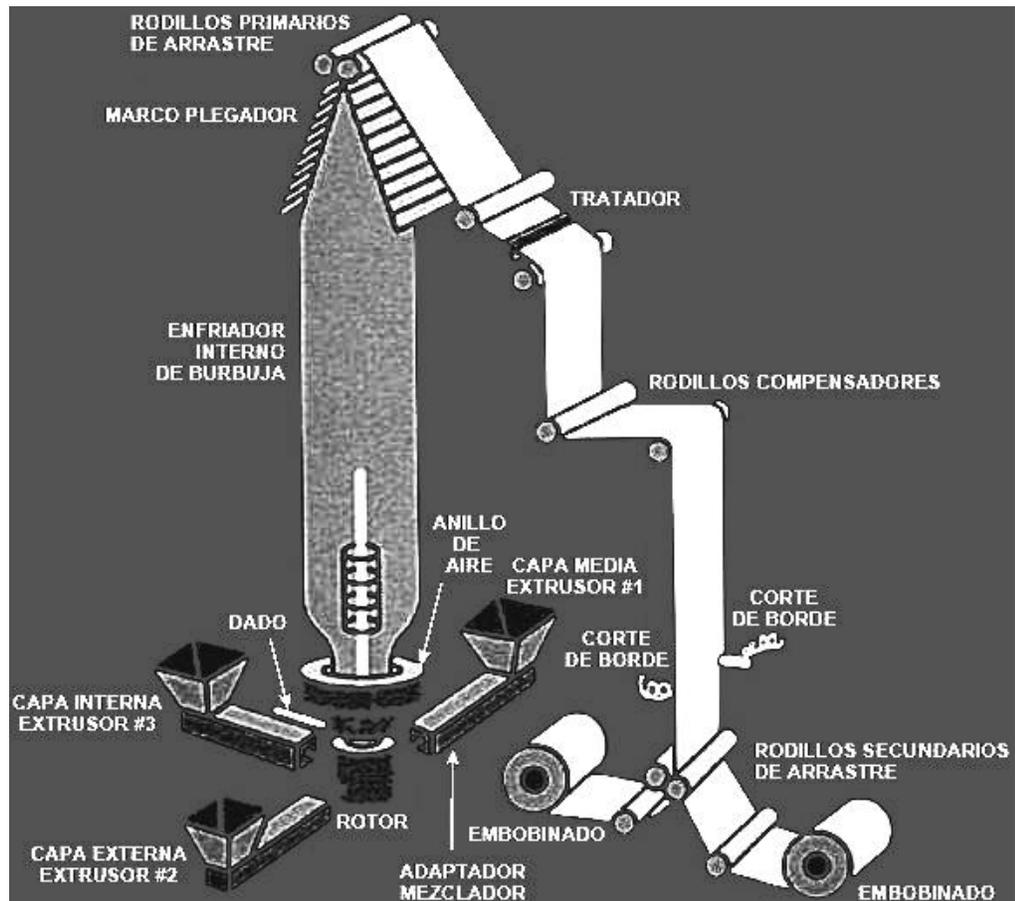


FIGURA 3.11 COEXTRUSION POR SOPLADO

La resina plástica usada en un extrusor por soplado debe tener suficiente viscosidad como para mantener su forma hasta que se solidifique en la película deseada.

El aire frío que solidifica la película viene del anillo de aire que rodea el dado. Los más costosos extrusores por soplado también tienen un sistema de enfriamiento interno de burbuja (IBC).



FIGURA 3.12 RODILLOS ESTABILIZADORES DE BURBUJA

Estos sistemas recirculan el aire atrapado dentro de la burbuja para extraer el calor. Esto permite al transformador enfriar la película más rápidamente y producir a velocidades más altas.

También produce una película más clara, aunque no tan clara como las películas producidas en el sistema de dado plano.

El sistema en su totalidad debe tener la altura suficiente para enfriar el material antes de su manejo en los rodillos principales de arrastre. En algunos casos, esta torre es de tres pisos de altura, como se puede apreciar en la figura 3.13:



FIGURA 3.13 TORRE DE 3 PISOS PARA COEXTRUSION

Si la película todavía está muy caliente, se pegará a sí misma.

Sin embargo, todavía tiene que estar algo caliente. Debe estar

suficientemente blanda y flexible para que no se arrugue al pasar por el marco plegador. Muchos sistemas nuevos tienen torres de altura regulable. Al subir o bajar la torre, el transformador puede fijar la altura y temperatura apropiadas para evitar arrugas. En la sección de Figura 3.11 donde se ve el corte de borde, la máquina corta los bordes y separa el tubo en dos rollos. El transformador también puede escoger cortar solamente uno de los bordes. Así el tubo puede ser abierto para formar una lámina con el doble del ancho.

Después del corte definitivo se prepara la película para una posterior impresión o flexografía, sin este tratamiento no se podría imprimir en la película y se chorrearía la tinta, como se puede apreciar en la figura 3.14:



FIGURA 3.14 IMPRESIÓN SIN TRATAMIENTO CORONA

Dicho tratamiento superficial, es el “Tratamiento Corona”, el cual se parece al acto de bombardear la superficie de la película con un rayo eléctrico regulado. La película pasa sobre un rodillo conectado a tierra. Encima hay un electrodo cargado que descarga electricidad a través de la película; esto refuerza la adhesión; limpia, oxida y activa la superficie, dejándola lista para la impresión.



FIGURA 3.15 UNIDAD DE EMOBINADO

Luego, la película llega a la unidad de embobinado (figura 3.15), donde se embobina el rollo con sus dimensiones finales.

Luego el rollo se lo almacena y/o traslada para colocarlo posteriormente en el proceso de impresión en la impresora flexográfica (Figura 3.16):

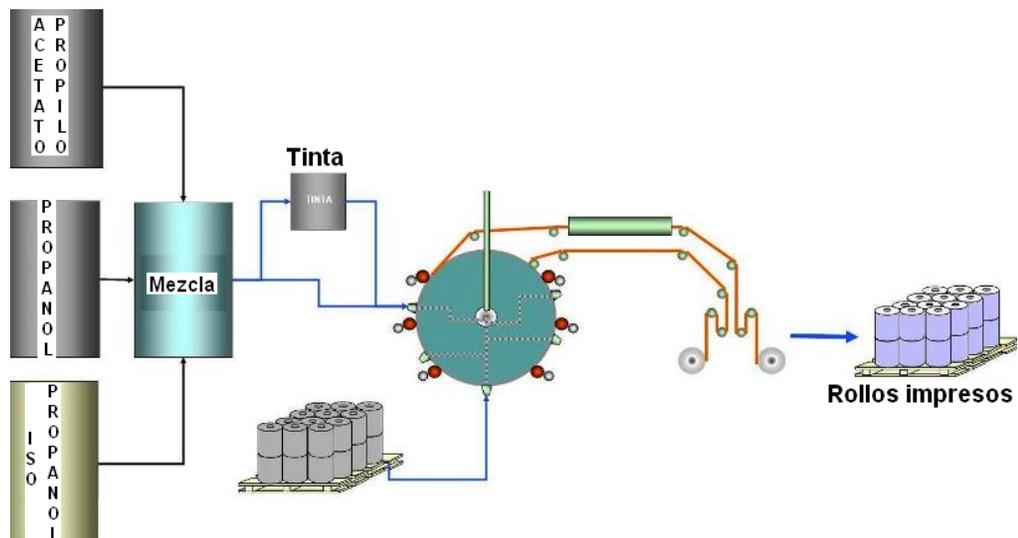


FIGURA 3.16 IMPRESIÓN FLEXOGRAFICA

3.2.3 Parámetros Importantes en el Diseño del Proceso

MD (Machine Direction)

Es la Dirección Máquina, es decir la dirección que sigue película cuando es halada del cabezal a los rodillos superiores.

TD (Transverse Direction)

Es la Dirección Transversal a la dirección de la máquina, es decir la dirección transversal a la dirección de la burbuja.

Output o Salida (m)

Es la capacidad de producción de la línea en Kg/hr

BUR (Blow Up Ratio)

Es la relación de soplado, es decir la relación del diámetro final de la burbuja con el diámetro del cabezal o dado:

$$\text{BUR} = \frac{\text{Diámetro de la Burbuja (D}_b\text{)}}{\text{Diámetro del Dado (D}_d\text{)}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Lay Flat

Es el ancho tubular, o longitud circunferencial de la burbuja una vez cortada y formada la película plana, y se relaciona con el diámetro de la burbuja y con el BUR de la siguiente manera:

$$\text{Lay Flat} = \frac{\text{Diámetro de la burbuja (D}_b\text{)}}{0.637} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$\text{BUR} = \frac{\text{Lay Flat} \times 0.637}{D_d} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Die Gap

También conocido como Gap, es la abertura del cabezal en mm, donde la película adquiere el espesor inicial e_i , justo después de salir del dado.

DDR (Draw Down Ratio)

Es la relación de halado, es decir la velocidad tangencial de los rodillos superiores (V_h) dividido para la velocidad lineal de salida del polímero del dado o cabezal (V_d)

$$\text{DDR} = \frac{V_h}{V_d} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Una ecuación muy utilizada, que utiliza e interrelaciona varios parámetros para encontrar directamente el valor de DDR es:

$$\text{DDR} = \frac{V_h}{V_d} = \frac{\left(1 - \frac{\text{Gap}}{D_d}\right) \times \text{Gap} \times \rho_{\text{melt}}}{\left(\text{BUR} - \frac{e_f}{D_d}\right) \times e_f \times \rho_{\text{pel}}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

DDR	Es la relación de halado
Gap	Es la abertura del cabezal (mm)
D_d	Es el diámetro del cabezal (mm)
e_f	Es el espesor final de la película (mm)
ρ_{melt}	Es la densidad de la masa fundida (g/cm^3)
ρ_{pel}	Es la densidad de la película (g/cm^3)
BUR	Es la relación de soplado

Una buena aproximación puede ser utilizada en el cálculo partiendo de la suposición de que la densidad del fundido y de la película son iguales.

Para un cálculo un poco más exacto se puede emplear la densidad real con la temperatura que se obtiene mediante la siguiente tabla 4:

TABLA 4							
DENSIDAD DEL POLIETILENO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA							
		Coeficientes en la representación polinomial					
PE	Temp °C	A	B	C	D	E	F
HD	10-133	1.033	17.87×10^{-4}	-7.19×10^{-5}	16.11×10^{-7}	-15.45×10^{-9}	5.58×10^{-11}
	133-200	1.158					
LD	10-113.5	1.078	17.87×10^{-4}	-7.19×10^{-5}	16.11×10^{-7}	-15.45×10^{-9}	
	113.5-200	1.158					

Las ecuaciones son de la forma $A+BT+CT+DT+..$ donde T es en grados centígrados

Un esquema de la burbuja y varios de sus parámetros puede ser apreciado en la figura 3.17:

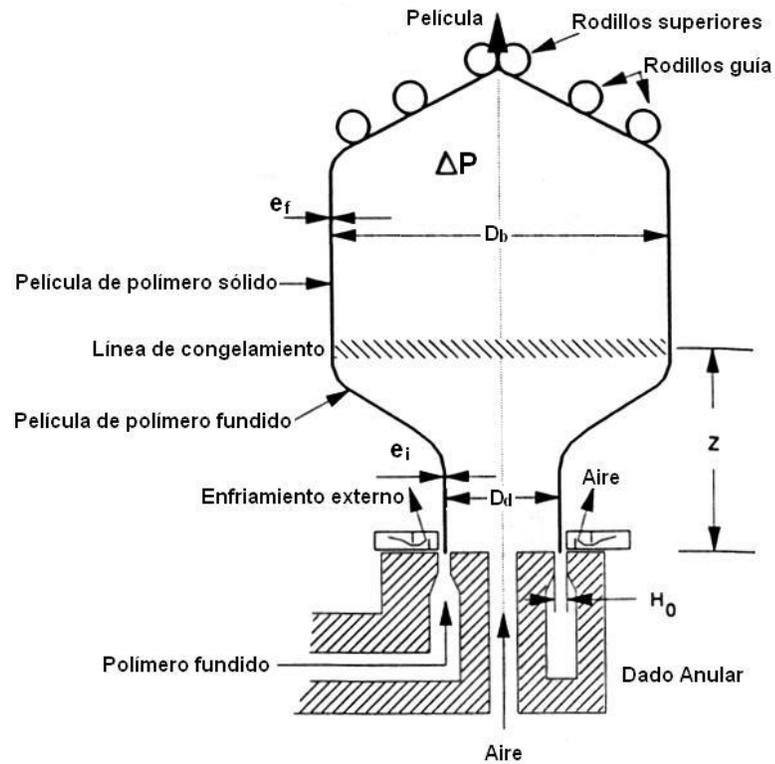


FIGURA 3.17 PARAMETROS DE LA BURBUJA

Sobrepresión Interna (ΔP) y Tensión Axial de la Burbuja (T_z)

Sobrepresión Interna es la diferencia entre la presión interna y externa de la burbuja, y la Tensión Axial es la fuerza con la que los rodillos superiores deben halar a la burbuja, estos dos parámetros sirven para mantener estables las dimensiones de la misma a lo largo del proceso. Para el cálculo de estos valores se utilizan las siguientes ecuaciones y figuras:

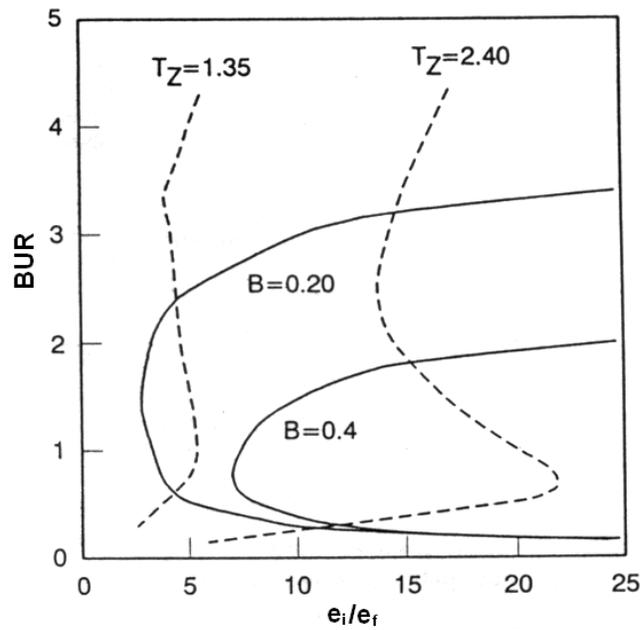
$$\Delta P = \frac{\mu m B}{\rho \pi \left(\frac{D_d}{2} \right)^3} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$F_z = \frac{\mu m T_z}{\rho \left(\frac{D_d}{2} \right)} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

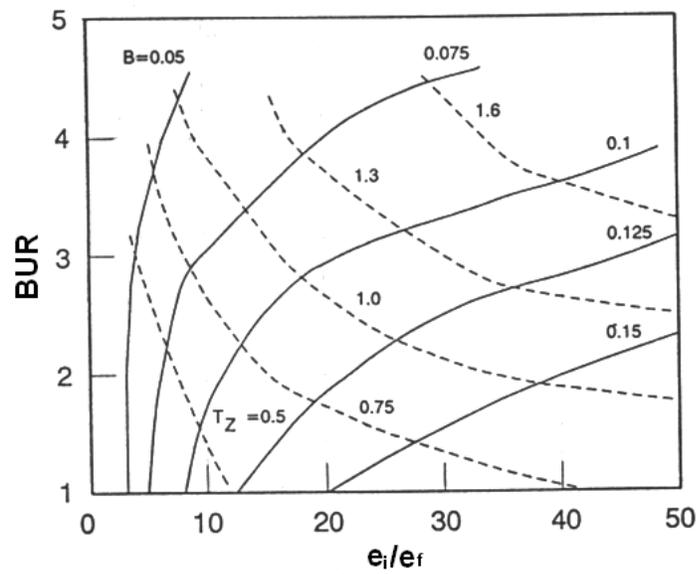
$$X = \frac{Z}{\left(\frac{D_d}{2} \right)} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde:

μ	Viscosidad (Pa.s)
m	Salida (g/s)
B	Parámetro adimensional (Figura 3.18 y 3.19)
ρ	Densidad del flujo de masa (g/cm ³)
D_d	Diámetro del dado (cm)
T_z	Parámetro adimensional (Figura 3.18 y 3.19)
Z	Altura de la línea de congelamiento (cm)
X	Parámetro adimensional para selección de Figura 3.18 o 3.19



**FIGURA 3.18 CURVAS ISOPARAMETRICAS BUR vs
RELACION DE ESPESOR, PARA X=20**



**FIGURA 3.19 CURVAS ISOPARAMETRICAS BUR vs
RELACION DE ESPESOR, PARA X=5**

IBC (Internal Bubble Cooling)

El IBC es el sistema de enfriamiento interno de la burbuja, duplica el área de enfriamiento y le brinda estabilidad a la misma, de esta forma se puede lograr aumentar la velocidad de halado de los rodillos superiores (figura 3.20 – 3.21) y así se provee una mayor capacidad de producción de la línea.

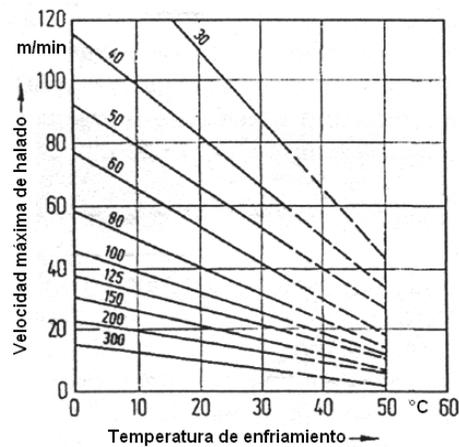


FIGURA 3.20 VELOCIDAD DE HALADO SIN IBC

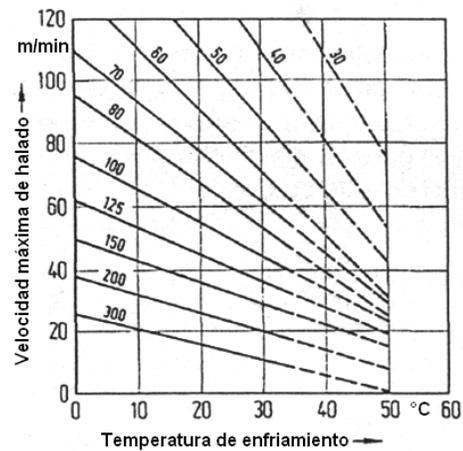


FIGURA 3.21 VELOCIDAD DE HALADO CON IBC

Para conocer si el sistema requiere IBC, se divide la producción de la línea (Kg/h), para la longitud circunferencial del cabezal (C_C), donde $C_C = \pi \cdot D_d$, (D_d es el diámetro del cabezal) en cm, siendo este resultado la velocidad específica de enfriamiento (V_E), entonces tenemos que para valores de:

$$V_E \leq 2.5 \frac{\text{Kg}}{\text{h cm}} \Rightarrow \text{no necesita IBC}$$

$$2.6 \frac{\text{Kg}}{\text{h cm}} \leq V_E \leq 4.8 \frac{\text{Kg}}{\text{h cm}} \Rightarrow \text{si necesita IBC}$$

Selección de Coextrusora

Para seleccionar la coextrusora o sistema de extrusoras conjuntas, se debe conocer o estimar la producción requerida de la línea \dot{m} y saber cual es el espesor y composición en peso de cada una de las capas previamente calculado en el diseño de empaques de la estructura multicapa, %A, %B, %C, etc.

Se calcula la producción de cada extrusora multiplicando la producción de la línea por su respectivo porcentaje en peso de capa, p ej: $\dot{m}_A = \dot{m} \times (\%A) \div \eta_{ef}$, y η_{ef} es el factor de eficiencia, se debe verificar que este valor se encuentre en el rango de entre el 30% y el 70% de la máxima capacidad nominal de la extrusora, para obtener el máximo rendimiento energético de la

misma. Para HDPE el valor de m es el mismo, para LDPE se lo multiplica por un factor de 1.25, para poder utilizar la gráfica de selección de extrusoras de HDPE.

Para las poliolefinas, las velocidades tangenciales del husillo entre 0.5 m/s y 1.2 m/s aseguran una adecuada homogeneización y aleja la posibilidad que el polímero se degrade, dicha velocidad tangencial del husillo esta determinada por la ecuación 3.9:

$$V_t = \frac{\pi \times D \times N \times \cos \phi}{60} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde D es el diámetro de la extrusora en metros, N la velocidad angular del husillo en r.p.m y ϕ es el ángulo de la hélice del husillo.

La selección de la extrusora se lo realiza suponiendo un diámetro de la extrusora en mm y se lo ubica en el eje horizontal de la figura 3.22, dependiendo del tipo de extrusora se busca la intersección con la recta correspondiente, en el eje vertical y se obtiene el correspondiente valor de m/N que se utiliza en la siguiente ecuación:

$$N = \frac{m}{(m/N)} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Y se chequea la velocidad tangencial de manera que se encuentre entre los límites establecidos, el procedimiento se repite hasta que la velocidad se ajuste dentro de dicho rango.

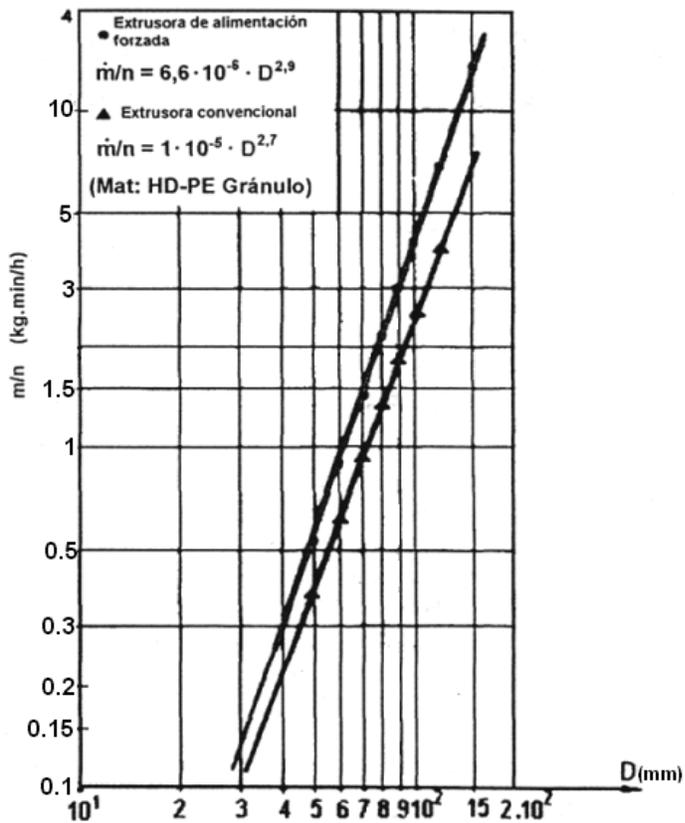


FIGURA 3.22 FLUJO MASICO DE EXTRUSORAS

3.3 Propiedades y Ensayos de las Películas Multicapa

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

3.3.1 Tracción y Elongación (ASTM D-882)

La resistencia a la tracción es, literalmente, la cantidad de fuerza requerida para la ruptura completa de un material. Para películas, las unidades normales de medida son las libras por pulgada cuadrada del área original transversal.

La elongación es la cantidad de estiramiento que el material puede soportar antes de romperse. La máquina de prueba consiste en mordazas para sujetar la muestra, algún modo de aumentar la tensión hasta el punto de ruptura de las muestras, e indicadores de la tensión y la cantidad de elongación. Mucha elongación es un índice de resistencia, puesto que indica que el material absorberá una gran cantidad de energía antes de romperse.

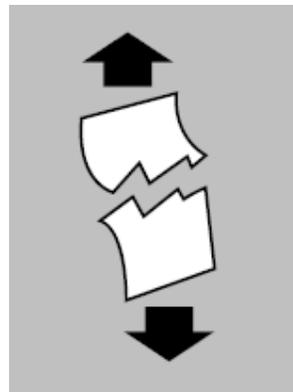


FIGURA 3.23 TRACCIÓN Y ELONGACION DE PELICULAS

3.3.2 Resistencia al Impacto (ASTM D-3420)

La prueba del péndulo al impacto puede ser empleada para medir la resistencia al impacto de cuerpos plásticos. Un cabezal de impacto al final del péndulo gira en un arco a través de la muestra. El examinador mide la diferencia entre la energía potencial del péndulo a su altura máxima de giro libre y la energía potencial del péndulo después de la ruptura de la muestra. Esta diferencia en energía se define como resistencia al impacto y se mide en kiloscintímetros, y nos sirve para predecir la resistencia de un material a la ruptura debido a caídas u otros golpes súbitos.

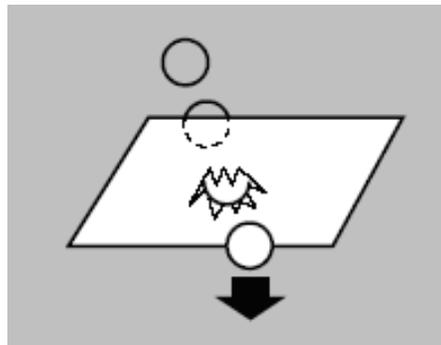


FIGURA 3.24 RESISTENCIA AL DARDO

La prueba utilizada para películas plásticas es la prueba de impacto al dardo (ASTM D-1709). Un dardo se deja caer de una altura fija sobre la muestra bien estirada. La importancia y

propósito de esta prueba son iguales a los de la prueba del péndulo. La unidad del dardo es el peso del dardo en gramos que llega a romper la muestra 50% del tiempo.

Estas pruebas dan un índice de la fuerza dinámica del material y una aproximación a lo que ocurre al dejar caer un paquete cuya bolsa está hecha de este material.

3.3.3 Resistencia al Rasgamiento/Ruptura (ASTM D-1922)

La resistencia a rasgar/romper indica la fuerza necesaria para llegar a la ruptura de una muestra después de hacerle una muesca inicial. La resistencia a rasgar/romper se mide en gramos.

El probador consiste en una mordaza fija y una mordaza movible en un péndulo, algún modo de mantener elevado este péndulo y luego soltarlo de súbito, y una escala para medir el arco que hace el péndulo libre. Muestras de la película son sujetadas con mordaza dentro del probador y se les hace una muesca para iniciar el rasgamiento/ruptura; luego se suelta la mordaza del péndulo. Esto rasga la muestra y la escala mide el arco. Puesto

que el arco es proporcional a la resistencia de la muestra, la medición del arco indica la resistencia.

Esta prueba es muy importante para todo tipo de película así como para papel. Valores altos al rasgamiento pueden ser necesarios para operaciones de máquina o para los paquetes bien resistentes. Sin embargo, los valores bajos son necesarios y útiles para la fácil apertura de algunos tipos de paquetes.

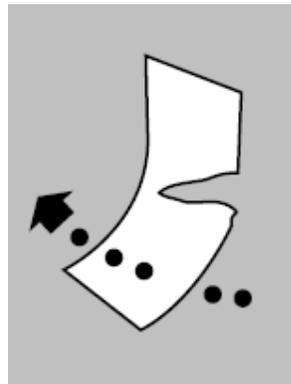


FIGURA 3.25 RESISTENCIA AL RASGAMIENTO

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

La velocidad de transmisión al vapor de agua (WVTR) se refiere a los gramos de agua que pasan a través de una sección determinada de material dentro de un tiempo determinado. Las unidades usuales son los gramos por metro cuadrado por 24 horas a una temperatura determinada y humedad diferencial. La

WVTR es importante en el empaque de un producto que no debe ni resecarse ni humedecerse por efectos ambientales.

Para medir la WVTR, el aparato necesario consiste en platillos de laboratorio o pouches, una báscula analítica, desecante y una cámara de prueba en que la temperatura y la humedad relativa están cuidadosamente controladas. La humedad en la cámara penetra la película y es absorbida por el desecante. Después de un periodo de tiempo determinado, el platillo de prueba o pouch se pesa otra vez y se calcula la velocidad de transmisión al vapor de agua del material. Este valor sirve para obtener posteriormente el coeficiente de permeabilidad del material plástico, el cual es el valor que interesa a diseñadores de empaques.

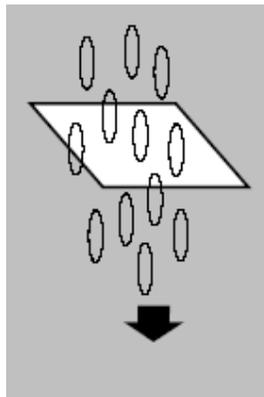


FIGURA 3.26 TRANSMISION DEL VAPOR DE AGUA

3.3.5 Transmisión de Gases (ASTM D-1434)

La permeabilidad de gases generalmente se indica en centímetros cúbicos de gas que pasan por un metro cuadrado de película en 24 horas cuando la diferencial de presión de gas por un lado de la película, a una temperatura determinada, es mayor por una atmósfera que la del otro lado.

Celdas hechas a especificación son empleadas para medir la velocidad de transmisión a gas. Después de sujetar la muestra con mordazas dentro de la celda, el gas de prueba es diseminado por cámaras en cada lado de la muestra. El gas de prueba se admite a un lado de la muestra, mientras se evacua la cámara de prueba del otro lado y se le permite al gas penetrar la película hasta la cámara evacuada por un período de tiempo determinado. 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.

La velocidad de transmisión a gas es fundamental en el empaque al vacío, con gas, y en el empaque de productos frescos que necesitan transferencia de aire.

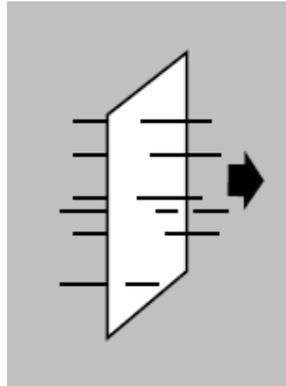


FIGURA 3.27 TRANSMISION DE GASES

3.3.6 Brillo (ASTM D-2457)

En esta prueba, la luz ilumina una muestra desde un ángulo determinado. Una porción de esta luz es reflejada en un receptor fotosensible. La fracción de la luz original que se refleja indica el brillo de la muestra. Se mide el brillo con el medidor “glossmeter”. Este instrumento tiene una fuente de luz incandescente y un receptor fotosensible que responde a luz visible.

El brillo es un factor importante en la venta y esta prueba hace posible especificar y controlar esta característica superficial para que se asegure el efecto deseado.

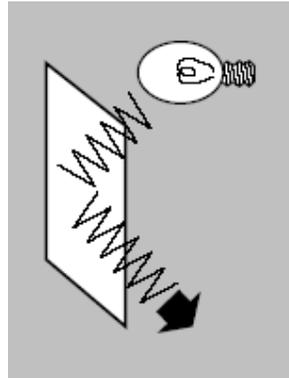


FIGURA 3.28 REFLEXION DE LA LUZ

3.3.7 Opacidad (ASTM D-1003)

En esta prueba, se coloca la muestra entre la fuente de luz y las fotoceldas. Se miden la cantidad de luz transmitida por la muestra, la de la luz dispersada por la muestra y el instrumento y la de la luz incidente total. Usando estos valores, se puede calcular el porcentaje de luz transmitida la cual se dispersa.

El medidor de opacidad (“hazemeter”) mide estas variables y las interrelaciona para indicar el porcentaje de luz dispersada. La opacidad de materiales de empaque transparente se mide con un medidor especial que cuenta con una fuente de luz incandescente y con fotoceldas distribuidas geométricamente que miden la luz transmitida y dispersada.

Esta prueba es importante para productos o usos en que se requieren fidelidad de color y visibilidad.

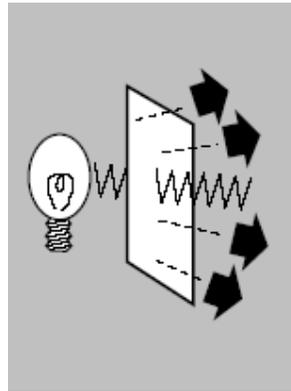


FIGURA 3.29 TRANSMISION DE LUZ

3.3.8 Coeficientes de Fricción (ASTM D1894-93)

Los coeficientes de fricción son la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza, generalmente de gravitación, que actúa perpendicularmente a las dos superficies en contacto. Este coeficiente es una medida de la dificultad relativa que tendrá la superficie de una película al deslizarse sobre otra semejante película contigua a la primera.

El coeficiente de fricción inicial o estático se relaciona con la fuerza medida para comenzar el movimiento de las superficies, una en relación con la otra. El coeficiente de fricción deslizador o cinético se relaciona con la fuerza medida para mantener este

movimiento. El aparato consiste en un deslizador recubierto con película que será arrastrado a una velocidad controlada sobre una superficie de película fija. Se emplea un medidor de flujo (“stream gauge”) para medir la fuerza de fricción. Esta prueba mide el deslizamiento o lubricidad de película a película o de metal a película.

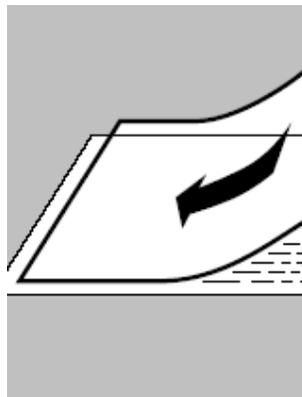


FIGURA 3.30 FRICCIÓN DE LA PELÍCULA

3.4 Fenómeno de Transferencia de Masa en Películas Plásticas.

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, las 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 3.31 ilustra la difusión, adsorción, y permeación que ocurre en la película plástica.

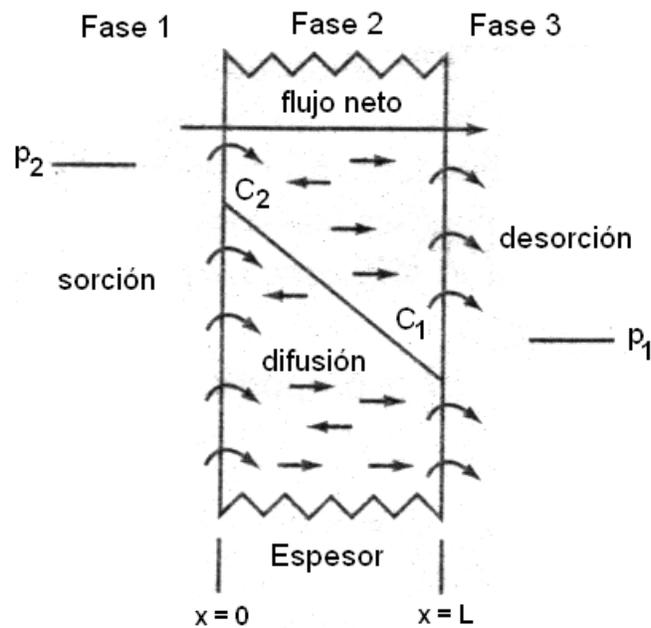


FIGURA 3.31 TRANSMISION A TRAVES DE LA PELICULA

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:

$$a_i = \gamma c_i \quad \text{Ecuación 3.11}$$

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 empaquetado, 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 3.32):

$$p_i = k c_i \Rightarrow c_i = S p_i \quad \text{Ecuación 3.12}$$

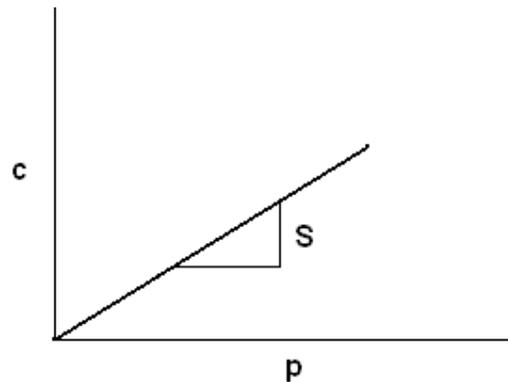


FIGURA 3.32 LEY DE SOLUBILIDAD DE HENRY

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:

$$F = -D \left(\frac{\delta c}{\delta x} \right) \quad \text{Ecuación 3.13}$$

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:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

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:

$$F = -D \frac{dc}{dx} = D \frac{c_2 - c_1}{\ell} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

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 :

$$F = DS \frac{p_2 - p_1}{\ell} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

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:

$$P = D S = \frac{q \ell}{A t \Delta p} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

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.

3.5 Diseño de Empaques Flexibles de Películas Multicapa

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:

$$P = \left(\frac{q}{A t} \right) \frac{\ell}{\Delta p} = \text{WVTR} \frac{\ell}{\Delta p} \quad \text{Ecuación 3.18}$$

En la figura 3.33 se puede observar claramente como se relacionan estos parámetros entre sí:

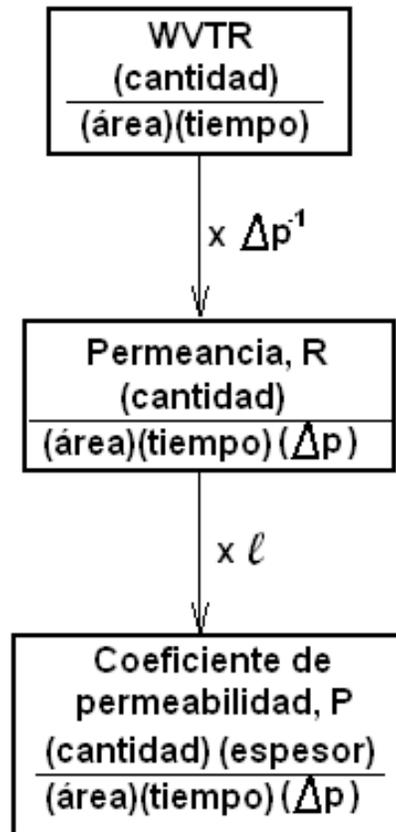


FIGURA 3.33 WVTR, PERMEANCIA Y PERMEABILIDAD

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 3.34 se muestra el análisis para un material tricapa:

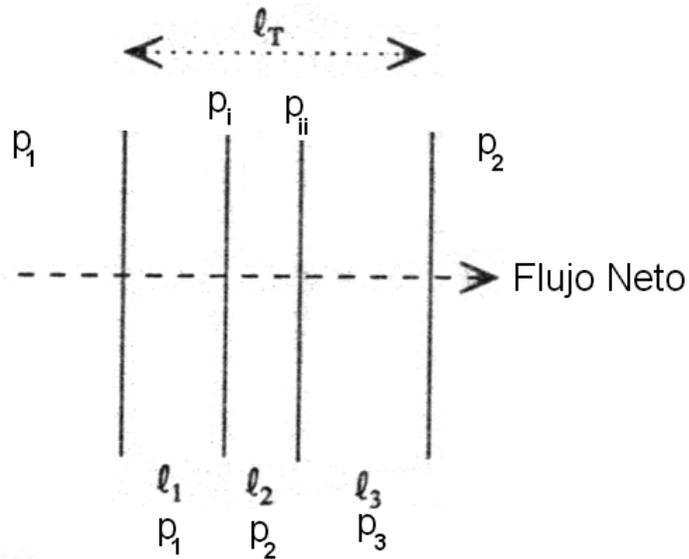


FIGURA 3.34 PERMEACION A TRAVES DE MULTICAPAS

Para la estructura completa, conocemos:

$$P_T = \frac{q l_T}{A t \Delta p_T} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Y despejando Δp , se obtiene:

$$\Delta p_T = \frac{q l_T}{A t P_T} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

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

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{q l_1}{A t \Delta p_1} & \Delta p_1 &= \frac{q l_1}{A t P_1} \\ P_2 &= \frac{q l_2}{A t \Delta p_2} & \Delta p_2 &= \frac{q l_2}{A t P_2} \\ P_3 &= \frac{q l_3}{A t \Delta p_3} & \Delta p_3 &= \frac{q l_3}{A t P_3} \end{aligned}$$

$$\Delta p = \frac{q}{A t} \frac{l_T}{P_T} = \frac{q}{A t} \left(\frac{l_1}{P_1} + \frac{l_2}{P_2} + \frac{l_3}{P_3} \right) \quad \text{Ecuación 3.21}$$

$$\frac{l_T}{P_T} = \frac{l_1}{P_1} + \frac{l_2}{P_2} + \frac{l_3}{P_3} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

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:

$$\frac{l_T}{P_T} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{P_i} \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Y resolviendo para la permeabilidad total P_T , se obtiene:

$$P_T = \frac{l_T}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{P_i}} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

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:

$$P_2 = P_1 e^{\frac{E_p}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

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 5								
COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD A 25°C Y ENERGIA DE								
ACTIVACION (P en cc (STP) cm/m² d atm, E_p en kJ/mol)								
Polímero	P				E_p			
	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 (Sarán)	0.02	0.1	0	61	67	52	70	46
Nylon 6	0.19	0.8	0.05	---	44	41	47	---

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

$$\ell = \frac{P_T t A \Delta p}{q} \quad \text{Ecuación 3.26}$$

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 H_2O 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:

$$\Delta p = \frac{p_s (HR_{out} - HR_{in})}{100} \quad \text{Ecuación 3.27}$$

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 en la isoterma de adsorción de cada alimento, como se aprecia en figura 3.35:

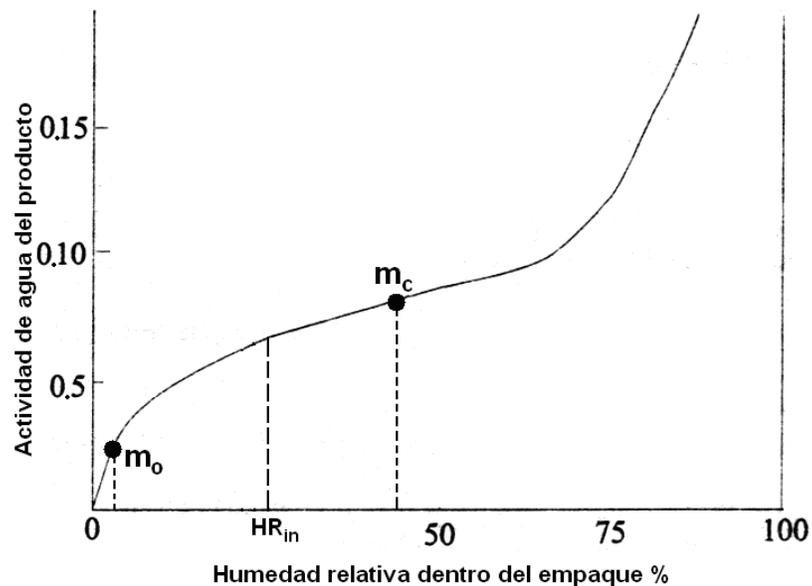


FIGURA 3.35 ACTIVIDAD DE AGUA VS HUMEDAD

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:

$$HR_{in} = \int_{m_o}^{m_c} A_w \quad \text{Ecuación 3.28}$$

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 6 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 6					
PRESION DE SATURACION 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	14.53	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	18.64	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 3.36, se observa más fácilmente, la relación existente de todo lo explicado hasta aquí, para la predicción del “Shelf Life”

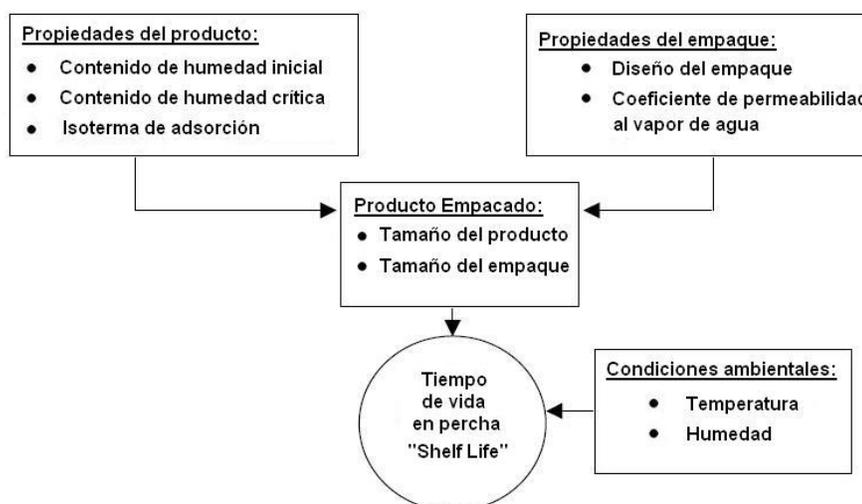


FIGURA 3.36 PROCESO DE PREDICCIÓN DE SHELF LIFE

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.

CAPÍTULO 4

4. ENSAYOS Y RESULTADOS

4.1 Datos de las Resinas

En la siguiente tabla 7 se puede apreciar datos de Melt Index (Índice de Fluidez), y de las densidades de las resinas utilizadas:

TABLA 7		
DATOS DE LAS RESINAS UTILIZADAS		
Resina	M.I.	Densidad (g/cm ³)
LDPE - Dowlex 2085	2	0.921
LDPE - Petrothene 143	1	0.919
LDPE - Hyundai 110	0.25	0.92
METALOCENO – Exceed 1018	1.3	0.924
HDPE - Hivorex 7000F	0.04	0.956
LLDPE - Dowlex 2101	1.6	0.924

4.2 Condiciones de Procesamiento de las Películas

Formulación de las Películas

En la tablas 8, 9, 10, 11 y 12 se muestran las formulaciones para cada capa:

TABLA 8			
FORMULACION DE LA MULTICAPA A			
RESINA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
% LDPE - Hyundai 110	50	90.91	60.13
% LLDPE - Dowlex 2101	50	0	36.08
COLORANTE BLANCO	0	9.09	1.83
COLORANTE AMARILLO	0	0	1.96
% TOTAL	100	100	100

TABLA 9			
FORMULACION DE LA MULTICAPA B			
RESINA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
% LDPE - Hyundai 110	50	89.29	62.5
% LLDPE - Dowlex 2101	50	0	37.5
COLORANTE BLANCO	0	10.71	0
% TOTAL	100	100	100

TABLA 10			
FORMULACION DE LA MULTICAPA C			
RESINA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
% LDPE - Hyundai 110	25	89.29	66.96
% LLDPE - Dowlex 2101	75	0	22.33
COLORANTE BLANCO	0	10.71	10.71
% TOTAL	100	100	100

TABLA 11			
FORMULACION DE LA MULTICAPA D			
RESINA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
% LDPE - Hyundai 110	40	50	40
% HDPE - Hivorex 7000F	0	50	0
% METALOCENO	60	0	60
% TOTAL	100	100	100

TABLA 12			
FORMULACION DE LA MULTICAPA E			
RESINA	CAPA 1	CAPA 2	CAPA 3
% LDPE - Dowlex 2085	80	0	80
% LDPE - Petrothene 143	20	100	20
% TOTAL	100	100	100

Con estas formulaciones, para cada capa se alimenta con dicha materia prima a las respectivas extrusoras componentes del sistema de coextrusión (en este caso de película tricapa), en cantidades proporcionales a la producción total requerida, de dicha dosificación se encarga el sistema de manera automática.

Parámetros de Procesamiento de las Películas

Los parámetros con los cuales se procedió a programar la máquina para el procesamiento de cada una de las 5 películas multicapa en estudio, se observaron en el panel de control automático y fueron registrados, dichos parámetros se muestran explícitamente en la siguiente tabla 13:

TABLA 13					
PARAMETROS DE PROCESAMIENTO DE LAS PELICULAS					
PARAMETRO	A	B	C	D	E
Output (Kg/h)	140	140	140	140	232
Die Gap (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	0.8
Espesor (micras)	108	75	73	110	53
DDR	5.92	8.52	8.75	5.81	4.79
Vel. Línea (m/min)	10	10	10	10	21
BUR	2.34	2.34	2.34	2.34	3.14
Línea Congel. (cm)	80	80	80	80	120
Lay Flat (mm)	1100	1100	1100	1100	1232
IBC	no	no	no	no	no
Dado Φ (mm)	300	300	300	300	250
T, Cabezal (°C)	190	190	190	190	240
Barril 1 T _{min-max} (°C)	195-205	195-205	195-205	195-205	219-240
Barril 2 T _{min-max} (°C)	198-210	198-210	198-210	198-210	219-240
Barril 3 T _{min-max} (°C)	195-205	195-205	195-205	195-205	217-240

4.3 Ensayos de Tensión

Los ensayos de tensión de las películas multicapa en estudio fueron realizados según la norma ASTM D 882.

Equipos

Los equipos utilizados para este ensayo, fueron los siguientes:

- Maquina de Tracción Universal
 - Máxima capacidad: 10 Kgf
 - Mínima escala: 1 gf
 - Tipo de Medición: Tensión
 - Unidad: Kilogramo-fuerza
 - Testing Machines Inc., Amityville N. Y., USA

- Micrómetro de Precisión
 - Modelo No. 49-61
 - Rango: 0 – 1270 mm
 - Mínima escala: 0.0001 mm
 - Tipo de Medición: Espesor
 - Testing Machines Inc., Amityville N. Y., USA

En la figura 4.1 se puede apreciar la máquina de tracción universal, utilizada para este ensayo :

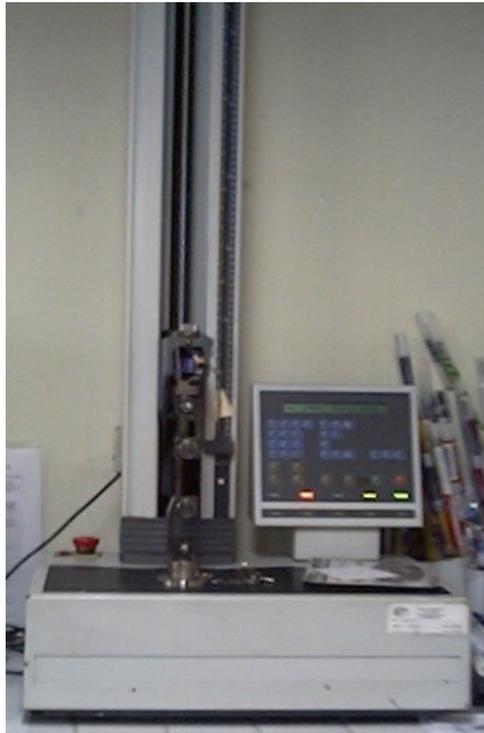


FIGURA 4.1 MAQUINA DE TRACCION UNIVERSAL

Condiciones y Requerimientos:

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

- Las condiciones ambientales del ensayo son 23 °C y 50% de humedad relativa.

- Las muestras consisten en tiras uniformes, de al menos 50 mm más larga que la distancia entre mordazas.
- Se deben sacar tiras de muestras, en las dos direcciones perpendiculares, es decir, dirección máquina (MD) y dirección transversal (TD) de la película.
- El ancho de la tira debe ser entre 5 mm y 25,4 mm, una tira más gruesa minimiza el error de paralelismo entre los bordes.
- El largo de la tira debe ser aproximadamente 250 mm.
- Las tiras deben ser cortadas con sumo cuidado, no deben poseer mordeduras o bordes rasgados, debe ser un corte uniforme, los bordes deben tener un 5% de error de paralelismo máximo.
- Una examinación microscópica debe utilizarse para detectar defectos o fallas en la muestra.

Procedimiento

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Seleccionar el rango de la carga a utilizarse. En este caso de 0 a 3 Kgf

- Medir el área de la sección transversal de la muestra.
- Para colocar la separación inicial entre mordazas, escogemos una distancia entre mordazas de 50 mm, y una velocidad de 500 mm/min, que es la apropiada para elongaciones de más del 100% como es el caso de todas las muestras.
- Colocar la tira entre las mordazas, alineándolas cuidadosamente y sujetándolas fuertemente para evitar deslizamiento de la tira y error en la medición.
- Comenzar el ensayo y repetir el procedimiento para cada muestra restante.
- Se deben tomar ocho medidas de fuerza y elongación, tanto en dirección máquina como transversal, para cada película, de las cuales se escogen 5 datos en cada caso y se eliminan los valores aberrantes tanto de espesor, elongación y carga máxima.
- Con estos valores se obtiene un valor promedio, de carga y elongación, que se tomaran en cuenta posteriormente para los cálculos.

La secuencia de elongación de una tira de las películas en estudio, en dirección TD y sus resultados en el panel, puede ser observada en la figura 4.2:

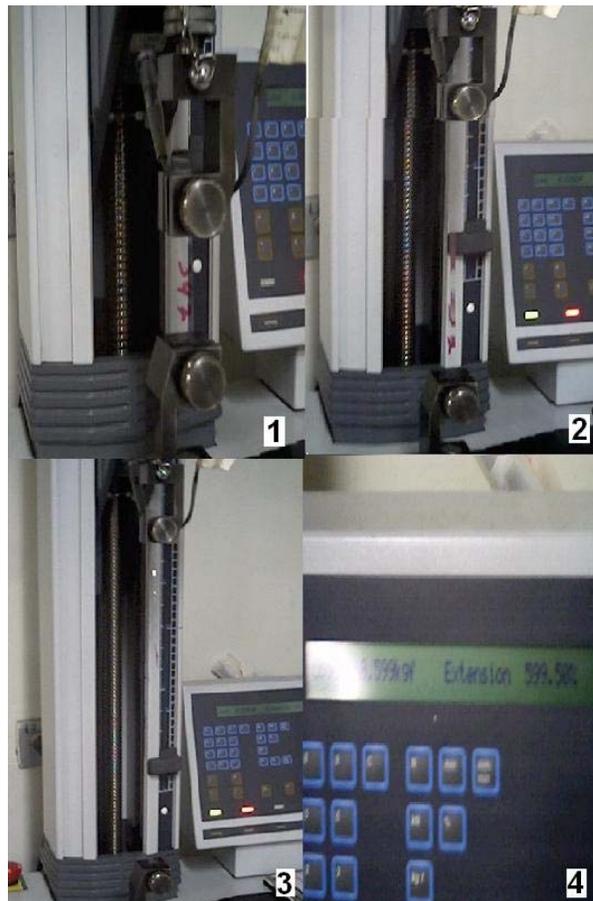


FIGURA 4.2 SECUENCIA DE ELONGACION DE LA TIRA (TD)

Resultados

Los resultados de este ensayo se mostrarán a continuación; para mayor facilidad se le ha designado a cada película multicapa una letra mayúscula, para evitar nombrar repetidamente la composición de capas de las mismas, las cuales fueron detalladas al comienzo del capítulo.

Los resultados se muestran a continuación, en las tablas 14, 15, 16, 17 y 18:

TABLA 14							
ENSAYOS DE TENSION DE LA TRICAPA A							
DIRECCION MAQUINA				DIRECCION TRANSVERSAL			
	Esp.	Resist.	Elong.		Esp.	Resist.	Elong.
	(mic)	(Kgf)	(%)		(mic)	(Kgf)	(%)
PROM.	109.29	2.799	685.1	PROM.	107.93	3.20	812.90
Resist. a Ruptura: 256.07 Kgf/cm ²				Resist. a Ruptura: 296.73 Kgf/cm ²			
ELONGACION: 685.14 %				ELONGACION: 812.90 %			

TABLA 15							
ENSAYOS DE TENSION DE LA TRICAPA B							
DIRECCION MAQUINA				DIRECCION TRANSVERSAL			
	Esp.	Resist.	Elong.		Esp.	Resist.	Elong.
	(mic)	(Kgf)	(%)		(mic)	(Kgf)	(%)
PROM.	72.04	1.897	608.1	PROM.	77.64	2.27	916.86
Resist. a Ruptura: 263.27 Kgf/cm ²				Resist. a Ruptura: 291.96 Kgf/cm ²			
ELONGACION: 608.08 %				ELONGACION: 916.86 %			

TABLA 16							
ENSAYOS DE TENSION DE LA TRICAPA C							
DIRECCION MAQUINA				DIRECCION TRANSVERSAL			
	Esp.	Resist.	Elong.		Esp.	Resist.	Elong.
	(mic)	(Kgf)	(%)		(mic)	(Kgf)	(%)
PROM.	74.01	1.821	570.2	PROM.	73.11	1.95	893.60
Resist. a Ruptura: 246.02 Kg/cm ²				Resist. a Ruptura: 266.34 Kg/cm ²			
ELONGACION: 570.2 %				ELONGACION: 893.6 %			

TABLA 17							
ENSAYOS DE TENSION DE LA TRICAPA D							
DIRECCION MAQUINA				DIRECCION TRANSVERSAL			
	Esp.	Resist.	Elong.		Esp.	Resist.	Elong.
	(mic)	(Kgf)	(%)		(mic)	(Kgf)	(%)
PROM.	114.04	1.636	679.4	PROM.	108.75	1.71	1014.36
Resist. a Ruptura: 286.95 Kg/cm ²				Resist. a Ruptura		314.11 Kg/cm ²	
ELONGACION: 679.40 %				ELONGACION: 1014.36 %			

TABLA 18							
ENSAYOS DE TENSION DE LA TRICAPA E							
DIRECCION MAQUINA				DIRECCION TRANSVERSAL			
	Esp.	Resist.	Elong.		Esp.	Resist.	Elong.
	(mic)	(Kgf)	(%)		(mic)	(Kgf)	(%)
PROM.	56.56	1.379	543.8	PROM.	52.50	1.16	695.26
Resist. a Ruptura: 243.85 Kgf/cm ²				Resist. a Ruptura: 221.67 Kgf/cm ²			
ELONGACION: 543.82 %				ELONGACION: 695.26 %			

4.4 Ensayos de Impacto al Dardo

Los ensayos de Resistencia al Impacto, por el método de caída libre del dardo, de las películas multicapa en estudio fueron realizados según la norma ASTM D 1709.

Equipos

Los equipos utilizados para este ensayo, fueron los siguientes:

- Máquina de Impacto al Dardo
 - Diámetro del Dardo: **38.0 ± 1 mm**
 - Altura de Caída Libre: **0.66 ± 0.01 m**
 - Rango de Impacto: 50 – 2000 gramos

- Testing Machines Inc., Amityville N. Y., USA

➤ **Micrómetro de Precisión**

- Modelo No. 49-61
- Rango: 0 – 1270 mm
- Mínima escala: 0.0001 mm
- Tipo de Medición: Espesor
- Testing Machines Inc., Amityville N. Y., USA



FIGURA 4.3 MICROMETRO DE PRECISION

Condiciones y Requerimientos

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

- Las condiciones ambientales del ensayo son 23 °C y 50 % de humedad relativa.
- El ensayo emplea un dardo cuya cabeza tiene 38 mm de diámetro, que se deja caer desde una altura de 0.66 metros. Estos parámetros son estandarizados según la norma ASTM D 1709.
- Los pedazos de muestras serán de 0.2 x 1 metros y se tomarán 2 por cada película.

Procedimiento

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Registrar y señalar el espesor aproximadamente a 0.0025 mm del área de impacto.
- Colocar la película y sujetarla fuertemente en la abrazadera anular, estar seguro que la superficie de la misma este uniforme, sin dobladuras.
- Seleccionar un peso de partida, e ir añadiendo peso a medida que transcurre el ensayo.

- Dejar caer el dardo, el cual debe caer e impactar en el lugar esperado.
- Con un mismo peso se debe realizar diez pruebas, si el porcentaje de fallas con ese peso va de 0 a 100%, incrementar el peso en 15 g, y así sucesivamente hasta llegar al peso en que un 100% de fallas se consigue. Se necesitan cinco grupos de diez pruebas. Anotar los resultados.
- Se realizan 2 pruebas para cada una de las 5 películas en estudio, y se obtiene un valor promedio.

Resultados

Los resultados de este ensayo se mostrarán a continuación; para mayor facilidad se le ha designado a cada película multicapa, una letra mayúscula, para evitar nombrar repetidamente la composición de capas de las mismas, las cuales fueron detalladas al comienzo del capítulo.

Los resultados se muestran en la tabla 19:

TABLA 19			
PRUEBAS DE IMPACTO AL DARDO			
TRICAPA	Peso de Falla por Impacto W_F , (gramos)		
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PROMEDIO
A	852.5	897.4	874.95
B	598.6	663.65	631.125
C	613.4	613.4	613.4
D	1012.45	1057.65	1035.05
E	130.75	130.8	130.775

4.5 WVTR (Método del Pouch) y Coeficientes de Permeabilidad

Los ensayos de la tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) de las películas multicapa en estudio fueron realizados según la norma ASTM E-96 (Método de pouch).

Equipos

Los equipos utilizados para este ensayo, fueron los siguientes:

- Cuarto Acondicionado a 21 °C
- Selladora de Empaques Plásticos.
- Desecante
- Incubadora BINDER (Atmósfera controlada 32 °C)

- Rango 0 – 70°C
- Escala mínima 0.1°C
- Higrómetro y Termómetro
 - Rango 0 – 50 °C
 - Rango 0 – 98 % HR
- Balanza analítica KERN_{KB}
 - Escala mínima: 0.01 g
 - Rango 0 - 610 g
- Balanza analítica SARTORIUS BL210S
 - Escala mínima: 0.0001 g
 - Rango 0 - 210 g

En las figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se pueden apreciar algunos de los equipos utilizados en este ensayo:



FIGURA 4.4 BALANZA ANALITICA KERN_{KB}



FIGURA 4.5 BALANZA ANALITICA SARTORIUS BL210S



FIGURA 4.6 SELLADORA

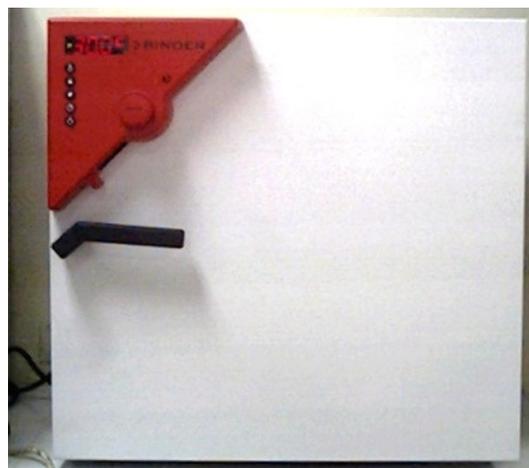


FIGURA 4.7 INCUBADORA BINDER

Condiciones y Requerimientos

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

- Las condiciones ambientales de la atmósfera controlada para el ensayo es 32 °C y 80 % de humedad relativa para clima de Guayaquil, y 21 °C y 50 % de humedad relativa, para clima de Quito, ambas deben ser medidas frecuentemente para controlar dichas condiciones.
- Los Pouches deben tener un tamaño de 10 cm x 10 cm aproximadamente.
- La cantidad de desecante dentro del pouch debe ser entre 20 a 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.
- El desecante debe ser secado a 120°C por 4 horas, antes de su uso.
- El sello debe ser lo más hermético posible, para evitar errores en la medición, se aplica un triple sellaje en los lados del pouch para mayor seguridad.

- Si el material no tiene un espesor uniforme u homogéneo, se deberá marcar y diferenciar cada una de sus caras.
- Cuando el producto es diseñado para uso en una posición, la muestra deberá ser colocada con el flujo de vapor en la posición de diseño.

Procedimiento

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se usarán 6 pouches de cada material, a excepción de la muestra E que serán 8 pouches, sumando así 32 pouches.
- Cada material se lo llamará con una letra mayúscula, para fácil comprensión y diferenciación, y de esta manera evitar repetir sucesivamente la composición de cada una de sus capas, así tenemos entonces las 5 películas: A, B, C, D y E.
- Cortar las muestras, al tamaño de los 32 pouches a utilizar, aproximadamente de 11 cm x 11 cm, para que al realizar el triple sellaje el pouch quede aproximadamente de 10 cm x 10 cm.

- De los 6 pouches, 3 son para condiciones de Quito y 3 para condiciones de Guayaquil.
- Numerar del 1 al 3 para una posterior identificación de los pouches en cada ambiente.
- Llenar con aproximadamente de 20 a 25 gramos de desecante el pouch, y sellarlo herméticamente con el sellador de empaques plásticos del laboratorio, medir el largo y ancho final del pouch siendo los límites el perímetro de sellaje del pouch, pesar inmediatamente el pouch y registrar la información con su respectiva fecha de registro, así sucesivamente para cada una de las muestras en los diferentes ambientes y condiciones a estudiar (Quito y Guayaquil).
- Pesar los pouches periódicamente (cada 2 o 3 días), lo suficiente para obtener de 6 puntos para la grafica.
- El tiempo máximo permitido para pesar y registrar la información fuera de la atmósfera controlada, es aproximadamente 1% del tiempo entre pesadas sucesivas, es decir que si tomamos datos cada hora, se permite 30 segundos, y si es cada 2 días, un máximo de 30 minutos será permitido.

- Después de cada pesada se debe agitar suavemente el pouch.
- Terminar el test o cambiar el desecante antes de que el agua ganada por desecante exceda el 10% de su peso original.
- Realizar con los datos obtenidos la gráfica Q vs. t, y obtener la pendiente de la misma, donde:

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

Donde:

Q = Peso ganado del desecante en gramos

t = tiempo de la prueba en horas

Q/t = Pendiente de la gráfica , g/h

A = Área de la boca del envase en m²

WVTR = Tasa de transmisión de vapor de agua g/h-m²

(Water Vapor Transmisión Rate)

En la figura 4.8 se puede apreciar la forma definitiva de los pouches luego del llenado con el desecante y el sellado posterior:



FIGURA 4.8 POUCHES MULTICAPA

En la figura 4.9 se puede ver los pouches colocados en la atmósfera controlada (INCUBADORA BINDER), con las condiciones de Guayaquil, 32 °C y 80 % HR:



FIGURA 4.9 POUCHES EN ATMOSFERA CONTROLADA

Resultados de WVTR y de Coeficientes de Permeabilidad

En las tablas 20 y 21, se muestran el peso neto ganado por los pouches en gramos, a través del tiempo en horas, para las 2 condiciones atmosféricas a analizar, siendo la tabla 20 la de Guayaquil (31.67°C, 75.67% HR):

TABLA 20										
Peso en gramos ganado por el desecante por la permeación de										
H ₂ O en el pouch, a condiciones de Guayaquil (31.67°C, 75.67% HR)										
Tiempo	A		B		C		D		E	
(horas)	P 1	P 2	P 1	P 2	P 1	P 2	P 1	P 2	P 1	P 2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0.09	0.05	0.09	0.12	0.1	0.09	0.05	0.05	0.15	0.15
140	0.23	0.19	0.3	0.3	0.27	0.26	0.17	0.18	0.4	0.39
189	0.29	0.26	0.36	0.39	0.34	0.33	0.21	0.22	0.51	0.5
238	0.35	0.33	0.42	0.43	0.4	0.38	0.27	0.28	0.61	0.61
311	0.46	0.43	0.52	0.54	0.5	0.46	0.32	0.35	0.79	0.81

Las condiciones atmosféricas indicadas en las tablas, son el valor promedio, a lo largo de todo el tiempo de registro y control de los pouches, que fue de aproximadamente 13 días.

En la tabla 21 tenemos los resultados obtenidos para Quito (21 °C y 47.83 % HR):

TABLA 21											
Peso en gramos ganado por el desecante por la permeación de											
H₂O en el pouch, a condiciones de Quito (21°C y 47.83% HR)											
T	A		B		C		D		E		
hrs	P 1	P 2	P 1								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	0.038	0.038	0.064	0.06	0.052	0.061	0.034	0.034	0.087	0.114	0.105
140	0.057	0.057	0.095	0.091	0.08	0.09	0.051	0.052	0.129	0.165	0.165
188	0.073	0.073	0.122	0.116	0.102	0.116	0.067	0.067	0.175	0.21	0.217
261	0.096	0.094	0.158	0.157	0.142	0.15	0.086	0.087	0.249	0.274	0.305
309	0.113	0.112	0.187	0.186	0.166	0.172	0.104	0.105	0.278	0.301	0.351

En las tablas y en figuras siguientes, se hallan los valores de WVTR y de Coeficientes de Permeabilidad para todas las películas tricapa, para ambas condiciones ambientales en estudio:

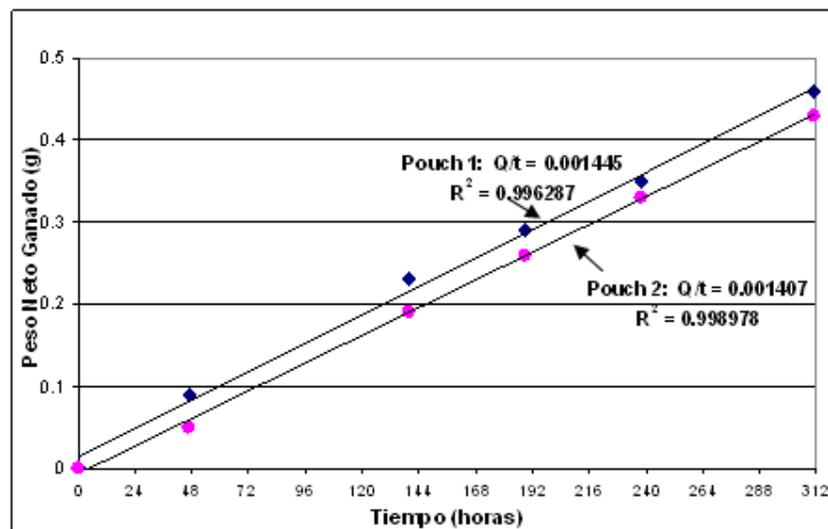


FIGURA 4.10 WVTR DE POUCH A PARA GUAYAQUIL

TABLA 22

Coefficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa A

a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR)

	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	205.92	198
Espesor en micras (μ)	108	108
Q/t (g/hr)	0.001445	0.001407
WVTR (g/h-cm ²)	7.017288E-06	7.10606E-06
Δp (mm Hg)	27.00170445	27.00170445
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2.598832E-07	2.631708E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.806738E-05	2.842245E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.82449E-05	

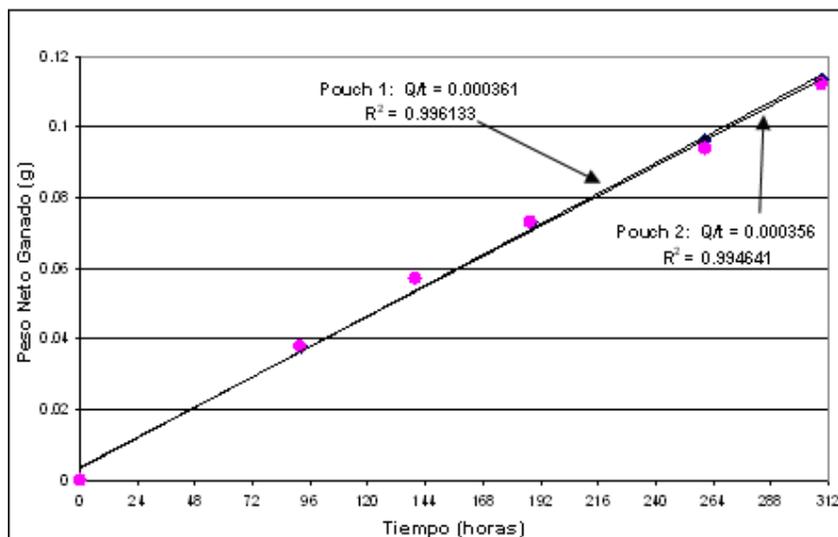


FIGURA 4.11 WVTR DE POUCH A PARA QUITO

TABLA 23

Coefficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa A

a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR)

	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	195.84	194
Espesor en micras (μ)	108	108
Q/t (g/hr)	0.000361	0.000356
WVTR (g/h-cm ²)	1.843342E-06	1.83505E-06
Δp (mm Hg)	8.915512	8.915512
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2.067567E-07	2.058268E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.232972E-05	2.222930E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.22795E-05	

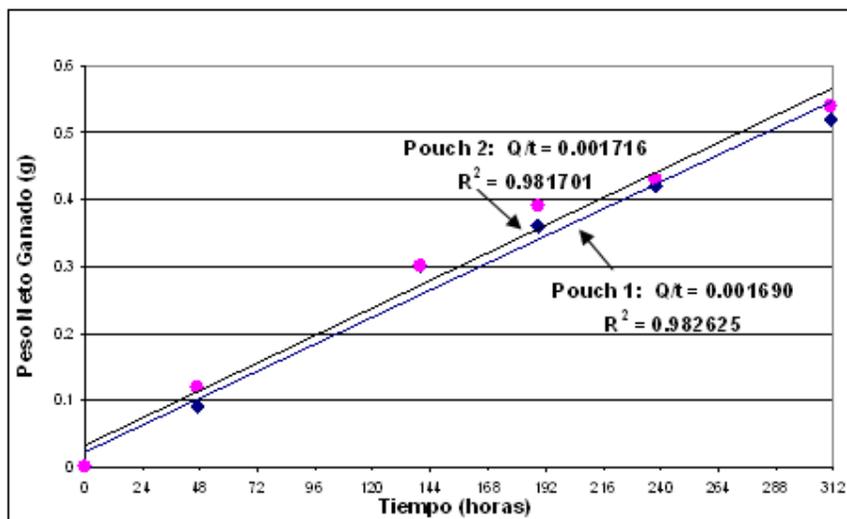


FIGURA 4.12 WVTR DE POUCH B PARA GUAYAQUIL

TABLA 24

Coefficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa B

a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR)

	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	201.76	199.82
Espesor en micras (μ)	75	75
Q/t (g/hr)	0.00169	0.001716
WVTR (g/h-cm ²)	8.376289E-06	8.58773E-06
Δp (mm Hg)	27.00170445	27.00170445
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3.102133E-07	3.180440E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.326600E-05	2.385330E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.35596E-05	

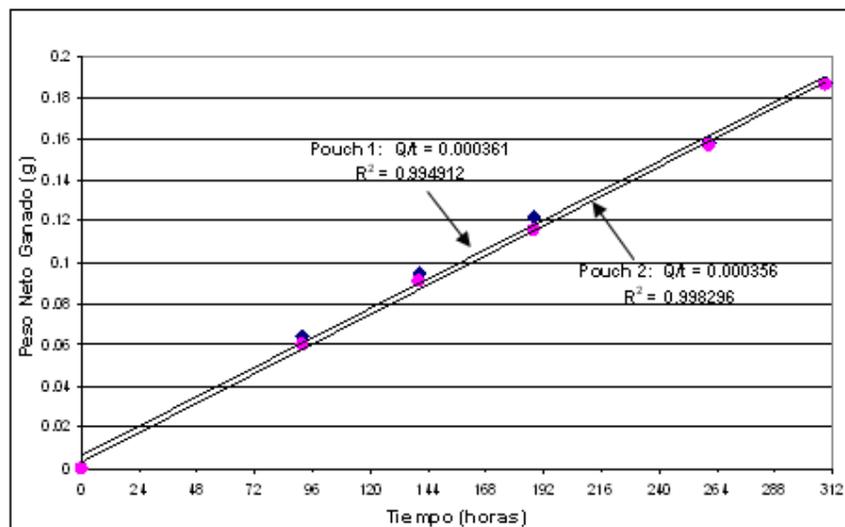


FIGURA 4.13 WVTR DE POUCH B PARA QUITO

TABLA 25		
Coefficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa B		
a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR)		
	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	199.82	201.88
Espesor en micras (μ)	75	75
Q/t (g/hr)	0.000361	0.000356
WVTR (g/h-cm ²)	1.806626E-06	1.763424E-06
Δp (mm Hg)	8.915512	8.915512
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2.026385E-07	1.977928E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1.519789E-05	1.483446E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1.50162E-05	

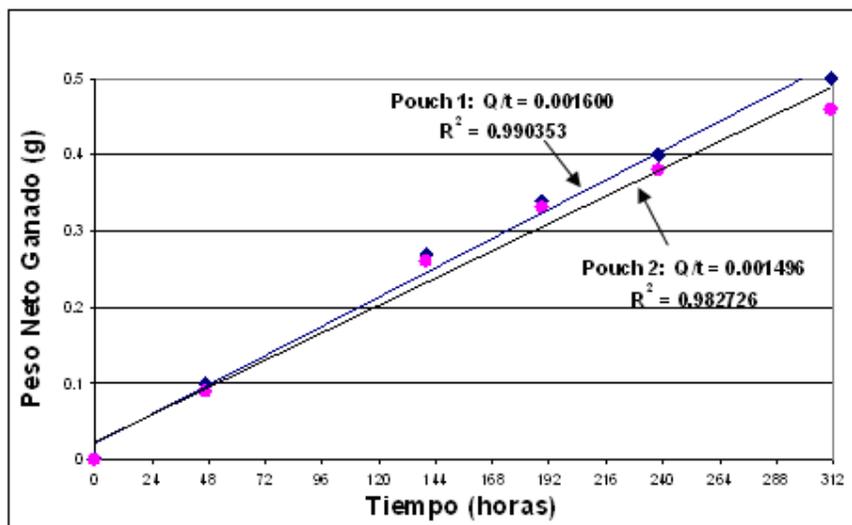


FIGURA 4.14 WVTR DE POUCH C PARA GUAYAQUIL

TABLA 26		
Coefficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa C		
a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR)		
	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	190	184
Espesor en micras (μ)	73	73
Q/t (g/hr)	0.0016	0.001496
WVTR (g/h-cm ²)	8.421053E-06	8.13043E-06
Δp (mm Hg)	27.00170445	27.00170445
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	3.118712E-07	3.011082E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.276659E-05	2.198090E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.23737E-05	

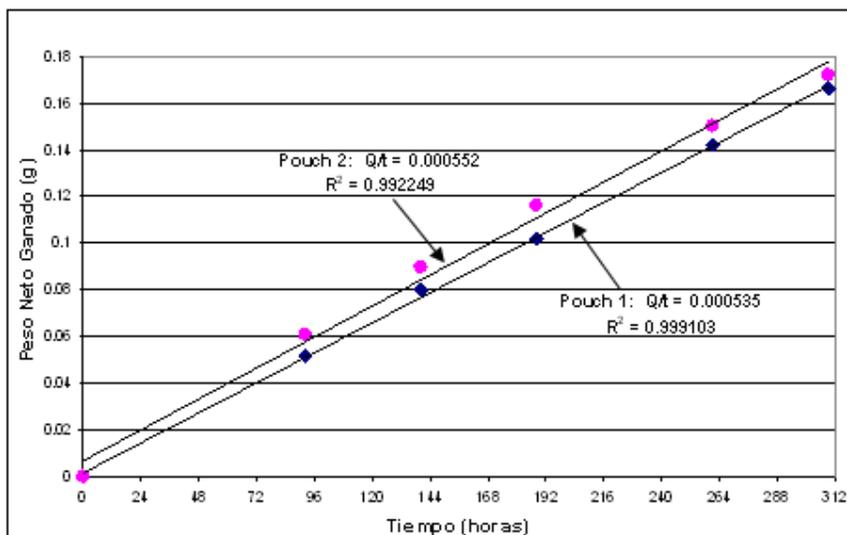


FIGURA 4.15 WVTR DE POUCH C PARA QUITO

TABLA 27		
Coeficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa C		
a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR)		
	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	212.1	208.06
Espesor en micras (μ)	73	73
Q/t (g/hr)	0.000535	0.000552
WVTR (g/h-cm ²)	2.522395E-06	2.653081E-06
Δp (mm Hg)	8.915512	8.915512
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2.829221E-07	2.975803E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.065331E-05	2.172336E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.11883E-05	

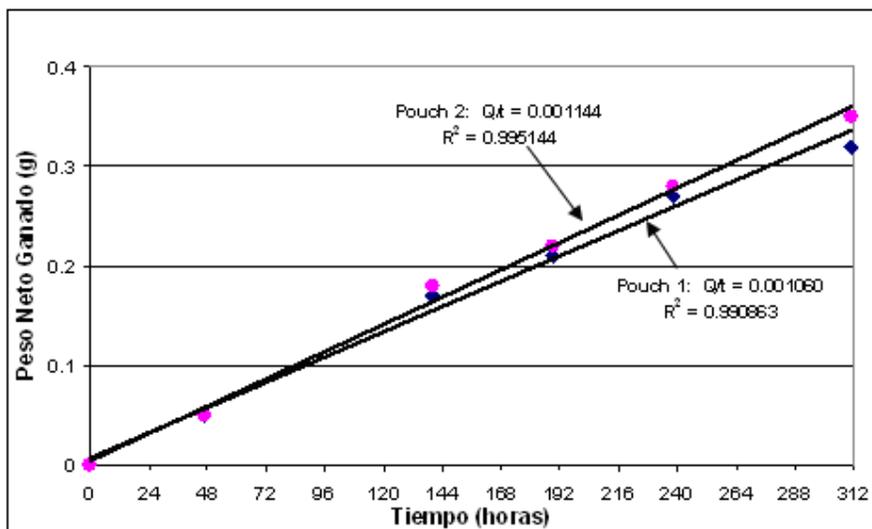


FIGURA 4.16 WVTR DE POUCH D PARA GUAYAQUIL

TABLA 28		
Coeficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa D		
a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR)		
	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	183.34	203.52
Espesor en micras (μ)	110	110
Q/t (g/hr)	0.00106	0.001144
WVTR (g/h-cm ²)	5.781608E-06	5.62107E-06
Δp (mm Hg)	27.00170445	27.00170445
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	2.141201E-07	2.081746E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.355321E-05	2.289921E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	2.32262E-05	

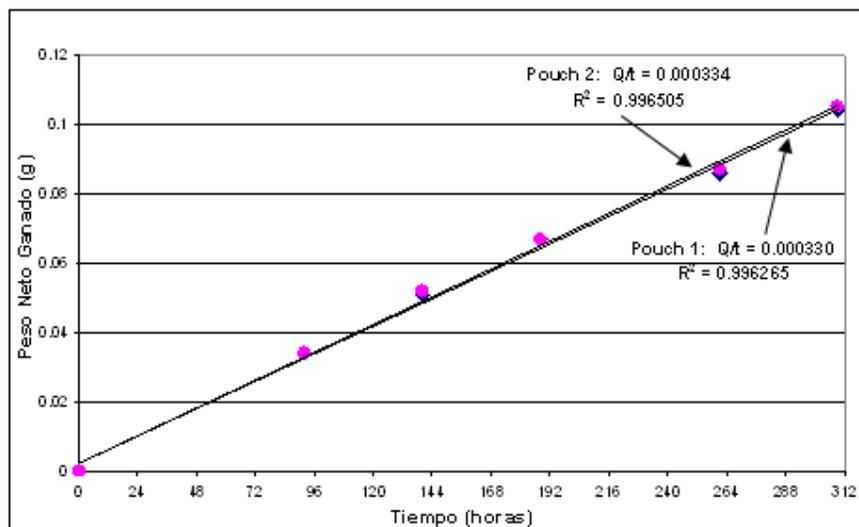


FIGURA 4.17 WVTR DE POUCH D PARA QUITO

TABLA 29		
Coefficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa D		
a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR)		
	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	206.04	210
Espesor en micras (μ)	110	110
Q/t (g/hr)	0.00033	0.000334
WVTR (g/h-cm ²)	1.601631E-06	1.590476E-06
Δp (mm Hg)	8.915512	8.915512
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	1.796454E-07	1.783943E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1.976099E-05	1.962337E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	1.96922E-05	

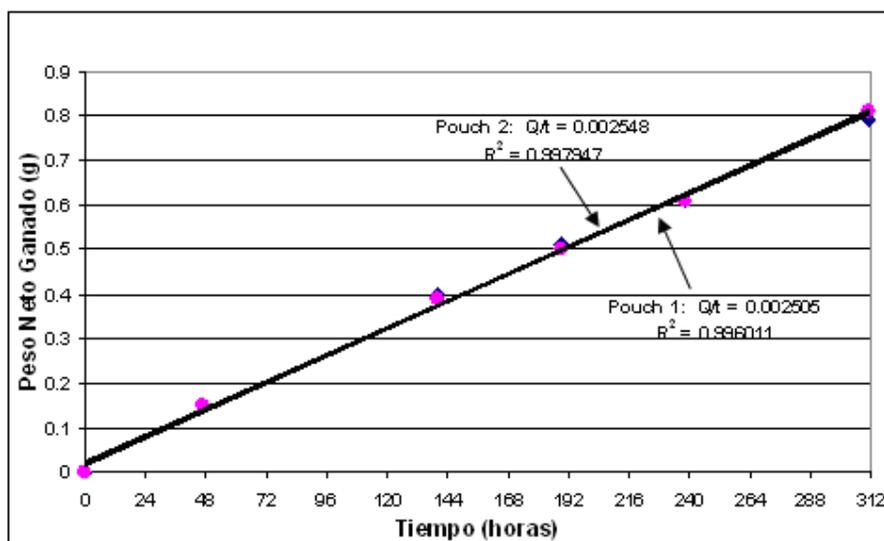


FIGURA 4.18 WVTR DE POUCH E PARA GUAYAQUIL

TABLA 30		
Coeficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa E		
a Condiciones de Guayaquil (31.67 °C y 75.67 % HR)		
	Pouch 1	Pouch 2
Area del pouch (cm ²)	182.36	184.24
Espesor en micras (μ)	110	110
Q/t (g/hr)	0.002505	0.002548
WVTR (g/h-cm ²)	1.373657E-05	1.38298E-05
Δp (mm Hg)	27.00170445	27.00170445
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	5.087296E-07	5.121820E-07
Coef. Permeabilidad, P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	5.596025E-05	5.634002E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	5.61501E-05	

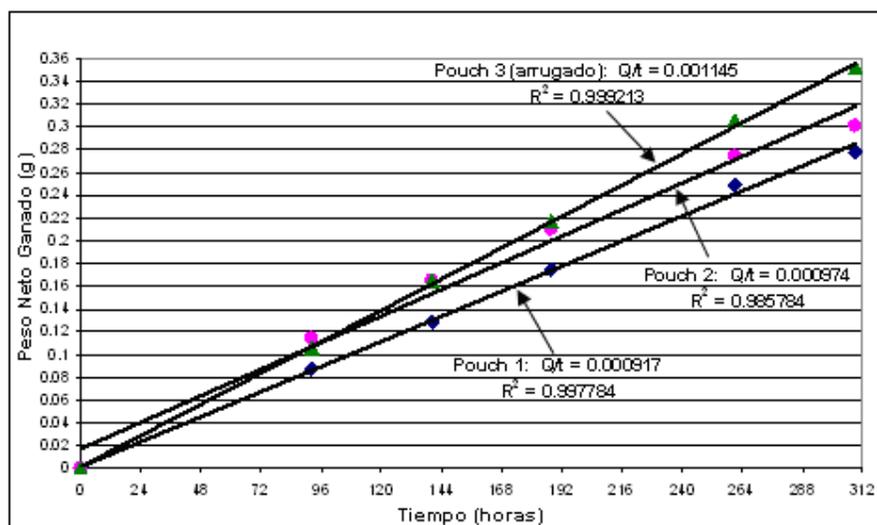


FIGURA 4.19 WVTR DE POUCH E PARA QUITO

TABLA 31			
Coeficiente de permeabilidad al H₂O del film tricapa E			
a Condiciones de Quito (21 °C y 47.83 % HR)			
	Pouch 1	Pouch 2	Pouch 3 (Arrug.)
Area del pouch (cm ²)	210.08	210	206.04
Espesor en micras (μ)	110	110	110
Q/t (g/hr)	0.000917	0.000974	0.001145
WVTR (g/h-cm ²)	4.365004E-06	4.638095E-06	5.557173E-06
Δp (mm Hg)	8.915512	8.915512	8.915512
Permeancia (g/hr-mm Hg-cm ²)	4.895965E-07	5.202276E-07	6.233151E-07
P (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	5.385562E-05	5.722503E-05	6.856466E-05
P promedio (g-μ/hr-mm Hg-cm ²)	5.55403E-05		6.856466E-05

Con esta última muestra E con las condiciones de Quito, se quiso conocer si la manipulación del empaque (sin llegar a perforar el mismo) afecta en algún grado a la permeabilidad.

Como se puede observar en el pouch 3 (pouch arrugado), aumentó la permeabilidad en un 23.45%, debido a la manipulación y deterioro del mismo, en comparación con el valor promedio de los pouches que no sufrieron manipulación alguna, es decir, los pouches que estaban en perfectas condiciones.

En la última tabla de este capítulo, se muestra en resumen, los valores de los coeficientes de permeabilidad de todos los pouches, para ambas condiciones ambientales, en varias unidades conocidas.

Estos valores de la tabla 32, la cual se muestra a continuación, se utilizarán en el capítulo 5, para posteriores análisis de variación de la permeabilidad con la temperatura y de variación del Shelf Life del producto. El coeficiente de permeabilidad (P) que encontramos en los libros a 32°C, para el LDPE es $4.26E-06$ g-mil/100 in²-d-mm Hg, y del HDPE es $1.52 E-06$ g-mil/100 in²-d-mm Hg, entonces mediante el uso de la tecnología multicapa, se pueden obtener valores de P menores en comparación a las películas monocapa de LDPE, y se

puede apreciar en la siguiente tabla 32, los bajos valores de P que poseen las películas en estudio:

TABLA 32				
VALORES DE P, PARA LAS PELICULAS TRICAPA EN ESTUDIO				
	COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD, P			
	g-μ/hr-mm Hg-cm²	g-mil/100 in²-d-mm Hg	g/Pa-s-m	1Perm inch
31.67°C, 75.67%HR				
A	2.82E-05	1.72E-06	5.89E-13	0.000405
B	2.36E-05	1.44E-06	4.91E-13	0.000338
C	2.24E-05	1.36E-06	4.66E-13	0.000321
D	2.32E-05	1.42E-06	4.84E-13	0.000333
E	5.62E-05	3.42E-06	1.17E-12	0.000805
21°C, 47.83%HR				
A	2.23E-05	1.36E-06	4.64E-13	0.000319
B	1.50E-05	9.15E-07	3.13E-13	0.000215
C	2.12E-05	1.29E-06	4.42E-13	0.000304
D	1.97E-05	1.20E-06	4.1E-13	0.000282
E	5.55E-05	3.39E-06	1.16E-12	0.000796
E (ARRUG.)	6.86E-05	4.18E-06	1.43E-12	0.000983

CAPÍTULO 5

5. ANALISIS DE LAS PELICULAS MULTICAPA EN ESTUDIO.

5.1 Análisis de Propiedades Mecánicas vs. Barrera

Procedemos a establecer primero una comparación entre los resultados obtenidos en los ensayos y pruebas mecánicas evaluadas hasta aquí, es decir, los resultados obtenidos en las pruebas de Tensión, Elongación e Impacto al Dardo.

Para observar de manera global el comportamiento de las 5 películas, se realizó un gráfico radial con los resultados obtenidos, el mismo se lo puede apreciar en la siguiente figura 5.1, cabe recalcar que la información de estos resultados tal como se aprecia, es como se entrega a la empresa que adquiere las películas:

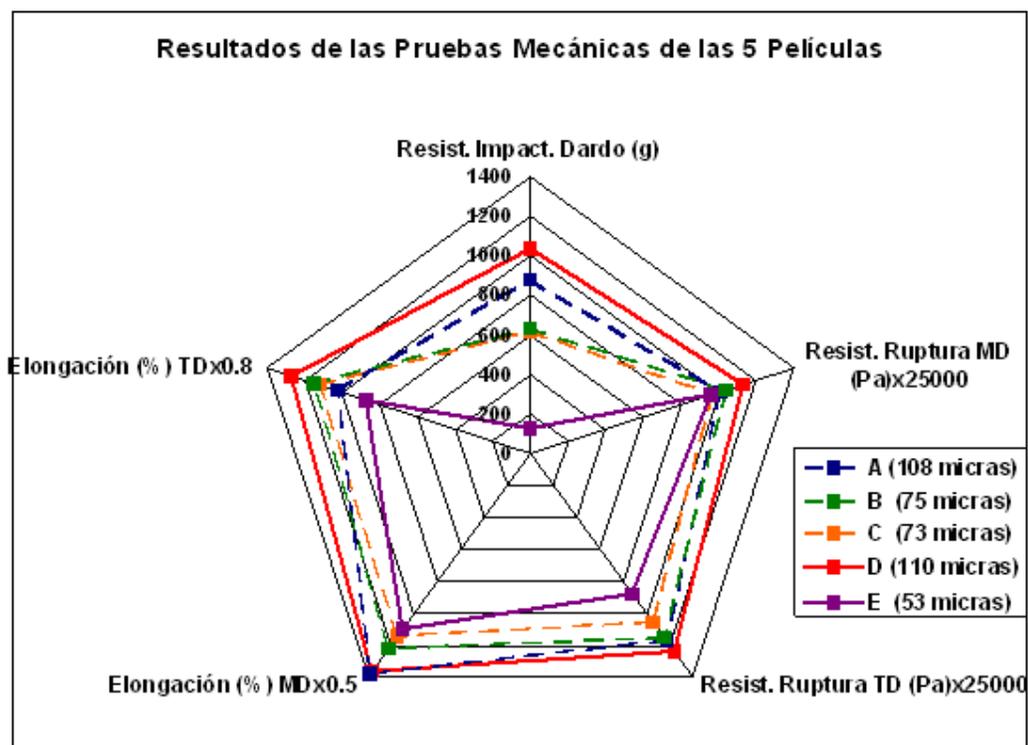


FIGURA 5.1 COMPARACION DE LAS PRUEBAS MECANICAS

Como se puede apreciar de manera global en este gráfico radial, las películas que poseen líneas segmentadas, poseen valores de resistencia aproximadamente similares, y de línea llena se ven las de máxima y mínima resistencia.

Según estos resultados, la película D presenta los mayores valores de resistencia tanto al dardo como a la tensión así también como a la elongación en ambas direcciones (TD y MD), esto se debe a la presencia de HDPE y de METALOCENO en su composición, lo cual le

brinda mayor resistencia a la multicapa por el beneficio que poseen dichas estructuras y también a que posee el mayor espesor de las películas en estudio (110 micras).

Las películas A, B y C, que poseen similares valores de resistencia (líneas segmentadas), obedecen este comportamiento debido a que poseen similares composiciones, estas 3 películas poseen aproximadamente un 30% de LLDPE, y el resto es LDPE, la pequeña diferencia que se puede apreciar en lo referente a las propiedades mecánicas, es regida por la forma del mezclado de estos compuestos en cada capa y espesores de las mismas.

Por otro lado la película E posee los menores valores de resistencia, en comparación a las 3 películas anteriores que poseen un 30% de LLDPE, ya al tener solamente LDPE en su estructura, y el menor espesor de las 5 películas en estudio, presenta los menores valores en las pruebas mecánicas observadas en la figura 5.1

Para poder establecer un mejor criterio de comparación, en el presente estudio, se analizará de aquí en adelante las propiedades mecánicas tomando en cuenta el espesor, que en conjunto con el

análisis de barrera, nos ayudará a globalizar y entender de mejor forma la interrelación entre dichas propiedades.

A continuación se analizará en las figuras 5.2 y 5.3, las propiedades mecánicas y su relación con la propiedad de barrera o permeabilidad de las películas, cabe recalcar, que para un coeficiente de permeabilidad alto, la propiedad de barrera es baja y viceversa.

En la figura 5.2 vamos a aislar y comparar solamente la resistencia al impacto al dardo versus la permeabilidad de la película:

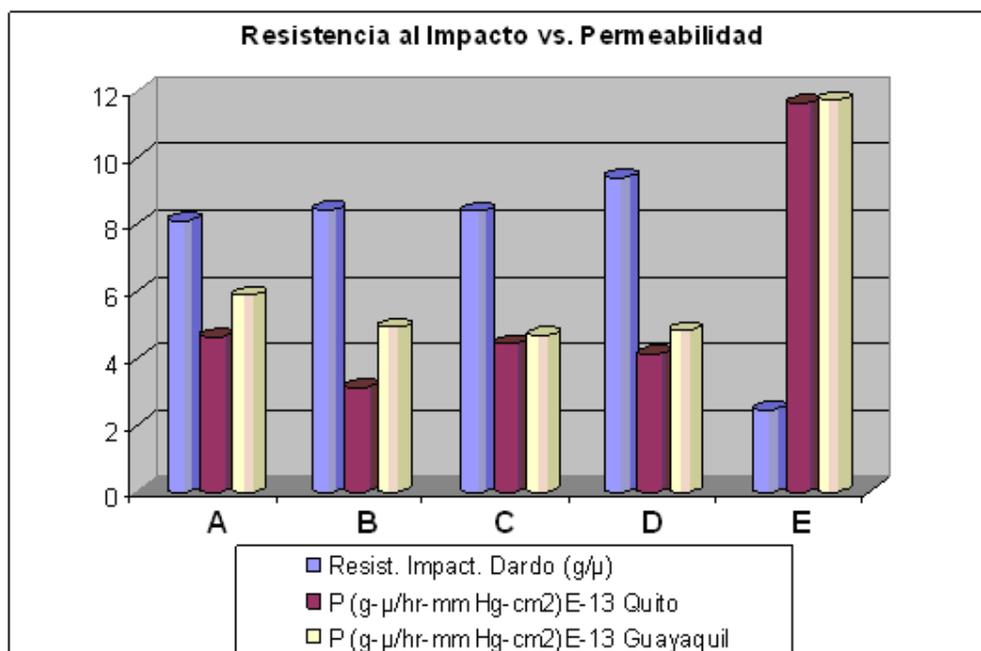


FIGURA 5.2 RESIST. IMPACTO vs. COEF. PERMEABILIDAD

Como se puede observar, existe un comportamiento característico en las 4 primeras películas, no así en la quinta película (E), que es la que más baja resistencia al impacto brinda y con una alta permeabilidad, es decir, una menor barrera.

Si tuviéramos que escoger una película hasta aquí, basándonos en estos 2 parámetros, se escogería a la película D, ya que brinda un valor un poco más alto de resistencia al impacto que el resto, con una buena barrera, es decir un bajo coeficiente de permeabilidad.

En la figura 5.3 vamos a aislar y comparar solamente la resistencia a la ruptura por tensión versus la permeabilidad de la película:

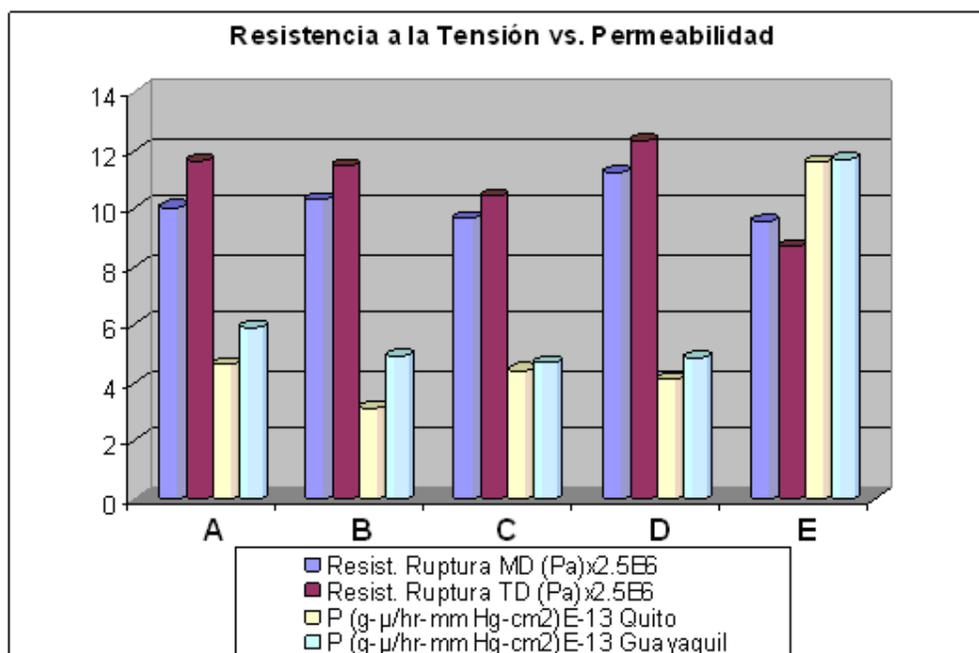


FIGURA 5.3 RESIST. TENSION vs. COEF. PERMEABILIDAD

En este caso las películas poseen valores similares de resistencia a la tensión, los coeficientes de permeabilidad son también similares, a excepción de la película E, que brinda la misma resistencia a la tensión, pero con alta permeabilidad, lo cual no es deseable, si tuviéramos que escoger hasta aquí entre dichas películas, escogeríamos la película D, que nos da un valor ligeramente mayor de resistencia a la tensión, a valores similares de permeabilidad.

En la figura 5.4, se puede apreciar en un gráfico radial de todas las propiedades, tanto mecánicas como de barrera, obtenidas hasta aquí:

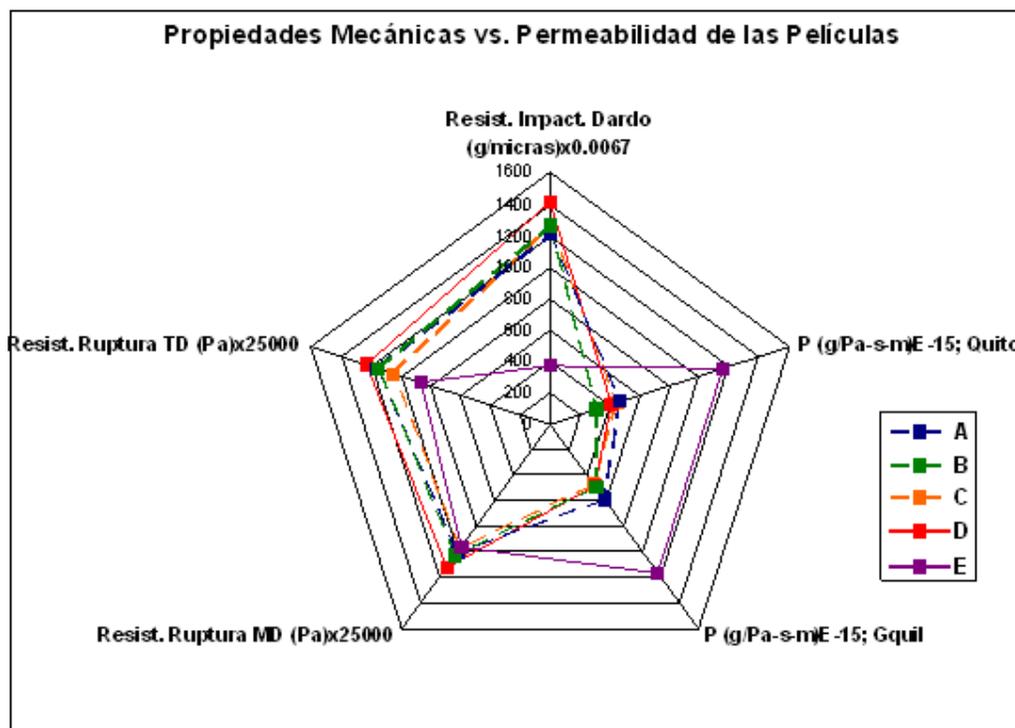


FIGURA 5.4 PROPIEDADES MECANICAS vs. COEF. PERMEABILIDAD

De nuevo se puede apreciar que la película multicapa D posee las mejores propiedades tanto mecánicas como de barrera, se puede notar que esta multicapa posee un coeficiente de permeabilidad sumamente bajo en comparación al resto, es decir, esta tricapa es una excelente barrera al vapor de agua.

Todas estas multicapa tienen un comportamiento similar como se puede apreciar en la figura 5.4, a excepción de la película E, que posee únicamente LDPE en su estructura, y tiene las menores propiedades en comparación al resto de películas en estudio; existen varias razones por las cuales podría explicarse esta situación: mala calidad de materia prima, malas condiciones de procesamiento, y falta de adición de un polímero lineal en su composición.

Haremos una pausa en este asunto para tratar de averiguar y encontrar la raíz de este problema, para esto se debe tomar en cuenta que la resistencia a la tensión (propiedad mecánica) y la permeabilidad (propiedad de barrera) nos dan una perfecta definición de la propiedad intrínseca de la multicapa en ambos casos, ya que nos indican la propiedad tomando en cuenta el espesor. En el ensayo de dardo (en la resistencia al impacto) y en el ensayo de tensión (en el % de elongación), no se encuentra inmiscuido el espesor, lo cual no

nos permite establecer una relación de manera clara y precisa, entonces introduciremos 2 nuevos parámetros para guiarnos: la resistencia específica al impacto (gramos/micras) y la elongación específica (%/micras), ya que al tomar en cuenta el espesor de la multicapa, nos permite tener una idea más clara de lo que esta ocurriendo, en la tabla 33 podemos apreciar la resistencia específica al impacto para las 5 películas en estudio:

TABLA 33			
RESISTENCIA ESPECIFICA AL IMPACTO			
TRICAPA	Peso de Falla por Impacto		
	Peso (g)	Espesor (μ)	Resist. Esp. Impacto (g/ μ)
A	874.95	108	8.10
B	631.125	75	8.42
C	613.4	73	8.40
D	1035.05	110	9.41
E	130.775	53	2.47

Ahora si viendo de manera clara, se vuelve a notar la supremacía en lo referente a la resistencia al impacto, de la película D con respecto a las demás, ya que como se puede apreciar en la tabla 33, esta

película resiste 9.41 gramos de impacto por cada micra de espesor, lo cual es aproximadamente 4 veces mayor a lo que resiste la película E, que tiene un valor bajísimo de resistencia al impacto por micra de espesor de 2.47, también podemos notar que se repite el comportamiento de las 3 películas de similar composición con valores iguales de resistencia al impacto por micra de espesor.

Pero aún esto no nos despeja la duda de lo que ocurre con los bajos valores de resistencia de la película E, para entender esto necesitamos la siguiente tabla 34:

TABLA 34					
ELONGACION ESPECIFICA					
TRICAPA	ELONGACION %		ESPESOR	ELONG. ESPECIF. (%/μ)	
	MD	TD	MICRAS	MD	TD
A	685.14	812.9	108	6.343889	7.526852
B	608.08	916.86	75	8.107733	12.2248
C	570.2	893.6	73	7.810959	12.2411
D	679.4	1014.36	110	6.176364	9.221455
E	543.82	695.26	53	10.26075	13.11811

Como se aprecia en esta tabla 34, la película E, fue la película que tiene mayor porcentaje de elongación por micra de espesor, en ambas direcciones (TD y MD), aunque es más notorio en la dirección MD, donde esto quiere decir que faltó una buena orientación de las cadenas poliméricas, lo que pudo haber sido producido por un bajo valor de DDR, que como se aprecia en la tabla 13 es de 4.79, siendo el valor más bajo de todas las películas.

La película D posee el menor grado de elongación, esto quiere decir que alcanzó una buena orientación de sus cadenas, durante el procesamiento, permitiendo así alinearlas de mejor forma, influenciado también por la presencia de HDPE en su composición, mejorando las propiedades mecánicas, y disminuyendo la permeabilidad al vapor de agua, pero como siempre el factor más importante para toda industria son los costos, estos serán estudiados y analizados a continuación, para un óptimo criterio de comparación entre las películas en estudio.

5.2 Análisis de Costos de Materia Prima vs. Propiedades de las Multicapa

Para comenzar nuestro análisis, debemos conocer el costo de la materia prima utilizada en las películas en estudio, como se mencionó

anteriormente, dichas resinas se importan en sacos de pellets de 25 Kg, en la tabla 35 podemos observar de forma resumida, el costo en dólares por Kilogramo, de las resinas utilizadas:

TABLA 35	
COSTOS DE LAS RESINAS UTILIZADAS	
Resina	Costo (\$/Kg)
LDPE - Dowlex 2085	1.7078
LDPE - Petrothene 143	1.6445
LDPE - Hyundai 110	1.6025
METALOCENO – Exceed 1018	1.6905
HDPE - Hivorex 7000F	1.2760
LLDPE - Dowlex 2101	0.7323

Entonces se procede a realizar el análisis de cada una de las propiedades evaluadas hasta aquí, comparándolas con el costo (de materia prima) que se requiere para la obtención de las mismas, y así conocer cual nos brinda la mejor relación costo-beneficio, tanto de manera individual para cada una de las propiedades, y de manera global tomando en cuenta todas ellas, con relación al costo de la película.

En las tablas 36, 37, 38, 39 y 40 se muestran los costos en dólares específicos para cada capa, y el total por metro cuadrado de las películas en estudio:

TABLA 36					
COSTO DE LA PELICULA A					
Espesor	Área	Volumen	Densidad	Costo	
micras	m ²	m ³	Kg/m ³	\$/Kg	\$/m ²
40	1	0.00004	922	1.1674	0.0430537
34	1	0.000034	920	1.6025	0.0501262
34	1	0.000034	921.6	1.25442	0.0393065
Costo Total por m ² :					0.1324864

TABLA 37					
COSTO DE LA PELICULA B					
Espesor	Área	Volumen	Densidad	Costo	
micras	m ²	m ³	Kg/m ³	\$/Kg	\$/m ²
27	1	0.000027	922	1.1674	0.02906
24	1	0.000024	920	1.6025	0.03538
24	1	0.000024	921.52	1.271824	0.02813
Costo Total por m ² :					0.09257

TABLA 38					
COSTO DE LA PELICULA C					
Espesor	Área	Volumen	Densidad	Costo	
micras	m ²	m ³	Kg/m ³	\$/Kg	\$/m ²
27	1	0.000027	923	0.94985	0.02367
23	1	0.000023	920	1.6025	0.03391
23	1	0.000023	921.32	1.315334	0.02787
Costo Total por m ² :					0.08545

TABLA 39					
COSTO DE LA PELICULA D					
Espesor	Área	Volumen	Densidad	Costo	
micras	m ²	m ³	Kg/m ³	\$/Kg	\$/m ²
36	1	0.000036	922.4	1.6553	0.05497
37	1	0.000037	938	1.43925	0.04995
37	1	0.000037	922.4	1.6553	0.05649
Costo Total por m ² :					0.16141

TABLA 40					
COSTO DE LA PELICULA E					
Espesor	Área	Volumen	Densidad	Costo	
micras	m ²	m ³	Kg/m ³	\$/Kg	\$/m ²
19	1	0.000019	920.6	1.69514	0.02965
15	1	0.000015	919	1.6445	0.02267
19	1	0.000019	920.6	1.69514	0.02965
Costo Total por m ² :					0.08197

Como se puede apreciar la película D, es la más cara de todas (0.16141 \$/m²), llegándose aproximadamente a duplicar el costo en comparación con las películas E, C, y B, la película A tiene también un alto costo (0.1324 \$/m²), siendo la película E la de menor costo de todas (0.08197 \$/m²).

Estos valores solo nos dan una referencia en los costos, no nos podemos guiar con estos para poder establecer un correcto criterio de selección, sobre cual resulta más conveniente entre ellas, tomando en cuenta propiedades y el factor económico.

Para esto se realiza a continuación el análisis entre costos versus propiedades, lo cual nos permitirá de manera correcta comparar la relación costo-beneficio que nos brinda cada una de las películas en estudio.

En la figura 5.5 se aprecia la gráfica de resistencia al impacto al dardo versus el costo (de materia prima) de las películas:

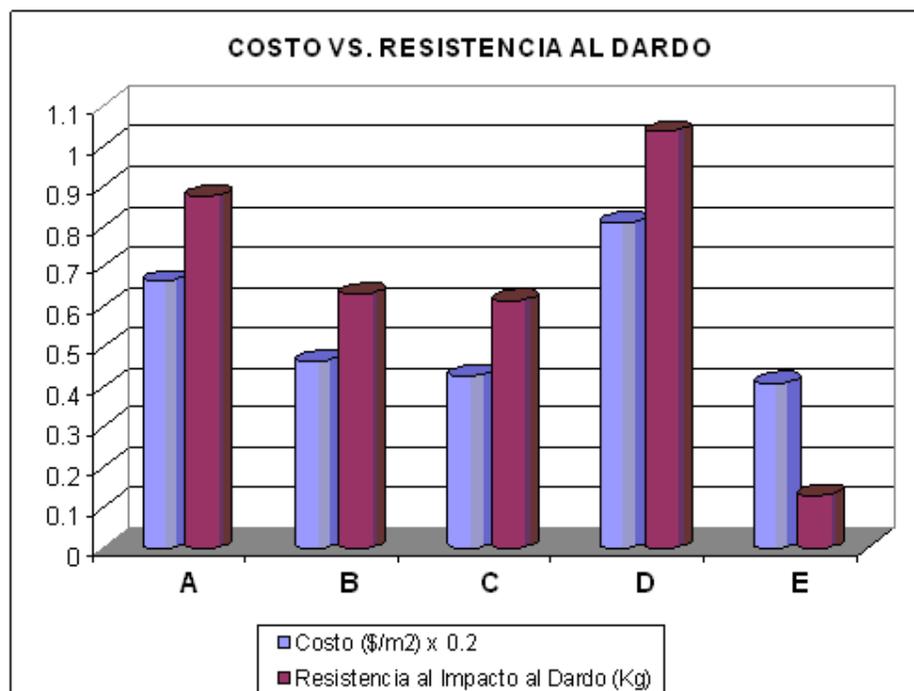


FIGURA 5.5 COSTO vs. RESISTENCIA AL IMPACTO AL DARDO

Como se puede apreciar, la película que brinda menor resistencia al impacto a un alto costo es la película E, entonces este factor de

beneficio/costo, en este caso propiedad/costo, es el que decide finalmente para un criterio de selección en las industrias, entonces tomando como referencia esta relación, en base al menor que es la película E, tenemos que la película A nos da 4.14 veces mayor beneficio (o propiedad al impacto) para cada dólar de inversión, la película B 4.27 veces, la película C 4.5 veces, y la película D 4.02 veces mayor, todas estas en relación a la película E.

Entonces la película óptima para trabajar a condiciones de impacto o perforado, de entre las multicapa en estudio por tener la mayor relación propiedad/costo, es la película C (usualmente utilizada para almacenar leche) y como todos sabemos es para lo que es diseñada la misma, ya que estas fundas en los camiones distribuidores sufren condiciones de manipulación extrema.

Ahora analizaremos la relación resistencia a la tensión/costo, para conocer cual de las películas nos resultaría más beneficiosa en este tipo de condiciones, en la figura 5.6 se aprecia la gráfica de resistencia a la ruptura por tensión versus el costo (de materia prima) de las películas:

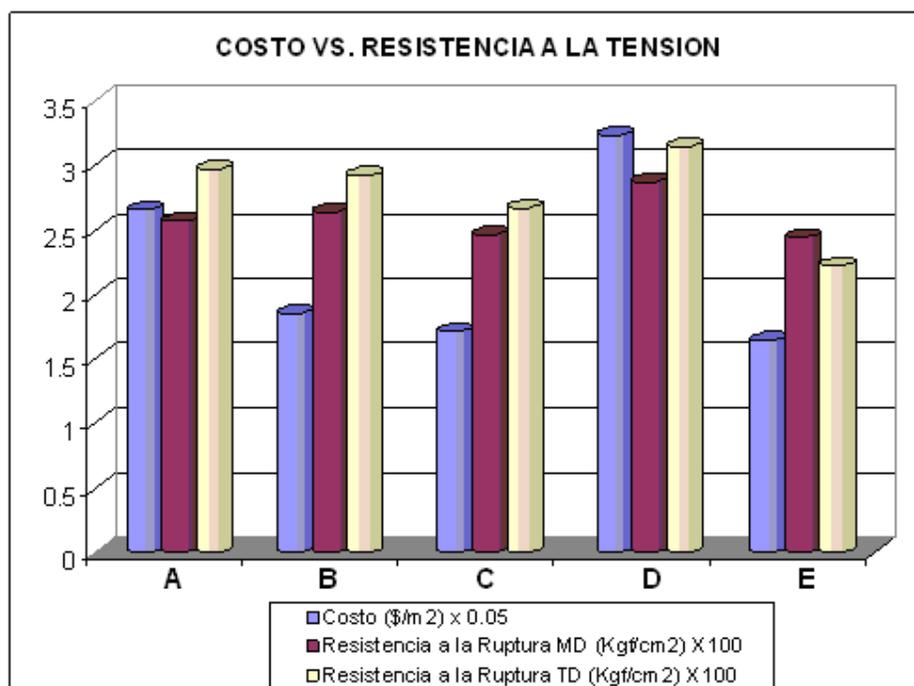


FIGURA 5.6 COSTO vs. RESISTENCIA A LA TENSION

Como se puede apreciar la película que da menor resistencia la ruptura por tensión en ambas direcciones (MD y TD), a un alto costo es la película D, entonces este factor de beneficio/costo, en este caso propiedad/costo, es el que decide finalmente, en contradicción a lo analizado en la primera parte del capítulo, que escogía esta película por tener mayor resistencia, al introducir este factor del costo vemos que dicha película no nos resulta provechosa desde el punto de vista económico.

Entonces tomando como referencia esta relación, en base al menor que es la película D, tenemos que la película A nos da aproximadamente 1.1 veces mayor beneficio (o resistencia a la ruptura) por cada dólar de inversión, la película B 1.6 veces, la película C igualmente 1.6 veces, estas 3 últimas tienen el mismo valor para ambas direcciones, la película E nos da 1.67 veces mayor en MD y 1.39 en TD, todas estas en relación a la película D.

Entonces las películas óptimas para trabajar a condiciones de ruptura por tensión, de entre las multicapa en estudio por tener la mayor relación propiedad/costo, son las películas C y B, lo cual es algo lógico ya que estas fundas en los camiones distribuidores son apiladas y soportan debido al peso de los alimentos que almacenan, grandes esfuerzos de tensión, en ambas direcciones.

Ahora analizaremos la relación elongación/costo, para conocer cual de las películas posee la mayor capacidad para absorber energía, antes de romperse, aunque el factor principal en este tipo de esfuerzos de tensión, es el anterior, es decir la resistencia a la ruptura, esto nos indica y da una idea del comportamiento de nuestras películas sometidas a elongaciones.

En la figura 5.7 se aprecia la gráfica de elongación máxima a la ruptura versus el costo (de materia prima) de las películas:

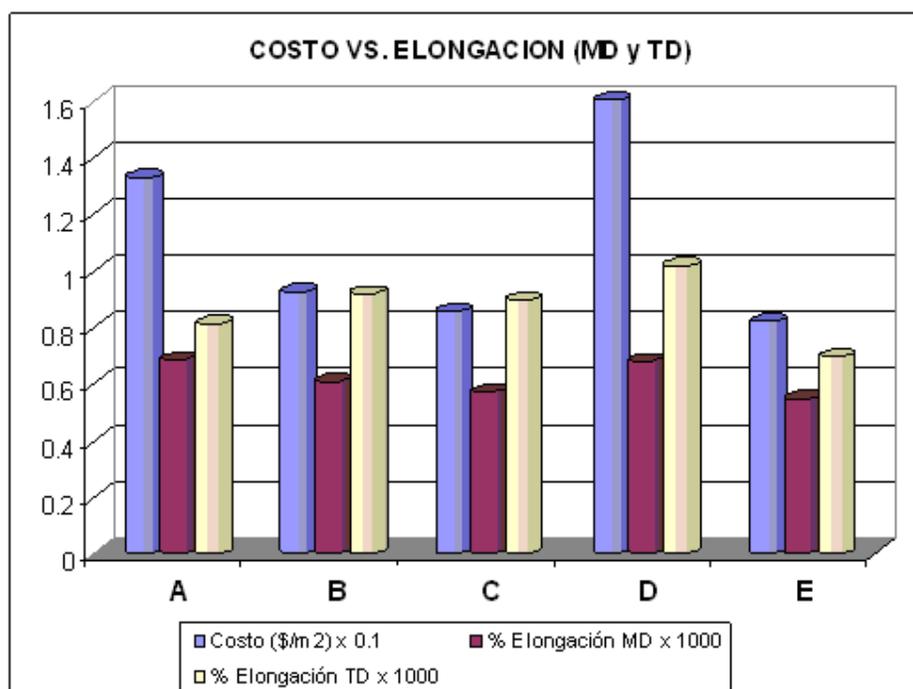


FIGURA 5.7 COSTO vs. ELONGACION (MD y TD)

Como se puede apreciar la película que da menor elongación máxima a la ruptura por tensión en ambas direcciones (MD y TD), a un costo mayor es otra vez la película D, entonces queda claro que esta película que en un principio pensamos que era la mejor por brindar propiedades altas, no nos resulta provechosa desde el punto de vista económico.

Entonces tomando como referencia esta relación, en base al menor que es la película D, tenemos que la película A nos da aproximadamente 1.10 veces mayor beneficio (o resistencia a la ruptura) por cada dólar de inversión, la película B 1.58 veces, la película C 1.65 veces, estas 3 últimas tienen aproximadamente el mismo valor para ambas direcciones, la película E nos da 1.58 veces mayor en MD y 1.38 en TD, todas estas en relación a la película D.

Entonces las películas óptimas para trabajar a condiciones elongación por tensión, de entre las multicapa en estudio por tener la mayor relación propiedad/costo, son definitivamente las películas C y B.

Ahora analizaremos la relación barrera/costo, o permeabilidad/costo, para conocer cual de las películas posee la mayor barrera (menor permeabilidad), para de esta manera maximizar el SHELF LIFE del producto a envasar.

En la figura 5.8 se aprecia la gráfica de permeabilidad versus el costo (de materia prima) de las películas:

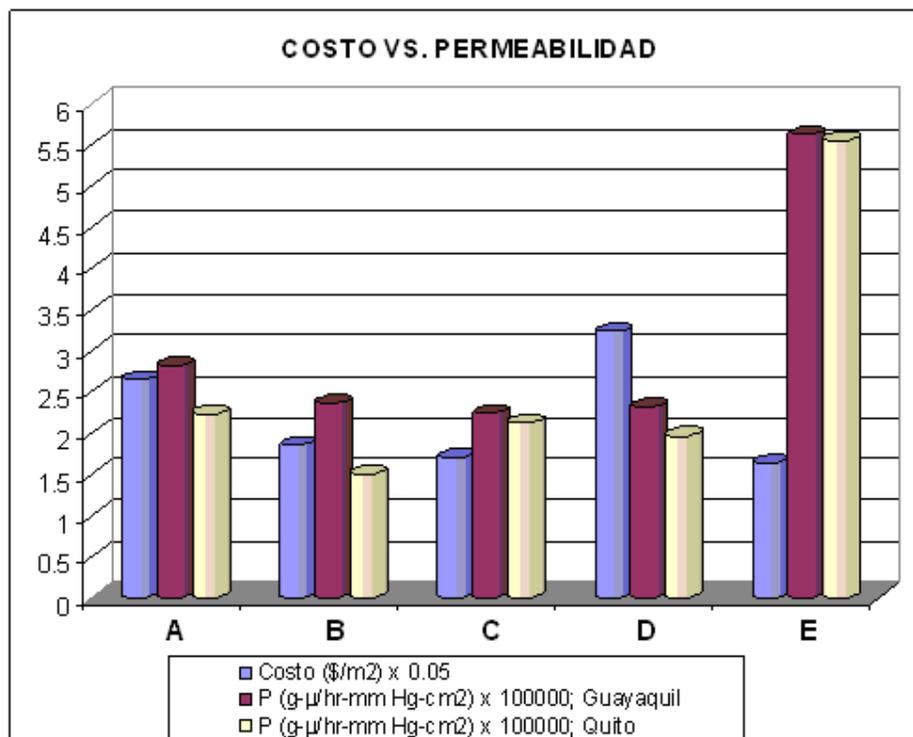


FIGURA 5.8 COSTO vs. PERMEABILIDAD

La película que nos da mayor barrera a un costo menor en Guayaquil es la película C, tomando como referencia esta relación y sabiendo que una baja permeabilidad significa una alta y excelente propiedad de barrera al vapor de agua, en base a esta película, tenemos que la película A nos da 1.95 veces menor barrera por cada dólar de inversión, la película B 1.14 veces menor, la película D 1.96 veces menor, y la película E 2.41 veces menor barrera para Guayaquil.

Para Quito la película B nos brinda el mayor beneficio y en base a ésta tenemos que la película A nos da 2.13 veces menor barrera por

cada dólar de inversión, la película C 1.3 veces menor, la película D 2.29 veces menor, y la película E 3.28 veces menor barrera para esta ciudad.

Entonces la película óptima para barrera por tener la mayor relación barrera/costo, es la película C para Guayaquil, y la película B para Quito. Estas películas nos permiten un mayor tiempo de almacenamiento SHELF LIFE, en relación a las demás películas en estudio, por cada dólar invertido. En la figura 5.9 se puede observar el gráfico radial de propiedades vs. costos de todas las películas:

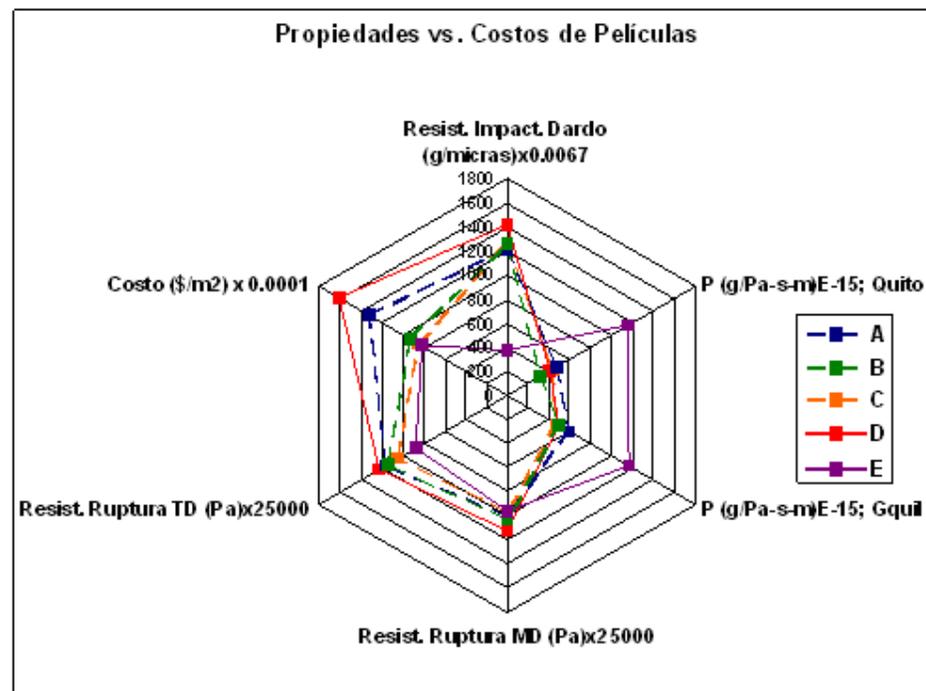


FIGURA 5.9 PROPIEDADES vs. COSTOS DE PELÍCULAS

En esta última figura 5.9 se pudo observar de forma global todas las propiedades y costos relacionados entre sí, el cual fue el objetivo de este subcapítulo.

5.3 Análisis de Variación de la Permeabilidad con el Cambio de Temperatura

Para poder establecer el patrón del comportamiento de las películas en estudio, como se estudió en el capítulo 3, las películas plásticas se comportan mediante el modelo de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3.25):

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

Para nuestro caso en particular, debido a que para nuestras películas multicapa en estudio, no conocemos el dato de la energía de activación E_p , se evaluó el coeficiente de permeabilidad a dos diferentes temperaturas, para mediante esta ecuación, poder encontrar la energía de activación de las películas, y mediante el modelo de Arrhenius poder conocer cómo varía la permeabilidad de cada película a diferentes temperaturas.

Para esto, tenemos los datos de permeabilidad de todas la películas en estudio, para 2 temperaturas: 21°C (294.15°K) y 31.67°C

(304.82°K), la constante universal de gases, $R = 8.314 \text{ Joule/mol}^\circ\text{K}$, y con dichos datos se obtiene la energía de activación de las películas, los resultados se muestran en la siguiente tabla 41:

TABLA 41					
ENERGIA DE ACTIVACION (E_p) DE LAS PELÍCULAS					
	g- μ /hr-mm Hg-cm ²		° Kelvin		kJ/mol
PELICULA	P1	P2	T1	T2	E_p
A	2.23E-05	2.82E-05	294	304.67	16.38329
B	1.50E-05	2.36E-05	294	304.67	31.63073
C	2.12E-05	2.24E-05	294	304.67	3.84288
D	1.97E-05	2.32E-05	294	304.67	11.41379
E	5.55E-05	5.62E-05	294	304.67	0.87479

La energía de activación nos indica la tendencia que tienen las moléculas para reaccionar al absorber energía (kJ/mol), en nuestro caso, la mayor facilidad al movimiento que obtienen las cadenas poliméricas con el aumento de la temperatura, facilitando así la permeación del vapor de agua por los espacios libres que se forman debido al movimiento de las cadenas en la zona amorfa del polímero.

Entonces mientras más pequeño sea el valor de la energía de activación, el rango de variación de la permeabilidad de las películas, será menor con el cambio de temperatura.

Como se puede apreciar en la tabla 41 la película E es la que menor valor de energía de activación posee, esto quiere decir que la permeabilidad no varía mucho con el cambio de temperatura, y el valor del coeficiente de permeabilidad en Guayaquil, se lo puede utilizar para el diseño de empaque para otras ciudades, sin que el error sea considerable, por lo contrario, la película B varía notoriamente con el cambio de temperatura, ya que posee el mayor valor de energía de activación, y sería un grave error diseñar utilizando esta película, un empaque con un valor de coeficiente de permeabilidad en una ciudad, para un empaque que va a ser utilizado en otra.

En las figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 Y 5.14, mediante el uso de la energía de activación, se puede apreciar el comportamiento del coeficiente de permeabilidad en función de la temperatura para las 5 películas, y observar así de mejor manera como se interrelacionan ambos factores:

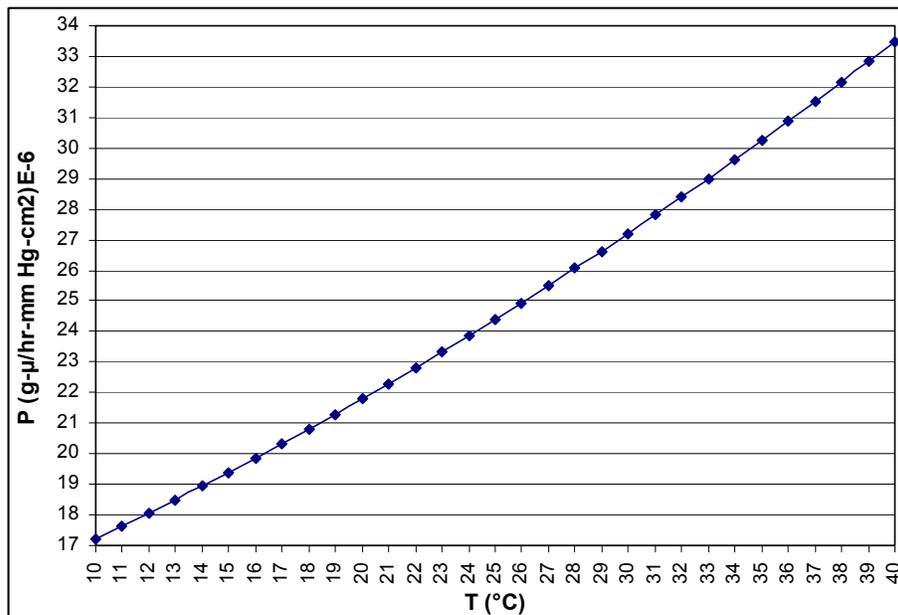


FIGURA 5.10 VARIACION DEL COEF. PERMEABILIDAD CON LA TEMPERATURA DE TRICAPA A

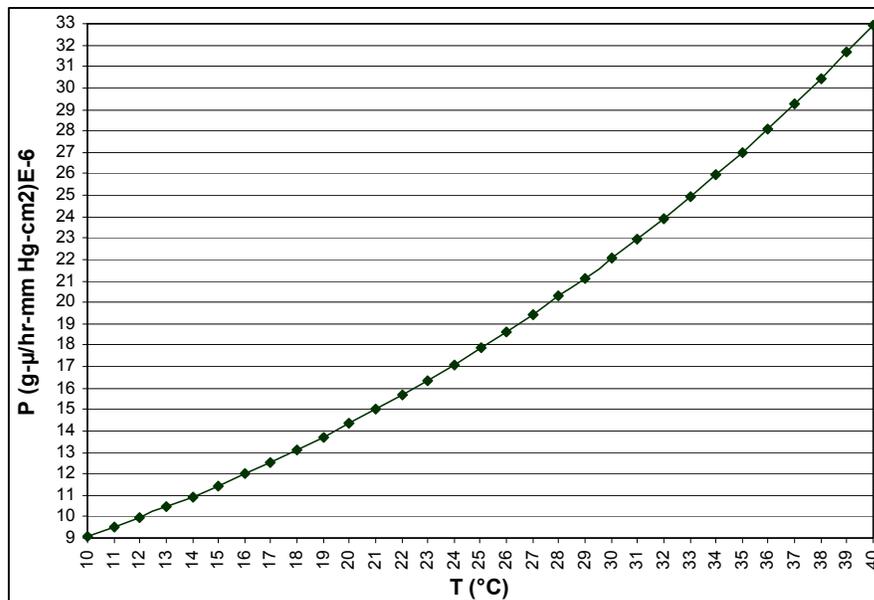


FIGURA 5.11 VARIACION DEL COEF. PERMEABILIDAD CON LA TEMPERATURA DE TRICAPA B

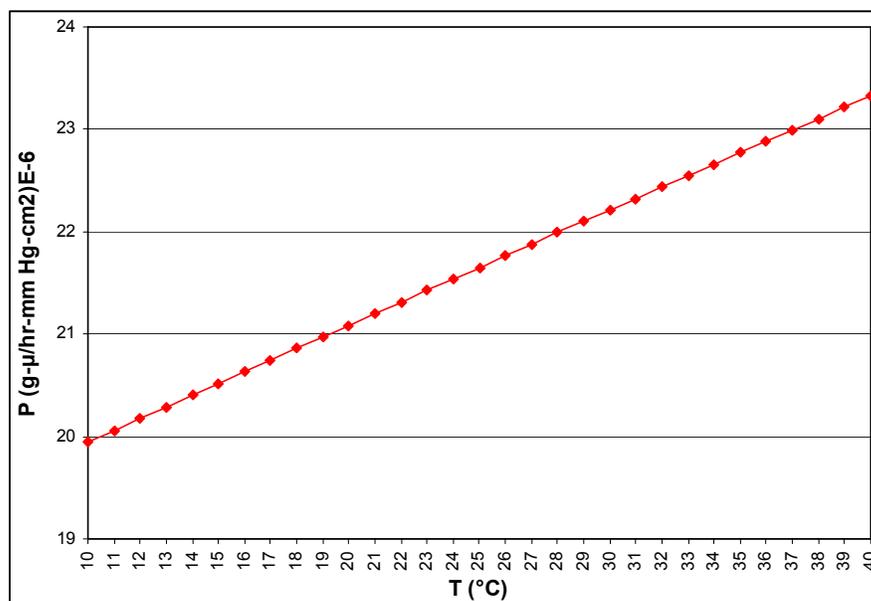


FIGURA 5.12 VARIACION DEL COEF. PERMEABILIDAD CON LA TEMPERATURA DE TRICAPA C

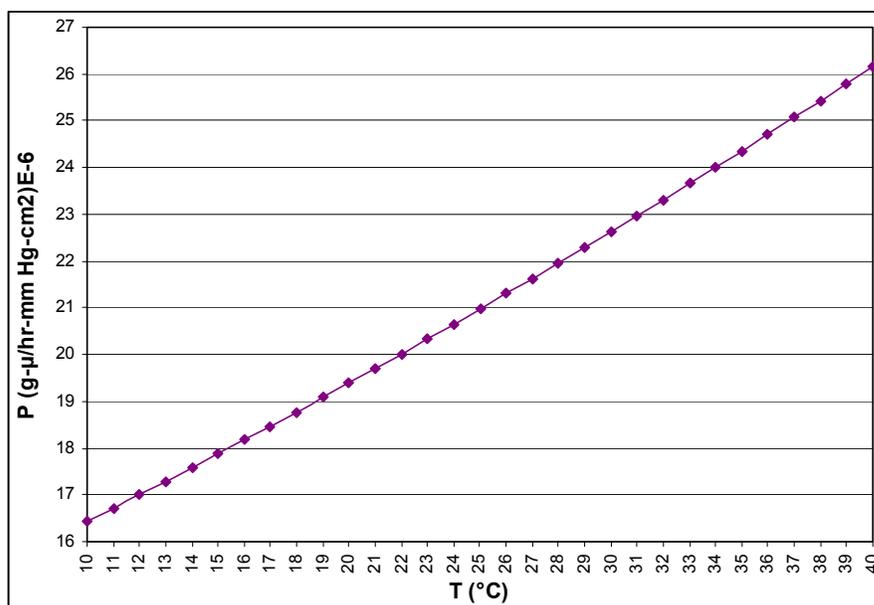


FIGURA 5.13 VARIACION DEL COEF. PERMEABILIDAD CON LA TEMPERATURA DE TRICAPA D

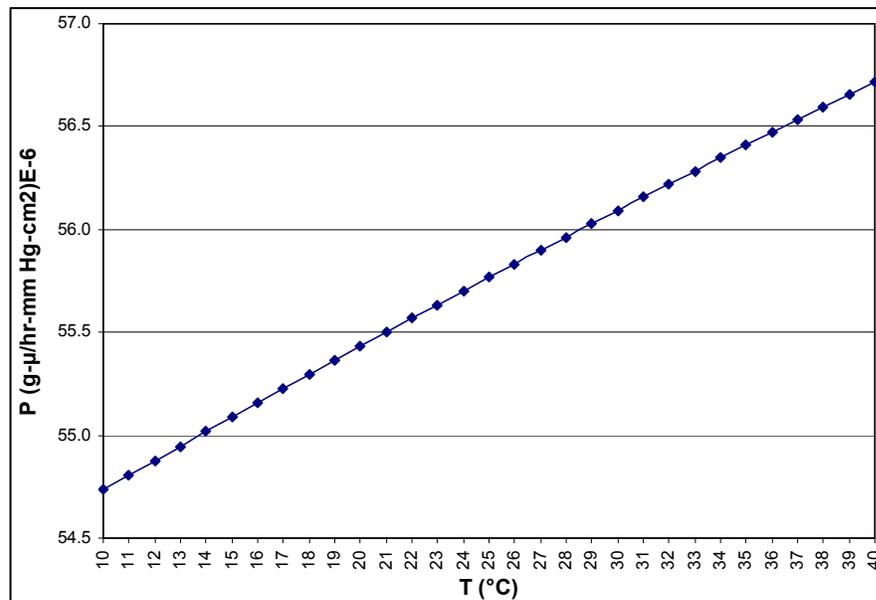


FIGURA 5.14 VARIACION DEL COEF. PERMEABILIDAD CON LA TEMPERATURA DE TRICAPA E

Como se puede observar en estas gráficas, se muestra un intervalo de temperaturas de 10°C a 40°C, que es el rango de temperaturas que usualmente poseen las diversas regiones del país.

En dicho intervalo de 30°C de diferencia, se observa la variación de la permeabilidad en dicho rango, así tenemos que para la película A, en ese intervalo de 30°C, es decir al ir de 10°C a 40°C, la permeabilidad de esta película aumenta aproximadamente en un 97%, y diseñar o pensar que este empaque tendría el mismo comportamiento en diferentes ciudades con condiciones ambientales distintas, sería un

gravísimo error, y por lo tanto el producto perdería su calidad rápidamente, y ocasionaría reclamos a la industria por parte de los clientes.

Siguiendo dicho intervalo de 10°C a 40°C, la película B aumenta aproximadamente en un 267% su coeficiente de permeabilidad, siendo este caso mucho más crítico inclusive que la anterior película, de igual manera en dicho intervalo, la película C aumenta en un 17%, la película D aumenta en un 59.8 %, y la película E aumenta en un 3.7%, entonces se podría utilizar el mismo coeficiente de permeabilidad para esta película, con un margen de error muy pequeño, no así para el resto de las películas.

Este fenómeno de variación de permeabilidad debido a la temperatura, como se estudió en el capítulo 3, se debe al aumento en la movilidad de las cadenas poliméricas, lo que se traduce en una reiterativa creación y movilización de los espacios libres en la región amorfa del polímero semicristalino, donde ocurre casi el 99% de la permeación de las moléculas de vapor de agua.

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

Mediante el análisis anterior, ya conocemos como varía la permeabilidad y cual debe ser el coeficiente de permeabilidad que debemos utilizar para un correcto cálculo de SHELF LIFE de los productos.

Vimos que la temperatura influye de gran manera, pero para el presente análisis se observará que la humedad relativa del ambiente, influye también enormemente en el SHELF LIFE del producto, así que para dos ciudades con igual temperatura, el SHELF LIFE variará si dichas ciudades poseen humedades relativas diferentes, a pesar de tener igual temperatura.

Para esto debemos utilizar la fórmula para calcular el SHELF LIFE, que se vio en el capítulo 3 del presente estudio (ecuación 3.26):

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

Entonces despejando **t** de la ecuación 3.26

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

Donde:

ℓ : Espesor en micras

P_T : Coeficiente de permeabilidad total de la multicapa en g-
 μ /hr-mmHg-cm²

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

A : Área del empaque en cm²

q : Cantidad de H₂O ganada o perdida por el producto en g

Δp : Diferencia de presión en ambos lados del empaque, mmHg

Como sabemos de la ecuación 3.27, que la diferencia de presión en ambos lados del empaque es:

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

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, osea en la condición deseada de almacenamiento del mismo, y HR_{in} es la humedad relativa promedio del interior del empaque, valor que se lo obtiene de la isoterma de adsorción.

Entonces procedemos a calcular el SHELF LIFE, de empaques producidos con las películas multicapa en estudio, para condiciones ambientales de Quito y Guayaquil, para 4 productos: Cereal de Trigo, Galletas, Papas Chips y Agua.

Cálculo de Shelf Life para empaques de Cereal de Trigo, utilizando las películas en estudio:

Vamos a establecer el tiempo de almacenamiento (SHELF LIFE) de este producto, para todas las películas en estudio, a diferentes temperaturas y humedades de Guayaquil y Quito, para esto almacenaremos 25 g de cereal de trigo, en empaques de 5 cm x 10 cm.

Para este cálculo se necesita la Isoterma de Adsorción para Cereal de Trigo, esta isoterma nos relaciona la actividad de agua vs. la humedad en el interior del empaque, siendo este último es el valor que necesitamos; dependiendo de la actividad de agua inicial, y la actividad de agua crítica de este alimento, se obtiene un valor promedio de humedad dentro del empaque, dicha isoterma se la puede observar en la siguiente figura 5.15:

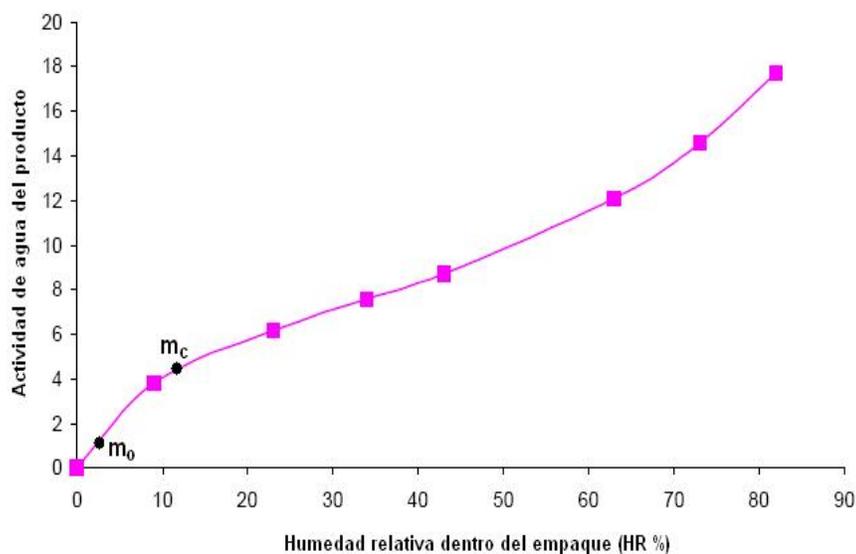


FIGURA 5.15 ISOTERMA DE ADSORCION PARA CEREAL DE TRIGO

Se puede observar que la actividad de agua inicial es 0.01 y la actividad de agua crítica es 0.045, donde el cereal pierde su característica crujiente, entonces la masa de agua ganada en este intervalo por el alimento es $q = 25 \text{ g} (0.045 - 0.01) = 0.875 \text{ g}$, y la humedad promedio dentro del empaque (headspace) durante este proceso es aproximadamente 8% HR.

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 42, 43, 44, 45 y 46:

TABLA 42						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN TRICAPA A						
	Guayaquil			Quito		
	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
ℓ	108	108	108	108	108	108
P_T :	2.85E-05	2.44E-05	2.18E-05	2.34E-05	2.08E-05	1.89E-05
A	100	100	100	100	100	100
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}	80	80	80	50	50	50
HR _{in}	8	8	8	8	8	8
Δp :	26.397	17.104	12.625	8.849	6.500	5.107
t (hrs)	1256.1	2264.3	3433.5	4564.0	6989.3	9790.9
t (días)	52.3	94.3	143.1	190.2	291.2	408.0

Como se aprecia en la tabla 42, vemos como cambia drásticamente el SHELF LIFE, desde la condición más severa en Guayaquil (32°C y 80% HR) con $t = 52.3$ días, a la condición menos drástica en Quito (14°C y 50% HR) con un $t = 408$ días, donde el producto se puede conservar un tiempo aproximadamente 8 veces mayor.

De la misma forma en la tabla 43 se aprecia para la película B el SHELF LIFE de este producto, con las condiciones de Guayaquil y Quito:

TABLA 43						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN TRICAPA B						
	Guayaquil			Quito		
	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
ℓ	75	75	75	75	75	75
$P_T :$	2.40E-05	1.80E-05	1.43E-05	1.64E-05	1.32E-05	1.10E-05
A	100	100	100	100	100	100
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}	80	80	80	50	50	50
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
$\Delta p :$	26.397	17.104	12.625	8.849	6.500	5.107
t (hrs)	1035.9	2131.5	3634.9	4522.2	7648.2	11682.3
t (dias)	43.2	88.8	151.5	188.4	318.7	486.8

Esta película si observamos detenidamente presenta altos valores de SHELF LIFE, para condiciones de Quito, no así para Guayaquil.

En la tabla 45 se analiza el SHELF LIFE de la película C:

TABLA 44						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN TRICAPA C						
	Guayaquil			Quito		
	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
ℓ	73	73	73	73	73	73
P_T :	2.25E-05	2.16E-05	2.11E-05	2.14E-05	2.08E-05	2.04E-05
A	100	100	100	100	100	100
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}	80	80	80	50	50	50
HR _{in}	8	8	8	8	8	8
Δp :	26.397	17.104	12.625	8.849	6.500	5.107
t (hrs)	1077.8	1728.9	2397.8	3373.2	4724.2	6131.3
t (días)	44.9	72.0	99.9	140.6	196.8	255.5

Con esta película se obtienen tiempos de almacenamiento más pequeños, ninguno supera el año de almacenamiento.

En la siguiente tabla 44 se analiza a la película D:

TABLA 45						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN TRICAPA D						
	Guayaquil			Quito		
	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
ℓ	110	110	110	110	110	110
P_T :	2.33E-05	2.10E-05	1.94E-05	2.03E-05	1.88E-05	1.76E-05
A	100	100	100	100	100	100
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}	80	80	80	50	50	50
HR _{in}	8	8	8	8	8	8
Δp :	26.397	17.104	12.625	8.849	6.500	5.107
t (hrs)	1564.9	2679.6	3929.7	5358.4	7876.0	10708.8
t (dias)	65.2	111.7	163.7	223.3	328.2	446.2

Esta película presenta altos valores de SHELF LIFE, para el clima de Guayaquil, y altos valores también para las condiciones de Quito, donde se supera el año para almacenamiento en percha.

A continuación la tabla 46 de SHELF LIFE de la tricapa E:

TABLA 46						
SHELF LIFE PARA CEREAL DE TRIGO EMPACADO EN TRICAPA E						
	Guayaquil			Quito		
	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
ℓ	53	53	53	53	53	53
P_T :	5.62E-05	5.58E-05	5.54E-05	5.56E-05	5.53E-05	5.51E-05
A	100	100	100	100	100	100
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}	80	80	80	50	50	50
HR_{in}	8	8	8	8	8	8
Δp :	26.397	17.104	12.625	8.849	6.500	5.107
t (hrs)	312.6	485.9	663.0	942.6	1290.1	1649.6
t (dias)	13.0	20.2	27.6	39.3	53.8	68.7

Esta película presenta valores pequeños de SHELF LIFE, debido a su menor espesor y baja propiedad de barrera, como se vio anteriormente es la que menor barrera posee de las 5 películas en

estudio, llegando en Guayaquil a caducar el producto a los 13 días de almacenamiento, y 68 días en Quito, siendo ambos valores muy bajos en la industria de empaques alimenticios.

Cálculo de Shelf Life para empaques de Galletas, utilizando las películas en estudio:

Al igual que en el caso anterior, supondremos que vamos a empaquetar 25 g de galletas, en empaques de 5 cm x 10 cm. La isoterma de adsorción para la galleta se la puede observar en la siguiente figura 5.16:

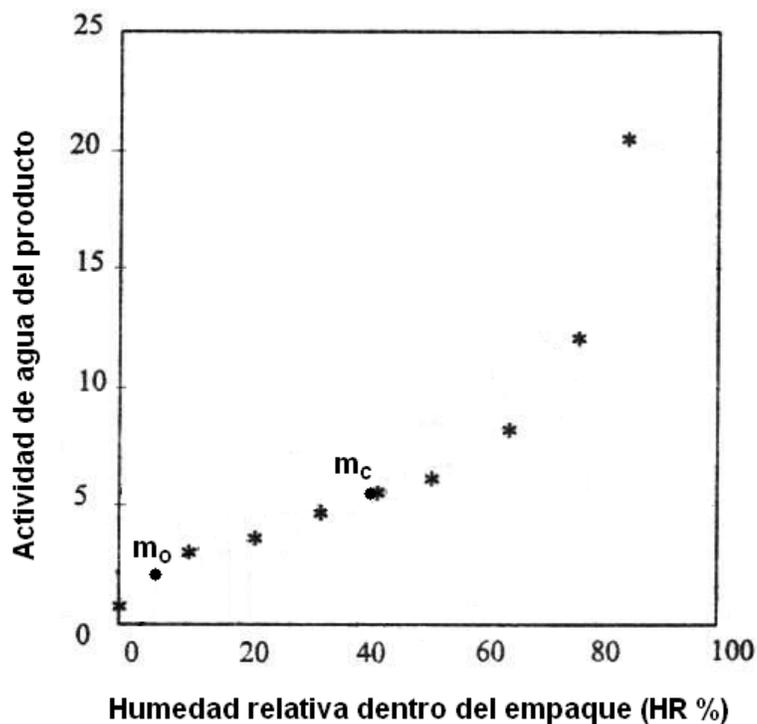


FIGURA 5.16 ISOTERMA DE ADSORCION PARA GALLETAS

Se puede observar que la actividad de agua inicial es 0.02 y la actividad de agua crítica es 0.055, donde la galleta pierde su característica crocante, entonces la masa de agua ganada en este intervalo por el alimento es $q = 25 \text{ g} (0.055 - 0.02) = 0.875 \text{ g}$, y la humedad promedio dentro del empaque (headspace) durante este proceso es aproximadamente 25.5% HR.

Con estos datos se procede a calcular t (SHELF LIFE), así que se repite el procedimiento con los mismos datos anteriores, pero con la diferencia que la humedad relativa en el headspace toma el valor de 25.5 % HR en vez de 8% HR que era en el caso anterior. En la tabla 47 se presenta los resultados:

TABLA 47						
SHELF LIFE PARA GALLETAS, EN DIAS						
	Guayaquil (80 % HR)			Quito (50 % HR)		
EMPAQUE	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
A	69.1	124.6	189.0	326.0	499.2	699.4
B	57.0	117.3	200.1	323.0	546.3	834.5
C	59.3	95.2	132.0	240.9	337.4	438.0
D	86.1	147.5	216.3	382.7	562.6	764.9
E	17.2	26.7	36.5	67.3	92.1	117.8

Cálculo de Shelf Life para empaques de Papas Chips, utilizando las películas en estudio:

De similar forma vamos a empaquear 25 g de Papas Chips, en empaques de 5 cm x 10 cm. La isoterma de adsorción para las papas chips se la puede observar en la siguiente figura 5.17:

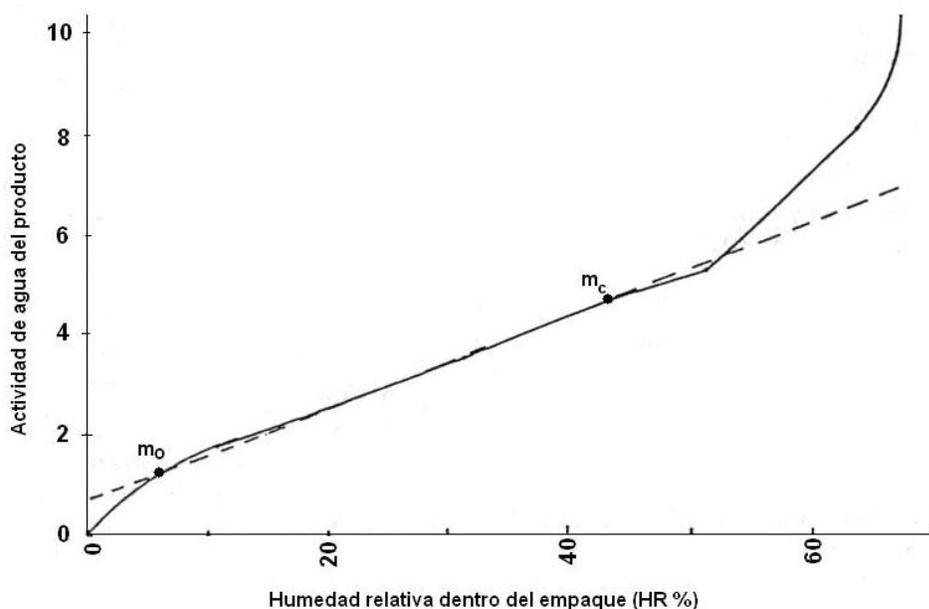


FIGURA 5.17 ISOTERMA DE ADSORCION PARA PAPAS CHIPS

Se puede observar que la actividad de agua inicial es 0.013 y la actividad de agua crítica es 0.047, la masa de agua ganada en este intervalo por el alimento es $q = 25 \text{ g} (0.047 - 0.013) = 0.85 \text{ g}$, y la humedad promedio dentro del empaque (headspace) durante este proceso es aproximadamente 25% HR.

Con estos datos se procede a calcular t (SHELF LIFE), así que se repite el procedimiento con los mismos datos anteriores, pero con la diferencia que la humedad relativa en el headspace toma el valor de 25% HR y $q = 0.85$ g. En la tabla 48 se presenta los resultados:

TABLA 48						
SHELF LIFE PARA PAPAS CHIPS EN DIAS						
	Guayaquil (80 % HR)			Quito (50 % HR)		
EMPAQUE	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
A	66.6	120.0	181.9	310.4	475.3	665.8
B	54.9	112.9	192.6	307.5	520.1	794.4
C	57.1	91.6	127.1	229.4	321.2	416.9
D	82.9	142.0	208.2	364.4	535.6	728.2
E	16.6	25.7	35.1	64.1	87.7	112.2

En estos 3 productos el viaje de las moléculas de vapor de agua tiene lugar de afuera hacia adentro del empaque, debido a que el interior del mismo se encuentra a una menor humedad relativa que por fuera del empaque.

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

A continuación analizaremos el SHELF LIFE de empaques que contienen agua, donde dentro del empaque habrá una humedad de aproximadamente 100 %HR, y por afuera una menor humedad relativa, en este caso el viaje de las moléculas tendrán lugar en esa dirección (de adentro hacia fuera del empaque).

De similar forma vamos empacaremos 25 g de agua, en empaques de 5 cm x 10 cm. En este caso consideraremos que el producto caduca, cuando pierde el 10% de su contenido (a manera de ejemplo), es decir que $q = 25 \text{ g} (0.10) = 2.5 \text{ g}$, y la humedad promedio dentro del empaque (headspace) durante este proceso se mantendrá aproximadamente al 100% HR.

Con estos datos procedemos a calcular t (SHELF LIFE), así que se repite el procedimiento con los mismos datos anteriores, pero con la diferencia que la humedad relativa en el headspace toma el valor de 100% HR y $q = 2.5 \text{ g}$. En la tabla 49 se presenta los resultados obtenidos:

TABLA 49						
SHELF LIFE PARA AGUA EN DIAS						
	Guayaquil (80 % HR)			Quito (50 % HR)		
EMPAQUE	32°C	25°C	20°C	23°C	18°C	14°C
A	538.3	970.4	1471.5	456.4	698.9	979.1
B	443.9	913.5	1557.8	452.2	764.8	1168.2
C	461.9	741.0	1027.6	337.3	472.4	613.1
D	670.7	1148.4	1684.2	535.8	787.6	1070.9
E	134.0	208.2	284.2	94.3	129.0	165.0

En general vemos que a pesar de que la película posee una mayor permeabilidad en Guayaquil que en Quito, el producto tiene un Shelf Life mayor en Guayaquil, que el que tiene en Quito, a diferencia de los productos “secos” analizados anteriormente que ocurre a la inversa, esto se debe a que en Guayaquil existe un gradiente de humedad menor que resulta beneficioso para este producto (100% y 80% RH), y en Quito hay un gradiente mayor (100% y 50% RH), es decir en Quito las moléculas de agua tienen mayor rapidez y/o tendencia para alcanzar el equilibrio termodinámico de esa ciudad (50% RH), por eso este flujo de moléculas en gran magnitud se expresa en una pérdida de peso más rápida del empaque.

5.5 Caso de Aplicación: Diseño del Empaque y del Procesamiento de la Película Multicapa Requerida, para un Alimento Específico a Determinadas Condiciones Ambientales.

El producto a empacar en este caso de aplicación a manera de ejemplo, será: Papas Chips. Para este caso la empresa alimenticia nos debe facilitar la siguiente información:

- Actividad de agua inicial y la actividad de agua crítica a la cual se considera que el producto pierde calidad para el consumidor (Isoterma de adsorción)
- Cantidad de producto que va a ser empacado por unidad (Peso)
- Dimensiones aproximadas deseadas del empaque (Área)
- Ciudad donde va a permanecer almacenado el producto (Condiciones Ambientales)
- Tiempo de almacenamiento en percha deseado (Shelf Life)
- Condiciones de manipulación del empaque (Propiedades mecánicas)

La isoterma es la que podemos apreciar en la figura 5.17, con una actividad de agua inicial de 0.013 y una actividad de agua crítica de 0.047, se requiere empacar 100 gramos de Papas Chips, en un empaque de aproximadamente 10 cm x 10 cm (Área total = 200 cm²),

el producto será almacenado en Guayaquil (32°C y 80%HR), se desea que el producto tenga un Shelf Life de 3 meses (2160 horas) y con condiciones de manipulación ligeras. Con esta información, para poder conocer el espesor de la película multicapa que debe ser procesada, debemos primeramente conocer el coeficiente permeabilidad, es decir escoger la película que nos brinda la mejor relación costo-propiedades.

En este caso utilizaremos una de las películas en estudio a manera de ejemplo, y escogemos la película C, la cual nos dio el mayor beneficio de costo y barrera, para la ciudad de Guayaquil, dicha película como se vio en la tabla 10, posee una estructura de aproximadamente 60% LDPE y el resto LLDPE.

Esta película tiene un coeficiente de permeabilidad, $P = 22.4E-6$ g- μ /hr-mmHg-cm², y el valor de la presión de saturación de vapor es 36.663 mmHg, para la temperatura de Guayaquil (32°C.), la humedad relativa en el exterior del empaque lógicamente es 80%HR y la humedad relativa dentro del empaque se la saca del gráfico 5.17, debido a que en este rango de actividades de agua de m_o a m_c , la isoterma se comporta aproximadamente como una línea recta, la humedad relativa promedio a lo largo de este intervalo, será el valor

promedio entre estos puntos en las abscisas , es decir este rango, como se aprecia en dicha gráfica, va de 6% HR a 44% HR, entonces la humedad relativa en el interior del empaque será: $HR_{int} = (44+6)/2 = 25\%HR$. Entonces la diferencia de presión de ambos lados del empaque se calcula con la ecuación 3.27:

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

$$\Delta p = \frac{36.663 \text{ mmHg} (80 - 25)}{100} = 20.16465 \text{ mmHg}$$

La cantidad de agua ganada por el producto en este lapso será $q = 100 \text{ g} (0.47 - 0.13) = 3.4 \text{ g}$

Entonces el espesor de la película tricapa a producir, se calcula a partir de la ecuación 3.26:

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

$$l = \frac{(22.4E - 6 \text{ g} \cdot \mu/\text{hr} \cdot \text{mmHg} \cdot \text{cm}^2)(2160 \text{ hr})(200 \text{ cm}^2)(20.165 \text{ mmHg})}{3.4 \text{ g}}$$

$$l = 57.4 \text{ micras}$$

En este caso conocemos el coeficiente de permeabilidad total, pero si tuviéramos el caso que conociéramos el coeficiente de permeabilidad a esta temperatura para cada capa (utilizando la ecuación de

Arrhenius), y el espesor que queremos para cada una de ellas, para calcular el coeficiente de permeabilidad total, se utiliza la ecuación la ecuación 3.22:

$$\frac{l_T}{P_T} = \frac{l_1}{P_1} + \frac{l_2}{P_2} + \frac{l_3}{P_3}$$

Los resultados de estos cálculos, se muestran en la tabla 50:

TABLA 50	
CALCULO DEL EMPAQUE PARA PAPAS CHIPS (GUAYAQUIL)	
$P_T :$	2.24E-05 g- μ /hr-mmHg-cm ²
A	200 cm ²
q	34 gramos
p_s	36.663 mmHg
HR_{out}	80% HR
HR_{in}	25% HR
$\Delta p :$	20.165 mmHg
t	2160 horas
l	57.4 micras

Regresando a nuestro caso, nuestra multicapa a procesar debe tener un espesor total de 57.4 micras, y asimismo de manera proporcional a la tricapa C de 75 micras estudiada, las capas componentes de esta

nueva película en análisis deben tener los siguientes espesores: Capa 1 = 20.66 micras, Capa 2 = 18.37 micras, y Capa 3 = 18.37 micras, Total = 57.4 micras. El costo de esta película (solo tomando en cuenta materia prima), guardando proporción al costo/espesor de la película C, será de \$0.0672 por m².

Con estos valores de espesores para cada capa, procedemos a desarrollar los parámetros a utilizar en el proceso de coextrusión de dicha película:

El fabricante de las resinas a utilizar, en la hoja técnicas de las mismas, sugiere un valor de BUR = 3, temperatura del fundido entre 200°C – 250°C, una altura de la línea de congelamiento de 80 cm, y un Die Gap = 1.5 mm, para poder lograr una mejor y mayor orientación de las macromoléculas en ambos sentidos (MD y TD).

El Lay Flat será de 1000 mm, para que este sea un múltiplo de las dimensiones del empaque que es de 100 mm x 100 mm, y obtener 5 empaques a lo ancho o 10 si el corte es a lo largo de la dirección MD.

Entonces con estos valores obtenemos el resto de los parámetros, con los cuales se programará el sistema :

Diámetro del Dado requerido según la ecuación 3.3 es:

$$D_d = \frac{\text{Lay Flat} \times 0.637}{\text{BUR}} = \frac{1000 \text{ mm} \times 0.637}{3} = 212.33 \text{ mm}$$

DDR (ecuación 3.5):

$$\text{DDR} = \frac{V_h}{V_d} = \frac{\left(1 - \frac{\text{Gap}}{D_d}\right) \times \text{Gap} \times \rho_{\text{melt}}}{\left(\text{BUR} - \frac{e_f}{D_d}\right) \times e_f \times \rho_{\text{pel}}} = \frac{\left(1 - \frac{1.5\text{mm}}{212.33\text{mm}}\right) \times 1.5\text{mm}}{\left(3 - \frac{0.0574}{212.33\text{mm}}\right) \times 0.0574} =$$

$$\text{DDR} = 8.65$$

Si desea producir 100 Kg/h, la velocidad de salida de la burbuja del cabezal (V_d) será:

$$V_d = \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{prom}} \times \text{DIE GAP} \times \pi \times D_d}$$

$$V_d = \frac{\left(100 \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}}\right)}{921.44 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.0015 \text{ m} \times \pi \times 0.21233 \text{ m}} = 1.81 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Entonces la velocidad de halado de los rodillos superiores (V_h) será:

$$V_h = \text{DDR} \times V_d = 8.65 \times 1.81 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 15.65 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Sobrepresión Interna ΔP (ecuación 3.6) y Tensión Axial de la Burbuja

T_z (ecuación 3.7):

$$\Delta P = \frac{\mu \dot{m} B}{\rho \pi \left(\frac{D_d}{2}\right)^3}; \quad F_z = \frac{\mu \dot{m} T_z}{\rho \left(\frac{D_d}{2}\right)}$$

Para poder realizar estos cálculos, necesitamos los valores de B y T_z entonces, procedemos a calcular el parámetro X con la ecuación 3.8:

$$X = \frac{Z}{\left(\frac{D_d}{2}\right)} = \frac{800 \text{ mm}}{\left(\frac{212.33 \text{ mm}}{2}\right)} = 7.535$$

Con este valor vamos a las figuras 3.18 y 3.19, con un BUR = 3 y un

$$\frac{e_i}{e_f} = \frac{1.5 \text{ mm}}{0.0574 \text{ mm}} = 26.1, \text{ obtenemos para } X = 20: B = 0.2 \text{ y } T_z = 3.4; \text{ y}$$

para $X = 5$: $B = 0.105$ y $T_z = 1.2$, interpolando para $X = 7.535$, tenemos $B = 0.121$ y $T_z = 1.572$; con una viscosidad de aproximadamente $720 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, y un Output de 100 Kg/h (27.78 g/s) entonces finalmente obtenemos:

$$\Delta P = \frac{\mu \dot{m} B}{\rho \pi \left(\frac{D_d}{2}\right)^3} = \frac{(720 \text{ Pa}\cdot\text{s})(27.78 \text{ g/s})(0.121)}{\left(0.92144 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \pi \left(\frac{21.233 \text{ cm}}{2}\right)^3} = 0.7 \text{ Pa}$$

$$F_z = \frac{\mu \dot{m} T_z}{\rho \left(\frac{D_d}{2}\right)} = \frac{(720 \text{ Pa}\cdot\text{s})(27.78 \text{ g/s})(1.572)}{\left(0.92144 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \left(\frac{21.233 \text{ cm}}{2}\right)} = 3214.17 \text{ Pa}\cdot\text{cm}^2 = 0.32 \text{ N}$$

Para saber si el sistema necesita IBC, se divide el Output = 100 Kg/h para la longitud circunferencial del Dado, $C_c = \pi \cdot D_d = \pi \cdot 21.233 \text{ cm} = 66.7 \text{ cm}$, para obtener la velocidad específica de enfriamiento:

$$V_E = \frac{100 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}}{66.7 \text{ cm}} = 1.5 \frac{\text{Kg}}{\text{h cm}}$$

$$\Rightarrow V_E \leq 2.5 \frac{\text{Kg}}{\text{h cm}} \quad \therefore \text{No necesita IBC}$$

Estos parámetros se resumen en la tabla 51:

TABLA 51	
PARAMETROS DE PROCESAMIENTO DE TRICAPA A PRODUCIR	
Output o Salida (Kg/h)	100
Die Gap (mm)	1.5
Espesor (micras)	57.4
DDR	8.65
Velocidad de la Línea (m/min)	15.65
BUR	3
Línea de Congelamiento (cm)	80
Lay Flat (mm)	1000
IBC	no
Diámetro del Dado (mm)	212.33
T, Cabezal (°C)	240
Barril 1,2,3 T _{min-max} (°C)	200-240
ΔP (Pascales)	0.7
F _z (Newton)	0.32

A continuación se procede a realizar la selección de las 3 extrusoras, componentes del sistema de coextrusión de dicha película tricapa. Por sugerencia del fabricante de las resinas se debe utilizar un husillo con una relación $L/D = 30$, con el objetivo de lograr mayor homogeneización del material fundido.

La producción total se multiplica por la composición de cada capa, y el factor 0.5 es el factor escogido para que la extrusora trabaje entre el 30% y el 70% de su capacidad, para sacar el máximo rendimiento energético. En la figura 3.22, se puede determinar con una buena aproximación el diámetro de cada una de las extrusoras, para la utilización de este gráfico se utilizan los flujos de los polietilenos de baja densidad incrementados en un 25%, para estimar un flujo equivalente en HDPE, debido a que dicha figura fue desarrollada para este tipo de polímero.

Se procede a obtener el diámetro de la extrusora utilizando las ecuaciones 3.9 y 3.10:

$$V_t = \frac{\pi \times D \times N \times \cos \phi}{60} ; \quad N = \frac{m}{(m/N)}$$

Entonces debemos asumir un diámetro (mm), ir a la figura 3.22 y con ese diámetro se busca en las abscisas y dependiendo del tipo de extrusora se intercepta el valor en la correspondiente ordenada y ese

es el valor de flujo másico m/N , despejamos V_t con este valor de N (r.p.m.), y este valor si cae en el rango entre 0.5 m/s y 1.2 m/s, que es el rango de velocidades tangenciales que aseguran una adecuada homogeneización y que alejan la posibilidad de que el polímero se degrade, entonces ese diámetro asumido al comienzo es el adecuado.

Para la extrusora de la capa externa de tipo de zona de alimentación ranurada, con diámetro de 40 mm, el flujo másico específico según la figura 3.22, es 0.3 Kg min/h, la velocidad de rotación del husillo para una producción de 90 Kg/h es de 300 r.p.m. y la velocidad tangencial del polímero para una hélice de 0° será de 0.63 m/s, que se encuentra dentro del rango de aceptación.

Para la extrusora de la capa central e interna con iguales características; zona de alimentación lisa, con diámetro de 40 mm, el flujo másico específico según la figura 3.22, es 0.24 Kg min/h, la velocidad de rotación del husillo para 80 Kg/h es de 333.33 r.p.m. y la velocidad tangencial del polímero para una hélice de 0° será de 0.7 m/s, que se encuentra dentro del rango de aceptación.

Por la relación $L/D = 30$ sugerida por el fabricante de la resina, tenemos entonces que se necesitarán 3 extrusoras de 40 mm de

diámetro y aproximadamente 1200 mm de largo, de las cuales 2 tienen zona de alimentación lisa y una con zona de alimentación ranurada.

En la tabla 52 se muestra los resultados de estos cálculos:

TABLA 52			
SELECCIÓN DE COEXTRUSORA			
Producción requerida:	100 Kg/h		
	Capa Externa	Capa Central	Capa Interna
Polímeros	LDPE (25%) + LLDPE (75%)	LDPE	LDPE(67%)+ LLDPE (33%)
Composición (%en peso)	36	32	32
Producción de cada extrusora (Kg/h)	$100 \cdot 0.36 / 0.5$ 72	$100 \cdot 0.32 / 0.5$ 64	$100 \cdot 0.32 / 0.5$ 64
Producción aproximada si el material a extruir fuera HDPE (Kg/h)	$72 \cdot 1.25$ 90	$64 \cdot 1.25$ 80	$64 \cdot 1.25$ 80
Diámetro de la extrusora (mm)	40	40	40
Tipo zona de alimentación	Ranurada	Lisa	Lisa

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. Los empaques multicapa, brindan mayores y mejores ventajas que los empaques monocapa, debido a que optimizan la combinación y propiedades de cada una de sus capas constituyentes, dando el espesor mínimo adecuado a la película, lo cual implica reducción de costos para las industrias.
2. Con bajos valores de DDR, las películas multicapa obtienen grandes porcentajes de elongación específica en MD.
3. Con un bajo valor de DDR y un alto BUR, se obtiene una baja propiedad de impacto al dardo y una alta permeabilidad al vapor de agua.

4. Con bajos valores de Die Gap y un alto Output (Kg/hr), se mejoran las propiedades de tensión en las películas multicapa.
5. Una película multicapa que posee únicamente LDPE en su composición, obtiene aproximadamente un coeficiente de permeabilidad al vapor de agua 200% mayor, en relación a una película que posee mezclas de LLDPE, metaloceno o HDPE en su estructura.
6. Las películas multicapa que sólo poseen LDPE en la estructura de sus capas, presentan valores de resistencia a la tensión en MD mayores que en TD, esto es debido a que las fuerzas de valencia secundaria (situadas en dirección TD) son menores que las fuerzas de valencia principal (situadas en dirección MD).
7. Cuando las películas multicapa poseen algún tipo de polímero lineal en su estructura, la resistencia a la tensión en TD es mayor que en MD.
8. El costo de materia prima para películas de PE que tienen porcentajes de HDPE y metaloceno en sus capas, llega

aproximadamente a duplicar el costo de las películas que poseen LDPE y LLDPE en su composición.

9. La manipulación del empaque afecta en gran magnitud, ya que en un empaque arrugado, el coeficiente de permeabilidad puede aumentar hasta en un 24%, en relación a un empaque en perfectas condiciones, lo que quiere decir que el Shelf Life del producto empacado se acortaría en igual magnitud.
10. Una película multicapa compuesta por mezclas de LDPE, HDPE y METALOCENO en sus capas, posee mejores propiedades mecánicas y de barrera al vapor de agua, por micra de espesor (sin tomar en cuenta costos de materia prima).
11. Una tricapa compuesta por mezclas de LDPE y LLDPE en sus capas, ofrece mayor resistencia al impacto, a la tensión, y mayor barrera al vapor de agua, a un menor costo en la materia prima.
12. En el intervalo de temperaturas de 10°C a 40°C, que es el rango de temperaturas que usualmente poseen las diversas regiones del país, la permeabilidad de las películas multicapa aumenta en rangos que van entre un 60% a 260%.

13. Los tiempos de almacenamiento de los empaques obtenidos con las películas multicapa, varían notoriamente para las condiciones de Quito y Guayaquil, llegando a disminuir de 3 a 4 veces el Shelf Life para Guayaquil, en relación al obtenido en Quito.
14. Mediante el uso de empaques multicapa, al utilizar el espesor mínimo requerido para un alimento determinado, optimizamos recursos, ya que utilizamos menos energía eléctrica, menos agua para enfriamiento de extrusoras, y producimos menor desperdicio.
15. Mediante el uso de la tecnología multicapa, al brindar calidad al menor costo, es la única forma en que las empresas plásticas ecuatorianas, pueden competir con productos extranjeros, en caso de aprobarse el TLC.

6.2 Recomendaciones

1. Se debe tener en cuenta el análisis de Sobrepresión Interna y de Tensión Axial de la Burbuja en el procesamiento de las películas, ya que estos 2 parámetros no son controlados en ninguna de las industrias que fueron visitadas, lo que conlleva a problemas de

estabilidad de la burbuja y de irregularidades en la superficie final de la película.

2. Tener cuidado en utilizar el adecuado valor de presión de saturación de vapor de agua para la temperatura de cada ciudad, para poder obtener el correcto valor de coeficiente de permeabilidad de la película para cada ciudad.
3. Los resultados obtenidos en la prueba de impacto al dardo, solo nos informan el peso en gramos que resisten las películas de un dardo que cae desde una altura de 0.66 metros, esta información obviamente interesa a la empresa que adquiere las películas, pero para poder obtener la verdadera propiedad de resistencia al impacto al dardo se debe dividir el peso de falla obtenido en dicha prueba para el espesor, para poder tener un criterio valedero para la comparación de resistencia al impacto entre una película y otra.
4. Para motivos de análisis de obtención del WVTR, se debe conocer la dirección del flujo de las moléculas de vapor de agua en las películas, ya que debe ser el mismo sentido en el cual va a utilizarse finalmente la película multicapa en el empaque.

5. Se debe tener claro que el término Permeación se refiere al paso de las moléculas de vapor de agua de un lado a otro, en un material homogéneo, esto excluye el viaje a través de perforaciones, rasgaduras y otros defectos del empaque.
6. Diseñar o pensar que los empaques tendrían el mismo comportamiento en diferentes ciudades con condiciones ambientales distintas, sería un gravísimo error, ya que el producto perdería su calidad rápidamente, y ocasionaría reclamos a la industria por parte de los clientes.
7. Se recomienda utilizar para líneas de coextrusión, maquinaria de origen alemán, son las de mejor calidad, ya que producen películas con buenas propiedades ópticas y buen acabado superficial.
8. Ante la falta de carreras técnicas, en lo referente a ciencias de polímeros en nuestro país, se recomienda a las empresas plásticas, capacitar a sus empleados, ya que en la mayoría de las empresas visitadas no existe al menos un técnico en esta área, que guíe o supervise correctamente a sus operadores.

9. Tener mucho cuidado en el uso de copolímeros (LLDPE y metaloceno), ya que estos deben poseer niveles de comonomero permitidas por la FDA, para evitar la contaminación del alimento, debido a la migración de dichos compuestos.

10. Para un correcto diseño del empaque, solicitar a la empresa alimenticia la siguiente información:

- Actividad de agua inicial y la actividad de agua crítica a la cual se considera que el producto pierde calidad para el consumidor (Isoterma de adsorción)
- Cantidad de producto que va a ser empacado por unidad (Peso)
- Dimensiones aproximadas deseadas del empaque (Área)
- Ciudad donde va a permanecer almacenado el producto (Condiciones Ambientales)
- Tiempo de almacenamiento en percha deseado (Shelf Life)
- Condiciones de manipulación del empaque (Propiedades mecánicas)

BIBLIOGRAFÍA

1. S. SELKE, J. CUTER AND R. HERNANDEZ (2004), "Plastics Packaging", 2nd Edition, Carl Hanser Verlag, Munich.
2. ASHISH M. SUKHADIA (1999), "Trade-Offs in Blown Film Processing- Structure-Property Behavior of LLDPE Type Resins from Chromium, Metallocene and Ziegler-Natta Catalysts", ANTEC – SPE Conference Proceedings.
3. S. ELKOUN, M HUNEAULT, K. McCORMICK, F. PUTERBAUGH, L. KALE (2005), "LLDPE-Based Mono- and Multilayer Blown Films: Property Enhancement Through Co-extrusion", Polymer Engineering & Science, 45 (9), 1222-1230.
4. S. GOYAL, V. KER, T. CHUANG AND M. GIL (2002), "Measuring Dart Impact Strength of Polyethylene Film", ANTEC, SPE Conference Proceedings.

5. M. ZHANG, S. ELKOUN, A. AIJIVY AND M. A. HUNEAULT (2004), "Effect Of Crystalline Structure On Tear Resistance Of LDPE And LLDPE-Blown Films", Journal of Plastic Film and Sheeting, 20, 43-53.

6. J. TAYLOR, J. BAIK (2000), "Benefits of coextruded LLDPE/LDPE Film vs. blended LLDPE/LDPE Film", Journal of Plastic Film and Sheeting, 16, 223-235.

APÉNDICES

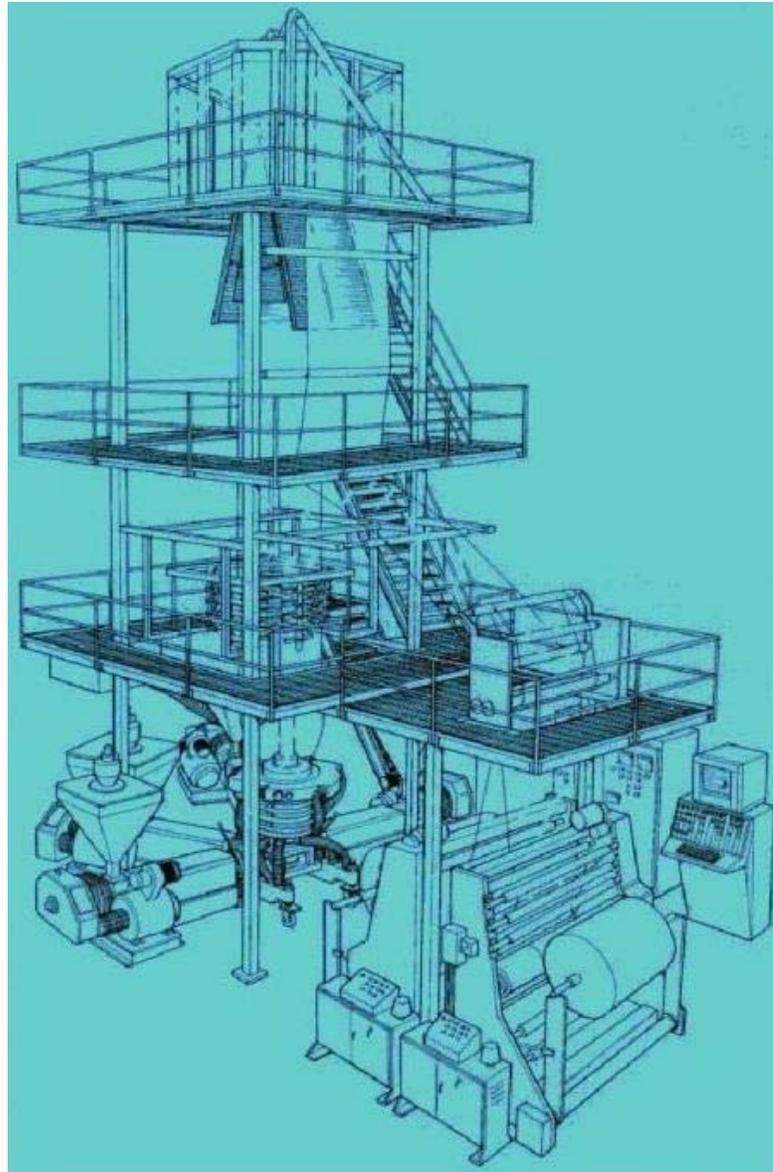
APENDICE A

DENSIDAD Y TEMPERATURA DE FUSION DE HIDROCARBUROS

Hidrocarburo	Fórmula	Peso molecular	Densidad	T. de fusión
Metano	CH ₄	16	gas	-182°C
Etano	C ₂ H ₆	30	gas	-183
Propano	C ₃ H ₈	44	gas	-190
butano	C ₄ H ₁₀	58	gas	-138
Pentano	C ₅ H ₁₂	72	0,63	-130
Hexano	C ₆ H ₁₄	86	0,66	-95
Heptano	C ₇ H ₁₆	100	0,68	-91
Octano	C ₈ H ₁₈	114	0,70	-57
Nonano	C ₉ H ₂₀	128	0,72	-52
Decano	C ₁₀ H ₂₂	142	0,73	-30
Undecano	C ₁₁ H ₂₄	156	0,74	-25
Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	170	0,75	-10
Pentadecano	C ₁₅ H ₃₂	212	0,77	10
Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	283	0,79	37
Triacontano	C ₃₀ H ₆₂	423	0,78	66
Polietileno	C ₂₀₀₀ H ₄₀₀₂	28000	0,93	100

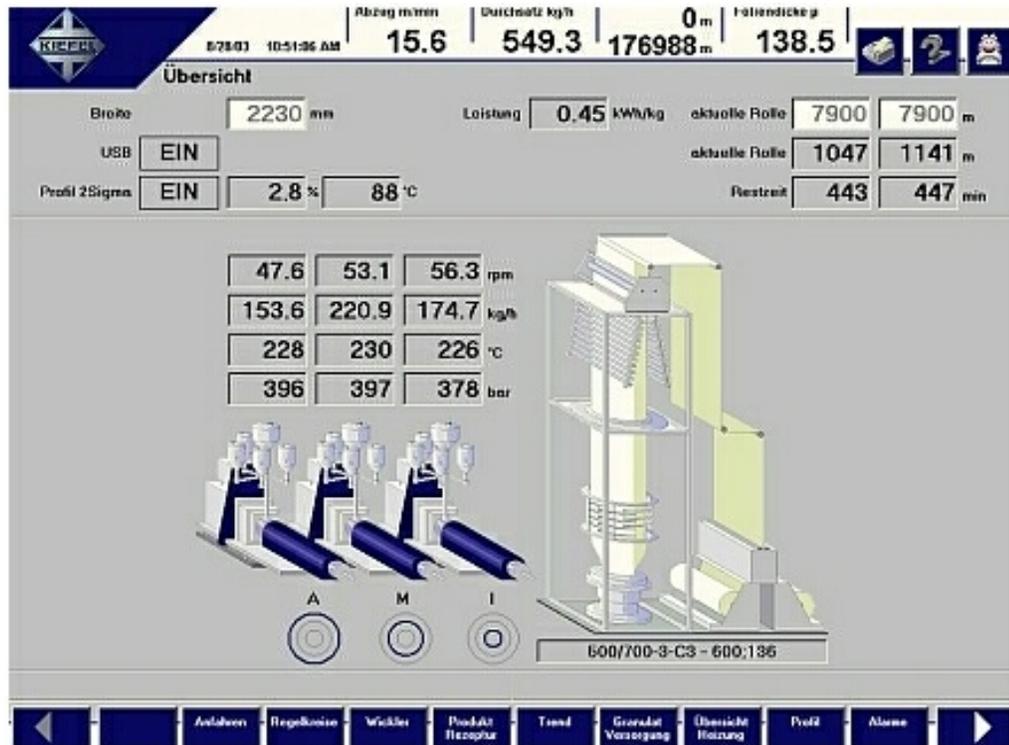
APENDICE B

SISTEMA DE COEXTRUSION MULTICAPA



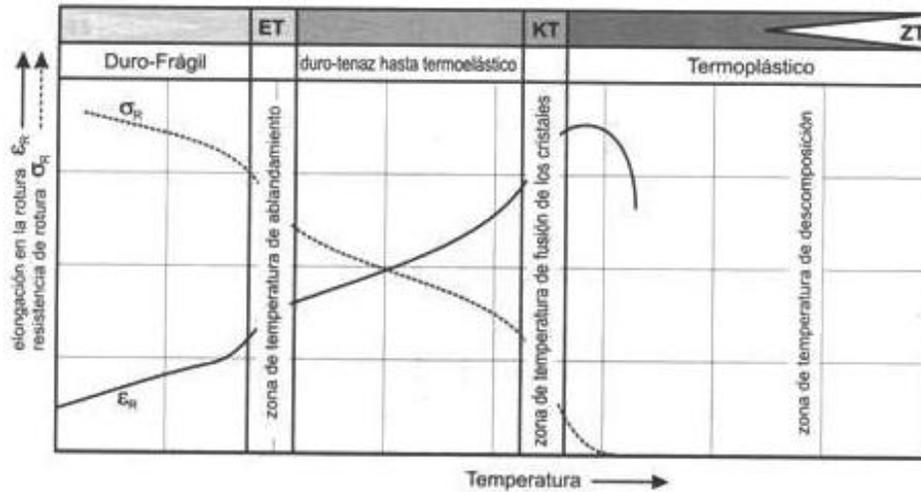
APENDICE C

PANTALLA DEL CONTROL AUTOMATICO DE UN SISTEMA DE COEXTRUSION



APENDICE D

DIAGRAMA DE ESTADO DE UN TERMOPLASTICO SEMICRISTALINO



estado	sólido, frágil como vidrio	rígido, tenaz elástico hasta	termoelástico	termoplástico	descomposición
estructura molecular	sectores amorfos y cristalinos sólidos, fuerzas intermoleculares grandes	movimiento de los sectores amorfos en aumento, los sectores cristalinos permanecen sólidos, las fuerzas intermoleculares en los sectores cristalinos grandes	disolución de los sectores cristalinos en aumento	las macromoléculas se desplazan entre sí	descomposición molecular del termoplástico
Procesamiento	no usual en este rango	mecanizado con y sin arranca viruta, ensamblados desarmable y no-desarmable (pegado), mejoramiento y decoración superficial	conformar: por doblado, por presionado, por estirado y por presionado y estirado	moldeado: inyección, extrusión, prensado, espumado, calandrado, rotoformado, etc., ensamblado no desarmable	

ET = zona de temperatura de endurecimiento

KT = zona de temperatura de fusión de los cristales

ZT = zona de temperatura de descomposición

APENDICE E

HOJA TECNICA DE RESINA DOWLEX 2101

DOWLEX* 2101

Polietileno de Baja Densidad Lineal, copolímero de octeno

- Película para aplicaciones de espesores delgados y alta velocidad
- Película para laminación
- Película para envasado automático
- Bolsas para uso general
- Cumple con regulación FDA 21 CFR 177.1520(c)3.2a
- Apto para contacto con alimentos según informe N° 570 / 98 emitido por el INAL de conformidad con legislación MERCOSUR.

Aditivos: Deslizante
Antibloqueo

El DOWLEX* 2101 es un Polietileno de Baja Densidad Lineal, copolímero de octeno, producido a través del Proceso de Solución. Esta resina presenta excelentes propiedades para aplicaciones de espesores delgados y alta velocidad. Puede ser utilizado tanto en cabezal plano como en soplado.

Propiedades Físicas	Métodos	Valores ⁽¹⁾
Propiedades de la Resina		
Índice de Fluidéz (190°C / 2.16kg), g/10 min	ASTM D 1238	1,60
Densidad, g/cm ³	ASTM D 792	0,9240
Propiedades de la Película, 37,5 µm		
Resistencia al Punzonado, J/cm ³ (ft-lbf/in. ³)	Dow Method	12 (145)
Resistencia al Impacto, (Método A), g	ASTM D 1709	218
Resistencia al Rasgado, g	DM	445
	DT	870
Tracción en el Punto de Fluencia, MPa (psi)	DM	12 (1739)
	DT	12 (1739)
Tracción en el Punto de Ruptura, MPa (psi)	DM	37 (5361)
	DT	29 (4202)
Elongación en el Punto de Ruptura, %	DM	810
	DT	890
Módulo Secante al 2%, MPa (psi)	DM	205 (29700)
	DT	238 (34481)
Coefficiente de Fricción (COF)	ASTM D 1893	0,16/0,11
Brillo, 45°	ASTM D 2457	48
Nubosidad, %	ASTM D 1003	14

Condiciones de Procesamiento Utilizadas:

- Diámetro de Tornillo: 32:1 L/D
- Tipo de Tornillo: Simple con Mezclador
- Luz de Labio: 1.8 mm
- Temperatura de Masa: 215°C
- Productividad: 44,6 K/h
- Diámetro de Matriz: 160 mm
- Relación de Soplado: 2.5:1
- Velocidad de Tornillo: 80 rpm
- Altura de la Línea de Enfriamiento: 50 mm
- Temperatura del Aire de Enfriamiento: 24°C

(1) Valores típicos para el producto que deberán ser confirmados por el cliente a través de sus propios ensayos.

APENDICE F

HOJA TECNICA DE RESINA DOWLEX 2085

DOWLEX* 2085

Resina de Polietileno de Baja Densidad

- Película para aplicaciones de espesores delgados y alta velocidad
- Película para laminación
- Película para envasado automático
- Bolsas para uso general

Aditivo Deslizante Alto
Aditivo Antibloqueo Alto

DOWLEX* 2085 es un polietileno lineal de baja densidad apropiado para aplicaciones de uso general que van desde bolsas de uso pesado hasta aplicaciones de espesores delgados y alta velocidad. Esta resina contiene

aditivo deslizante y antibloqueo y ofrece estabilidad térmica adicional. Cumple con regulación FDA 21 CFR 177.1520 c) 3.2 a) cuando se utiliza sin modificar y se procesa utilizando las mejores prácticas de fabricación. Este

material es apto para el uso como materia prima en la fabricación de envases y equipamientos que van a estar en contacto con alimentos, según informe emitido por el I.N.A.L. AS 28421/99.

Propiedades Físicas		Método	Valor Típico (1)
Propiedades de la Resina			
Índice de Fluencia, g/10 min		ASTM D 1238	2
Densidad, g/cc		ASTM D 792	0.921
Punto de Ablandamiento VICAT, °C		ASTM D 1525	101
Propiedades de Película Soplada, @ 37.5 µ			
Impacto al Dardo, g		ASTM D 1709	373
Resistencia al Rasgado Elmendorf, g	DM	ASTM D 1922	805
	DT		1183
Resistencia a la Tracción, MPa	DM	ASTM D 882	47
	DT		39
Tracción en el Punto de Inflexión, MPa	DM	ASTM D 882	10
	DT		10
Elongación a la Rotura, %	DM	ASTM D 882	583
	DT		717
Módulo Secante 2%, MPa	DM	ASTM D 882	152
	DT		168
Brillo, 45°		ASTM D 2457	57
Nubosidad, %		ASTM D 1003	16

Condiciones de Extrusión de Películas Sopladas

- Temperatura de Fundido: 200-250 °C
- Relación de Soplado: 2.5:1
- Abertura de Labio: 1.78 mm
- Extrusor: 24: 1 L/D

APENDICE G

HOJA TECNICA DE RESINA HIVOREX 7000F

HDPE [7000F]HIVOREX			
Properties	Test Method	Unit	7000F
Melt Flow Rate (MFR) 190°C	ASTM D-1238	g/10min	0.04
Density ²	ASTM D-1505	g/cm ³	0.956
Softening Point	ASTM D-1525	°C	124
Tensile Strength at Yield	ASTM D-638	Kg/cm ²	230
Tensile Strength at Break	ASTM D-638	Kg/cm ²	300
Ultimate Elongation	ASTM D-638	%	>500
Flexural Modulus of Elasticity	ASTM D-790	Kg/cm ²	10,000
Hardness(Rockwell)	ASTM D-785	R	55
IZOD Impact Strength (23°C)	ASTM D-256	Kg-cm/cm	30
ESCR	ASTM D-1693	F 50HR	>1,000

APENDICE H

HOJA TECNICA DE RESINA PETROTHENE 143

Equistar Petrothene® 143 Low Density Polyethylene

Physical Properties	Metric	Comments
Density	0.919 g/cc	ASTM D1505
Thickness	31.8 microns	2:1 BUR; 25 mil die gap
Melt Flow	1 g/10 min	ASTM D1238
Mechanical Properties		
Tensile Strength @ Break	11.9 MPa	ASTM D638
Film Elongation at Break, MD	300 %	ASTM D882
Film Elongation at Break, TD	500 %	ASTM D882
Elongation at Break	650 %	Molded; ASTM D638
Elmendorf Tear Strength, MD	380 g	ASTM D1922
Elmendorf Tear Strength, TD	200 g	ASTM D1922
Dart Drop	90 g	ASTM D1709
Tensile Strength, Ultimate MD	23.4 MPa	ASTM D882
Tensile Strength, Ultimate TD	17.2 MPa	ASTM D882
1% Secant Modulus, MD	0.193 GPa	ASTM D882
1% Secant Modulus, TD	0.221 GPa	ASTM D882
Optical Properties		
Haze	6 %	ASTM D1003
Gloss	70 %	at 45°; ASTM D2457
Processing Properties		
Melt Temperature	191 °C	

APENDICE I

HOJA TECNICA DE RESINAS HYUNDAI

Hyundai Petrochemical Co., Ltd.										
Low Density Polyethylene										
Basic Properties										
Item	Property Method (ASTM) Grade/Unit	Melt Index (MI) D1238 g/10min	Density (D) D1505 g/cm ³	Tm HPC Degree C	Vicat Softening Point D1525 Degree C	Tensile strength D638 kg/cm ²		Elongation at Break D638 %	Hardness D2240 D Scale	Tensile Modulus (2% Secant Modulus) D638 kg/cm ²
						Yield	Break			
Film	BF110	0.25	0.920	105	94	90	180	750	50	1,200
	BF115	0.25	0.920	105	94	90	180	750	50	1,200
	BF111	0.45	0.921	106	95	93	170	700	52	1,200
	BF220	0.6	0.926	106	96	90	180	750	51	1,150
	BF300	0.8	0.920	105	94	88	170	750	50	1,150
	BF410	2.0	0.924	107	95	96	135	650	52	1,350
	BF500	3.0	0.920	105	90	88	125	600	49	1,100
	BF511	4.0	0.924	107	93	94	120	550	51	1,350
	BF415	2.0	0.924	107	95	96	135	650	52	1,350
	BF515	4.0	0.924	107	93	94	120	550	51	1,350

APENDICE J

HOJA TECNICA DE RESINA EXCEED 1018

Exceed™ mLLDPE

Exceed 1018 Formulated Series

Blown Film Resin

Description

Exceed 1018 resins are hexene copolymer produced using ExxonMobil Chemical's EXXPOL® Technology.

Films made from Exceed 1018 resin have outstanding tensile, impact strength and puncture. These superior strength properties, along with excellent drawability, allow downgauging in bag application.

Applications

- Trash bags, liners
- General packaging

Additive Package	PPA	Antiblock	Slip	Thermal Stabilizer
Exceed 1018 DA	Yes	4500 ppm	No	Yes
Exceed 1018 EA	Yes	5000 ppm	1000 ppm	Yes
Exceed 1018 EB	Yes	2500 ppm	750 ppm	Yes
Exceed 1018 FA	Yes	4500 ppm	450 ppm	Yes

Resin Properties	Test Based On	Typical Value / Units
Melt Index	ExxonMobil Method	1.3 g/10 min
Density	ExxonMobil Method	0.924 g/cm ³
Peak Melting Temperature	ExxonMobil Method	119°C 246°F

Film Properties¹ (1 mil (25.4 micron) film)

Haze		ASTM D1003	16%
Gloss, 45°	MD	ASTM D2457	42
	TD		43
Yield Strength@ 2% Offset	MD	ASTM D882	9.0 MPa 1300 psi
	TD		8.5 MPa 1200 psi
Tensile Strength	MD	ASTM D882	48.1 MPa 6800 psi
	TD		32.1 MPa 4800 psi
Elongation @ Break	MD	ASTM D882	470%
	TD		550%
1% Secant Modulus	MD	ASTM D882	175.0 MPa 25100 psi
	TD		181.8 MPa 28000 psi
Tear Resistance	MD	ASTM D1922	270 g
	TD		440 g
Puncture Break Energy		ExxonMobil Method	1.8 N m 16 in-lb
Dart Drop Impact, F ₅₀		ASTM D1709A	580 g

1. Film Made from Exceed 1018 EA on a 2.5 inch blown film line equipped with a 2.5:1 blow-up ratio, 80 mil die gap, 411°F (211°C) melt temperature, 24 inch frostline and 10 lb/die inch/hr.

APENDICE K

METODOS ASTM APLICABLES A RESINAS PARA SOPLADO DE PELÍCULAS

PROPIEDAD	METODO ASTM
1% Modulo Secante	E111
Densidad	D 105 o D 792
Constante Dieléctrica	D 150
Factor de Disipación	D 150
Elongación	D 882
Modulo de Flexión	D790
Tazas de Flujo con Reómetro	D 1238
Gloss	D 523
Dureza Rockwell	D785
Dureza Shore	D 2240
Haze	D 1003
Impacto al Dardo	D1709/A
Brillo a Bajas Temperaturas	D 746
Indice de Fluidéz	D1238
Permeabilidad al Oxígeno	D3985
Peso Específica	D792
Resistencia Superficial	D275
Resistencia al Rasgado Eimendorf	D1922
Resistencia a la Tensión	D822
Conductividad Térmica	C177
unto de Ablandamiento Vícat	D1525
Absorción de Agua	D570
WVTR	F372

APENDICE L

CONVERSION DE UNIDADES

Para convertir de:	A:	<u>Multiplicar por</u>
<u>Densidad</u>		
libras/plg ³	gramos/cm ³	7.68
gramos/cm ³	libras/plg ³	0.000036
libras/pie ³	gramos/cm ³	0.016
gramos/cm ³	libras/pie ³	62.43
<u>Longitud</u>		
mil	milímetros	0.0254
milímetros	mil	39.37
pulgadas	milímetros	25.4
milímetros	pulgadas	0.0394
<u>Output</u>		
Libras/minutos	gramos/segundos	7.56
gramos/segundos	Libras/minutos	0.1323
libras/horas	kilogramos/hora	0.4536
kilogramos/hora	libras/horas	2.2046
<u>Presión</u>		
psi	kPa	6.8948
kPa	psi	0.145
psi	bar	0.0689
bar	psi	14.51
<u>Temperatura</u>		
°F	°C	(°F-32)/1.8
°C	°F	1.8°C+32
<u>Peso</u>		
onzas	gramos	28.3495
kilogramos	onzas	0.03527
libras	kilogramos	0.4536
kilogramos	libras	2.2046
ton (US)	ton (métricas)	0.972
ton (métricas)	ton (US)	1.1023