ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Introducción al Estudio de la Materia Prima, de las Condiciones de Procesamiento y de las Propiedades Mecánicas, de las Películas de Polietileno de Alta Densidad Fabricadas a través del Proceso de Extrusión de Película Soplada"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

José Adrián Tuárez Urquizo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2011

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la vida y la familia que me ha dado, entre ellos, mis abuelitos, mis padres, mis tíos, mis primos y mis hermanos, quienes me han apoyado incondicionalmente y con mucho amor, para que me supere día a día, y así, ir corrigiendo mis errores e ir venciendo mis limitaciones, para poder ser un hombre de bien. También agradezco a las demás personas que Dios ha puesto en mi camino, entre ellas: mi Director de Tesis, Ing. Andrés Rigaíl, y a las empresas que me ayudaron a terminar la tesis.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS ABUELITOS

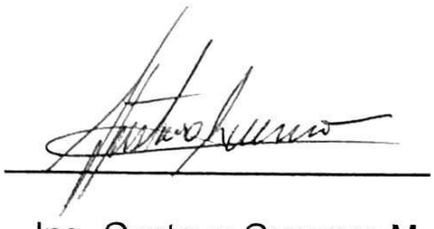
A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

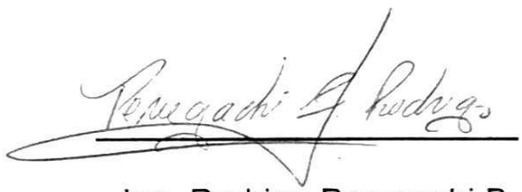
A MIS TÍOS

A MIS PRIMOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Gustavo Guerrero M.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Rodrigo Perugachi B.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Javier Bermúdez R.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

José Adrián Tuárez Urquizo

RESUMEN

El presente trabajo se basó en el estudio de parámetros de materia prima y de condiciones de procesamiento, que se utilizaron para la fabricación de películas de HDPE, a través del proceso de extrusión de película soplada y de las propiedades mecánicas de dichas películas, donde se pudo observar la manera cómo influyen cada uno de los parámetros mencionados, en las propiedades mecánicas de las películas de HDPE.

Se obtuvieron películas de HDPE, como muestras, las cuales no fueron fabricadas sólo con resinas de HDPE, sino que se usó un pequeño porcentaje de LLDPE en la fabricación de las mismas, ya que generalmente se utiliza este material, para alcanzar mayor elongación en la película.

El primer grupo de las películas obtenidas se fabricó con 67% de HDPE y 33% de LLDPE; el segundo grupo fue fabricado con 80% de HDPE y 20% de LLDPE. De lo señalado se pudo observar que el porcentaje de HDPE en las películas, es considerablemente mayor al porcentaje de LLDPE; es por esta razón que las películas que se utilizaron para el estudio en mención, se consideraron películas de HDPE.

Como el primer grupo de películas fue fabricado con diferentes resinas de HDPE y de LLDPE, se obtuvieron películas con diferente Melt Index (MI) y con diferente Densidad (ρ); el segundo grupo de películas, se fabricó con la

misma resina de HDPE y con la misma resina de LLDPE, pero con diferentes condiciones de procesamiento: FLUJO, FH, DDR y BUR.

Finalmente las películas de los dos grupos, se sometieron a ensayos de tensión y elongación (ASTM D-882), de impacto (ASTM D-1709, Método A) y de permeabilidad (ASTM E-96); los resultados que se obtuvieron de los ensayos, mostraron mejores propiedades mecánicas al aumentar el MI, al disminuir ρ, al disminuir FLUJO, al aumentar FH, al aumentar DDR ó al aumentar BUR.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN……..... I

ÍNDICE GENERAL……... III

ABREVIATURAS……. VIII

SIMBOLOGÍA…… IX

ÍNDICE DE FIGURAS……. X

ÍNDICE DE TABLAS……. XV

ÍNDICE DE PLANOS……..... XVI

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN…….. 1

1.1 Antecedentes……..... 1

1.2 Importancia del Estudio…… 2

1.3 Objetivo de la Tesis……. 3

1.4Estructura de la Tesis…… 3

CAPÍTULO 2

2.TECNOLOGÍA DE LAS PELÍCULAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD…….. 5

2.1 Historia del Polietileno de Alta Densidad…….. 8

2.2 Del Petróleo crudo al etileno…….. 9

2.2.1 Hidrocarburos Saturados…….. 11

2.2.2 Hidrocarburos No Saturados……. 12

2.2.3 Destilación fraccionada……..... 13

2.3 Producción del Polietileno de Alta Densidad…… 17

2.3.1 Polimerización en Solución…… 18

2.3.2 Polimerización en Suspensión…….. 19

2.3.3 Polimerización en fase gaseosa……. 19

2.4 Estructura molecular del Polietileno de alta densidad……. 22

2.4.1 Macromolécula…….. 22

2.4.2 Peso molecular……. 33

2.4.3 Distribución de pesos moleculares (MWD)…… 36

2.4.4 Cristalinidad…….. 41

2.5 Producción de películas de Polietileno de Alta Densidad…… 45

2.5.1 Proceso de Producción……. 46

2.5.2 Condiciones de Procesamiento……..... 90

2.6 Proceso de Calidad de Películas de Polietileno de Alta

Densidad…… 135

2.6.1 Ensayo de Tracción y Elongación (ASTM D-882)…… 136

2.6.2 Ensayo de Resistencia al Impacto (ASTM D-1709)…….. 186

2.6.3 Ensayo de Transmisión de Vapor de Agua “WVTR”

(ASTM E-96)…… 203

CAPÍTULO 3

3.DATOS DE LAS MUESTRAS……. 220

3.1 Datos de materia prima…… 222

3.2 Datos de condiciones de procesamiento……. 230

3.3 Datos de propiedades mecánicas…….. 231

3.3.1 Resistencia de la Tensión y Elongación……. 232

3.3.2 Resistencia al Impacto…… 243

3.3.3 Transmisión del Vapor de Agua “WVTR”…….. 250

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS……..... 276

4.1 Análisis de Influencia del Melt Index (M) sobre las propiedades mecánicas de las muestras MI_1 y MI_2……. 279

4.1.1 Resistencia a la tensión y Elongación Vs. MI……..... 280

4.1.2 Resistencia al Impacto Vs. MI…….. 290

4.1.3 Permeabilidad Vs. MI……..... 295

4.2 Análisis de Influencia de la Densidad (p) sobre las propiedades mecánicas de las muestras P_1 y P_2 …….. 298

4.2.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. p……. 300

4.2.2 Resistencia al Impacto Vs. P……..... 312

4.2.3 Permeabilidad Vs. p……..... 316

4.3 Análisis de Influencia del FLUJO sobre las propiedades

Mecánicas de las muestras de $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$ ……..... 320

4.3.1 Resistencia a la Tensión y Elongación……..... 326

4.3.2 Resistencia al Impacto Vs. FLUJO…… 336

4.3.3 Permeabilidad Vs. FLUJO……..... 341

4.4 Análisis de Influencia de la Altura de Enfriamiento (FH)

Sobre las propiedades Mecánicas de las Muestras

FH_1 y FH_2…… 345

4.4.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. FH……..... 349

4.4.2 Resistencia al Impacto Vs. FH…….. 354

4.4.3 Permeabilidad Vs. FH……..... 359

4.5 Análisis de la influencia del DDR sobre las propiedades

Mecánicas de las Muestras DDR_1 y DDR_2……..... 361

4.5.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. DDR…….. 367

4.5.2 Resistencia al Impacto Vs. DDR……377

4.5.3 Permeabilidad Vs. DDR……382

4.6 Análisis de Influencia del BUR sobre las propiedades mecánicas

de las Muestras BUR_1 y BUR_2…….385

4.6.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. BUR…….. 390

4.6.2 Resistencia al Impacto Vs. BUR…….....395

4.6.3 Permeabilidad Vs. BUR…….....408

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…….. 412

5.1 Conclusiones…… 412

5.2 Recomendaciones…… 416

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing Materials
HDPE	High Density Polyethylene
LLDPE	Linear Low Density Polyethylene
LDPE	Low Density Polyethylene
MI	Melt Index
MWD	Molecular Weight Distribution
MFR	Melt Flow Ratio
FH	Frost Height
BUR	Blow Up Ratio
DDR	Draw Down Ratio
DM	Dirección Máquina
DT	Dirección Transversal
V_L	Velocidad Lineal de los Rodillos Haladores
V_o	Velocidad del Polímero Fundido a la Salida del Cabezal
WVTR	Water Vapor Transmission
HR	Humedad Relativa

SIMBOLOGÍA

$CH_2=CH_2$	Etileno
C	Carbono
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
N	Nitrógeno
$\phi_{burbuja}$	Diámetro de la Burbuja
ϕ_{cuello}	Diámetro del Cuello
ρ	Densidad
P	Permeabilidad

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1	Hidrocarburos Saturados……	11
Figura 2.2	Hidrocarburos No Saturados……	12
Figura 2.3	Esquema de Torre de Destilación Primaria…….....	14
Figura 2.4	Esquema de Polimerización……	18
Figura 2.5	Resina de Polietileno de alta Densidad……	21
Figura 2.6	Polimerización a Escala Industrial……	21
Figura 2.7	Macromolécula de HDPE……	22
Figura 2.8	Estructura Química de HDPE……	23
Figura 2.9	Macromolécula de LDPE……	24
Figura 2.10	Estructura Química del LLDPE……	25
Figura 2.11	Macromolécula de LDPE…….....	26
Figura 2.12	Fuerzas de Dispersión…….....	29
Figura 2.13	Fuerzas Dipolares…….....	29
Figura 2.14	Fuerzas de Inducción……	30
Figura 2.15	Fuerzas de Puentes de Hidrógeno……	30
Figura 2.16	Cadenas Lineales y Ramificadas……	32
Figura 2.17	Distribución de Pesos Moleculares……	37
Figura 2.18	Distribución Molecular vs. Fuerzas……	38
Figura 2.19	Termoplástico Semicristalino…….....	42
Figura 2.20	Extrusión de Película Soplada……	46
Figura 2.21	Unidad de Extrusión…….....	47
Figura 2.22	Extrusora……	50
Figura 2.23	Husillo……	50
Figura 2.24	Curva de Presión del Husillo……..	53
Figura 2.25	División General de los Tornillos……	55
Figura 2.26	Partes Mezcladoras y de Cizallamiento para tornillos……	56
Figura 2.27	Zona Ranurada…….....	58
Figura 2.28	Cabezal de Extrusión……	60
Figura 2.29	Cabezal de Alimentación Lateral……	61
Figura 2.30	Cabezal de Portamandril…….....	64
Figura 2.31	Cabezal con Distribuidor Helicoidal……..	66
Figura 2.32	Distribución del Flujo……	67
Figura 2.33	Altura de Enfriamiento……..	70
Figura 2.34	Anillo de Enfriamiento Externo……	71
Figura 2.35	Anillo de Enfriamiento Interno……	73
Figura 2.36	Unidad de Calibración……	74
Figura 2.37	Sistema Regulador Manual…….....	80
Figura 2.38	Sistema Regulador Automático……	83

Figura 2.39	Sistema de Halado……	84
Figura 2.40	Rodillos Haladores……	85
Figura 2.41	Marcos Colapsibles…….....	85
Figura 2.42	Embobinado de Contacto……	87
Figura 2.43	Embobinado de Contacto con Sistema Tensor……	88
Figura 2.44	Embobinado de Accionamiento Central……	89
Figura 2.45	Calentamiento del Aire de Enfriamiento……	96
Figura 2.46	Perfil de Esfuerzos Cortantes…….....	100
Figura 2.47	Longitud L……	104
Figura 2.48	Diámetro de Mandril……	105
Figura 2.49	Desarrollo del Cabezal…….....	105
Figura 2.50	Dimensiones del Cabezal de la Muestra C……	107
Figura 2.51	Direcciones de Halado en la Película……..	117
Figura 2.52	Estiramiento en DT……	128
Figura 2.53	Estiramiento en DM……..	139
Figura 2.54	Tracción y Elongación de Películas……	132
Figura 2.55	Máquina de Ensayo de Tracción y Elongación……	137
Figura 2.56	Secuencia de Elongación…….	138
Figura 2.57	Curvas de Resistencia a la Tensión……...	139
Figura 2.58	Elongación en Región Elástica……	146
Figura 2.59	Analogía entre el Enlace Principal y el Resorte Mecánico…….....	148
Figura 2.60	Elongación en Región Plástica……	154
Figura 2.61	Película de HDPE en Buen Estado……	156
Figura 2.62	Película Estirándose……	156
Figura 2.63	Película de HDPE luego de estirarse Elásticamente….....	157
Figura 2.64	Película de HDPE Estirándose PL……	157
Figura 2.65	Deformación Plástica de Película……..	158
Figura 2.66	Etapas de Deformación Plástica…….....	159
Figura 2.67	Etapa de Aumento……	161
Figura 2.68	Etapa de Estabilidad…….....	165
Figura 2.69	Etapa de Reducción…….....	167
Figura 2.70	Falta de Paralelismo……	179
Figura 2.71	Área Transversal de la Tira……	181
Figura 2.72	Área Transversal de la Franja Paralela…….....	182
Figura 2.73	Deformación Elástica por Acción de Carga de Impacto…….....	190
Figura 2.74	Máquina de Ensayo de Impacto……	195
Figura 2.75	Dardo de Impacto……..	197
Figura 2.76	Distancia de Impacto……	198
Figura 2.77	Cabeza Hemisférica……	198
Figura 2.78	Peso a Añadir al Dardo……	199
Figura 2.79	Vástago del Dardo……	200
Figura 2.80	Collar del Dardo……	201

Figura 2.81	Transmisión de Vapor de Agua a través de la Película…….....	204
Figura 3.1	Predicción del Índice de Fluidez de una Mezcla de Dos Componentes……	225
Figura 3.2	Señalización de la Dirección de las cadenas Moleculares……	233
Figura 3.3	Película Extendida……	234
Figura 3.4	Corte de Tiras……	235
Figura 3.5	Medición de Espesores…….....	235
Figura 3.6	Ubicación de la Tira en la Máquina de Ensayo de Tracción y Elongación……	237
Figura 3.7	Estiramiento de Tira……	239
Figura 3.8	Registro de Fuerza y Elongación en la Ruptura de la Tira……	240
Figura 3.9	Corte de Tiras de las muestras……	244
Figura 3.10	Separación de Secciones de Pruebas…….....	244
Figura 3.11	Medición de Espesores en Sección de Prueba…….....	245
Figura 3.12	Ubicación de la Sección de Prueba en la Mordaza Inferior……	246
Figura 3.13	Pesaje de la Cabeza Hemisférica del Anillo y del Vástago del Dardo……	246
Figura 3.14	Pesaje del Dardo……	247
Figura 3.15	Ubicación del Dardo en la Mordaza Superior……	248
Figura 3.16	Incubadora e Hidrómetro en la Realización de Ensayo De WVTR……	252
Figura 3.17	Corte, Doblez y Sellado de Pedazo de Muestra…….....	255
Figura 3.18	Denotación en el Pouch……	256
Figura 3.19	Balanza y Desecante…….....	257
Figura 3.20	Pesaje, Sellado Térmico e Introducción del Pouch en La Incubadora…….....	259
Figura 3.21	Gráfica de los Pouches de la Muestra DDR_2 en Quito……	263
Figura 4.1	Resistencia a la Tensión vs. MI…….....	280
Figura 4.2	Acción de la Fuerza de Gravedad sobre las Moléculas Que se Estiran y se Orientan en DT…….....	285
Figura 4.3	Elongación Vs. MI……	287
Figura 4.4	Resistencia al Impacto Vs.MI1……	290
Figura 4.5	Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación para MI”…….....	292
Figura 4.6	Curvas de “ Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación para MI_2”……	293
Figura 4.7	“Permeabilidad Vs. MI” en Guayaquil…….....	295
Figura 4.8	“Permeabilidad Vs. MI” en Quito……	297

Figura 4.9	Resistencia a la Tensión Vs. p…….....	300
Figura 4.10	Acción de la Fuerza de Gravedad sobre las Moléculas que se estiran y se orientan en DT para el caso de Análisis de Influencia de p sobre la resistencia a la Tensión en Dt……	305
Figura 4.11	Elongación Vs. p……	307
Figura 4.12	Resistencia al Impacto Vs. p……	312
Figura 4.13	Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación para P_1……	314
Figura 4.14	Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación para P_2……	314
Figura 4.15	“Permeabilidad Vs. p” en Guayaquil…….....	316
Figura 4.16	“Permeabilidad Vs. p” en Quito……	318
Figura 4.17	Resistencia a la Tensión Vs. Flujo……	327
Figura 4.18	Elongación VS Flujo……	332
Figura 4.19	Resistencia al Impacto Vs. Flujo…….....	337
Figura 4.20	Curvas de Esfuerzo de Tensión VS Elongación para $Flujo_1$.....	339
Figura 4.21	Curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación para $Flujo_2$.....	340
Figura 4.22	“Permeabilidad Vs. Flujo” en Guayaquil…….....	342
Figura 4.23	“Permeabilidad Vs. Flujo” en Quito…….....	343
Figura 4.24	Resistencia a la Tensión Vs. FH……	349
Figura 4.25	Elongación Vs. FH……	351
Figura 4.26	Resistencia al Impacto Vs. FH……	354
Figura 4.27	Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación” para FH_1 ……	356
Figura 4.28	Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación” Para FH_2…….....	356
Figura 4.29	“Permeabilidad Vs. FH” en Guayaquil……	359
Figura 4.30	“Permeabilidad Vs. FH” en Quito……	360
Figura 4.31	Resistencia a la Tensión Vs. DDR……	367
Figura 4.32	Elongación Vs. DDR……	372
Figura 4.33	Resistencia al Impacto……	377
Figura 4.34	Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación” Para DDR_1…….....	379
Figura 4.35	Curvas de “Esfuerzos de Tensión Vs. Elongación” Para DDR_2……	380
Figura 4.36	“Permeabilidad Vs DDR” en Guayaquil……	382
Figura 4.37	“Permeabilidad Vs DDR” en Quito……	384
Figura 4.38	Resistencia a la Tensión Vs. BUR……	390
Figura 4.39	Elongación Vs. BUR……	392
Figura 4.40	Resistencia al Impacto Vs. BUR……	395
Figura 4.41	Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación”	

Figura 4.42 Curvas de “Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación Para BUR_2…… 397
Figura 4.43 Termografía BUR_1…… 399
Figura 4.44 Termografía BUR_2…… 399
Figura 4.45 “Permeabilidad Vs. BUR” en Guayaquil…… 408
Figura 4.46 “Permeabilidad Vs. BUR” en Quito…… 410

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1	Dimensiones de Extrusora……	52
Tabla 2	Relación entre el Esfuerzo cortante Evaluado entre El Fluido y el Cuerpo Cabezal…….....	109
Tabla 3	Influencia Porcentual del DIE GAP sobre el Esfuerzo Cortante……	111
Tabla 4	Número de Discos según su Peso……	200
Tabla 5	Materia Prima utilizada en las Muestras……	223
Tabla 6	Índice de Fluidez y Densidad de cada Muestra……	230
Tabla 7	Condiciones de Procesamiento……	231
Tabla 8	Resultados de Resistencia a la Tensión y Elongación Para las diferentes Muestras……	242
Tabla 9	Apuntes de Resultado de Pruebas de Impacto……	248
Tabla 10	Resultado de Resistencia al Impacto para las diferentes Muestras……	250
Tabla 11	Peso ganado por los Pouches de las muestras DDR_2.....	261
Tabla 12	Agua Saturada……	270
Tabla 13	Resultados de Permeabilidad para las diferentes Muestras……	275
Tabla 14	Datos y Resultados de las Muestras……	278
Tabla 15	Influencia del Melt Index (MI) sobre las propiedades Mecánicas……	279
Tabla 16	Influencia de la Densidad (p) sobre las Propiedades Mecánicas……	299
Tabla 17	Influencia del “Flujo” sobre las Propiedades Mecánicas……	320
Tabla 18	Influencia de la altura de enfriamiento (FH) sobre las Propiedades mecánica……	362 345
Tabla 19	Influencia “DDR” sobre las propiedades mecánicas……	361
Tabla 20	Influencia del BUR sobre las propiedades mecánicas……..	386

ÌNDICE DE PLANOS

Plano 1 Tornillo de Extrusora (PE)

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes de la Tesis

La presente tesis se desarrolló en base a una inquietud que surgió de los miembros de la Asociación Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS), la cual fue planteada al resto de las empresas que pertenecen a este gremio y que tuvo una notoria acogida.

Esta inquietud surgió debido a que la industria de las películas de polietileno no tenían criterios objetivos para seleccionar la materia prima y las condiciones de procesamiento que se necesitaban en la fabricación de dichas películas.

La industria de las películas de polietileno, fabrica las mencionadas películas de manera subjetiva, lo cual generaba, en algunas ocasiones, cualquiera de las siguientes consecuencias:

- Reducción en la calidad de la película.
- Sobredimensionamiento en la calidad de la película.
- Aumento innecesario en los costos de producción.

Cualquiera de estas consecuencias perjudicaba a la industria de las películas de polietileno, razón por la cual se planteó iniciar un estudio de la materia prima, de las condiciones de procesamiento y de las propiedades mecánicas de las películas de polietileno.

1.2 Importancia del Estudio

Al introducirse en el estudio de la materia prima, las condiciones de procesamiento y de las propiedades mecánicas de las películas de polietileno, se pudo observar, de manera objetiva, algún tipo de relación entre la materia prima, las condiciones de procesamiento y las propiedades mecánicas, y así se pudo discernir, con criterios fundamentados, la materia prima y las condiciones de procesamiento que se requerían para la fabricación de una película de polietileno con propiedades

mecánicas determinadas. Esta capacidad de discernimiento generó reducción en los costos de producción, acompañado de un aumento en la calidad de la película, lo cual es importante para la industria de las películas de polietileno.

1.3 Objetivo de la Tesis

El objetivo de la tesis es encontrar algún tipo de relación entre la materia prima, las condiciones de procesamiento y las propiedades mecánicas de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada.

1.4 Estructura de la Tesis

La tesis está estructurada de la siguiente manera:

- **Capítulo 2**

  En el Capítulo 2 se procedió a estudiar la teoría de la materia prima, de las condiciones de procesamiento y de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada.

- **Capítulo 3**

  En el Capítulo 3 se observan los datos y resultados de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, las cuales se obtuvieron como muestras. Los datos indican la materia prima y las condiciones de procesamiento que se utilizaron para la fabricación de dichas muestras; los resultados indicaron las propiedades mecánicas que obtuvieron las muestras, luego de haber sido fabricadas.

- **Capítulo 4**

  En el Capítulo 4 se procedió a realizar los análisis de los datos y resultados de las muestras, con los cuales se logró relacionar la materia prima y las condiciones de procesamiento, con las propiedades mecánicas.

- **Capítulo 5**

  En el Capítulo 5 se procedió a realizar las conclusiones de los análisis, y las recomendaciones para obtener mejores resultados.

CAPÍTULO 2

2. TECNOLOGÍA DE LAS PELÍCULAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

Las películas, en el mundo de los plásticos, son láminas finas flexibles que se las utilizan para transportar y proteger productos, ya sea en forma de funda, empaque ó simplemente en forma de lámina. Estas películas permiten empacar los productos y protegerlos de algunos agentes externos que se presentan al ser transportados, tales como: la humedad, el oxígeno, la luz y la manipulación. Dependiendo del producto, se da mayor importancia a uno u otro agente, por ejemplo: una película que se utiliza para empacar alimentos, debe ser diseñada para proteger el producto de la humedad y el oxígeno, especialmente,

ya que estos son los agentes los que afectan considerablemente al alimento.

Hay películas que se utilizan para fundas de basura. En este caso es fundamental que la película tenga una alta resistencia a la manipulación, es decir, que el proceso de producción de la película se diseñe, de tal manera, que se obtenga una alta resistencia a la tensión y al impacto, permitiendo de esta manera que la película resista la manipulación que siente la misma, al soportar el peso de la basura, el mismo que ejerce tensión sobre la película e impacta sobre ésta al dejarlo caer dentro de la película.

Y así nos podemos dar cuenta que según la aplicación de la película, tendrán mayor relevancia uno ó más agentes en relación a los otros, lo cual se tendrá presente para diseñar el proceso de producción de tal manera que la película obtenga las propiedades necesarias para protegerse de dichos agentes.

La materia prima que se utiliza para la producción de las películas es muy variada, puede ser polietileno de alta densidad, como polietileno de baja densidad ó también el polietileno lineal de baja densidad. Hay otros tipos de materia prima con los cuales también se pueden fabricar películas, entre estos tenemos al polipropileno.

Todos estos tipos de materia prima son polímeros ó también llamados plásticos, los cuales tienen su origen en el crudo de petróleo. Con esto se concluye que los plásticos son compuestos de hidrógeno y carbono.

La razón por la cual se escogió el polietileno de alta densidad para este estudio, radica en **la *estructura molecular*** que tiene dicho polímero, esta estructura es privilegiada con respecto a la estructura molecular de los otros polímeros, de tal manera, que la estructura molecular del polietileno de alta densidad se puede aprovechar más para mejorar las ***propiedades mecánicas*** de la película y para protegerla mejor de los agentes externos. Más adelante se explicará con detalle el por qué la estructura molecular del polietileno de alta densidad es privilegiada con respecto a la estructura molecular de los demás polietilenos.

También se observa el proceso de producción de las películas de polietileno y las variables que intervienen en el mismo, de esta manera se puede estudiar la relación que existe entre las variables que intervienen en el proceso de producción y las propiedades mecánicas de las películas. A las variables que intervienen en el proceso de producción se las llamará ***condiciones de procesamiento***.

Finalmente se observan los procesos de calidad de una película, los cuales cumplen normas ASTM que nos llevan a profundizar en las

propiedades mecánicas de las películas y, en su relación con la estructura molecular y condiciones de procesamiento de las mismas.

2.1 Historia del Polietileno de Alta Densidad

El camino de los plásticos comenzó en la segunda mitad del siglo XIX, con una serie de sustancias naturales modificadas, como fibras vulcanizadas en 1859, nitrato de celulosa en 1869 y caseína tratada con fenol en 1897.

En 1898 HANZ VON PECHMANN, químico alemán, descubrió uno de los plásticos más importantes en la actualidad, el POLIETILENO. El descubrimiento surge del calentamiento de una sustancia llamada DIAZOMETANO, sus colegas EUGEN BAMBERGER y FRIEDRICH TSCHIRNER caracterizaron la sustancia que estaba calentando y se dieron cuenta que era grasosa y blanca, además que estaba compuesta por una larga cadena de $-CH_2-$; a la cual se la llama en la actualidad polietileno. Es por esto que se le otorga el descubrimiento del polietileno a Hanz Von Pechmann.

El 27 de marzo de 1933 REGINALD GIBSON y ERIC FAWCETT en Inglaterra, quienes trabajaban para los Laboratorios ICI, en un proceso de síntesis aplicaron una presión de aproximadamente 1.400 bar y una temperatura de 170°C en una autoclave, para obtener un material

de alta viscosidad y color blanquecino que hoy en día se conoce como polietileno. Con este proceso, llamado en la actualidad PROCESO DE ALTA PRESIÓN, se logró producir el POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD ó “LDPE” por sus siglas en inglés.

La presión requerida para producir polietileno era demasiado alta, por ello es que la investigación sobre catalizadores realizada por el alemán KARL ZIEGLER y el italiano GIULIO NATTA, que dio origen a los catalizadores ZIEGLER-NATTA, valió el reconocimiento del más famoso premio a la ciencia a nivel mundial, el premio Nobel en 1963 por su aporte científico a la química. Con estos catalizadores se logró la producción de polietileno a presiones normales de 20 a 40 bares y temperaturas normales de 100 a 150 ºC. Con este proceso, llamado en la actualidad PROCESO DE BAJA PRESIÓN, se logró producir el POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD ó “HDPE” por sus siglas en inglés.

2.2 Del Petróleo Crudo al Etileno

El ETILENO (CH_2=CH_2) es un monómero, es decir, está compuesto por moléculas simples, las cuales se enlazan con otros monómeros de la misma composición para formar un polímero llamado polietileno.

Este enlace se logra por medio del proceso de POLIMERIZACIÓN ó SÍNTESIS. El proceso consiste, en la actualidad, en aplicar presión, temperatura y catalizadores para lograr enlazar un gran número de monómeros y así formar el polímero. Los catalizadores son compuestos químicos que no intervienen en la reacción pero si la inicia y la acelera. El polímero que es objeto de estudio en esta tesis, es el POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD, por esta razón tenemos que encontrar el origen y formación de este material para poder darnos cuenta con detalle de la composición que tiene y de los procesos previos para la formación del mismo, sólo así se puede comprender su estructura molecular, lo cual se verá que influye en sus propiedades.

Todos los plásticos tienen como base al CRUDO DE PETRÓLEO, esto quiere decir que los plásticos son materiales orgánicos compuestos esencialmente por CARBONO (C) e HIDRÓGENO (H). Por medio del proceso de DESTILACIÓN FRACCIONADA que se aplica al crudo, se obtienen diversos hidrocarburos, de los cuales se obtienen productos bases para la formación de materiales útiles para la industria. Hay dos clases de hidrocarburos: SATURADOS y NO SATURADOS.

2.2.1 Hidrocarburos Saturados

Aquellos que tienen carbonos vinculados por un solo enlace:

$$C_n H_{2n+2}$$

En general se denominan estos hidrocarburos como alcanos o parafinas, siendo el Metano (CH_4) el más simple de este grupo. La Figura 2.1 se muestra la estructura química de los Hidrocarburos Saturados:

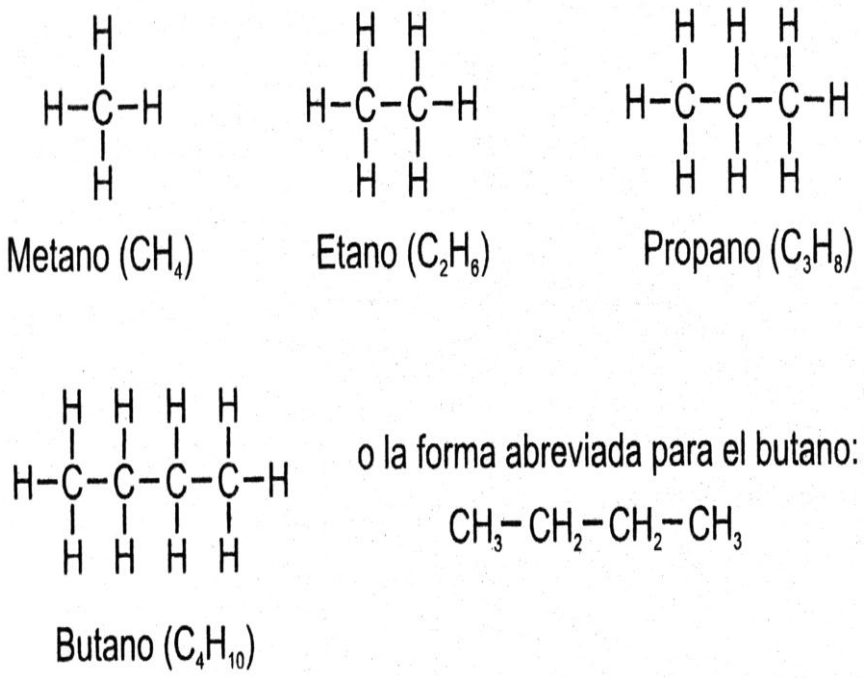


FIGURA 2.1 HIDROCARBUROS SATURADOS

2.2.2 Hidrocarburos No Saturados

Son aquellos en los cuales dos átomos de carbonos se unen por medio de 2 ó 3 valencias. Su fórmula general es:

$$C_n H_{2n}$$

En este grupo se habla de enlaces bi - valentes y tri - valentes. Los hidrocarburos con un doble enlace se denominan alquenos u olefinas. La Figura 2.2 nos puede mostrar la estructura química de los Hidrocarburos No Saturados, para ilustrar mejor los tipos de enlace que se producen en estos hidrocarburos:

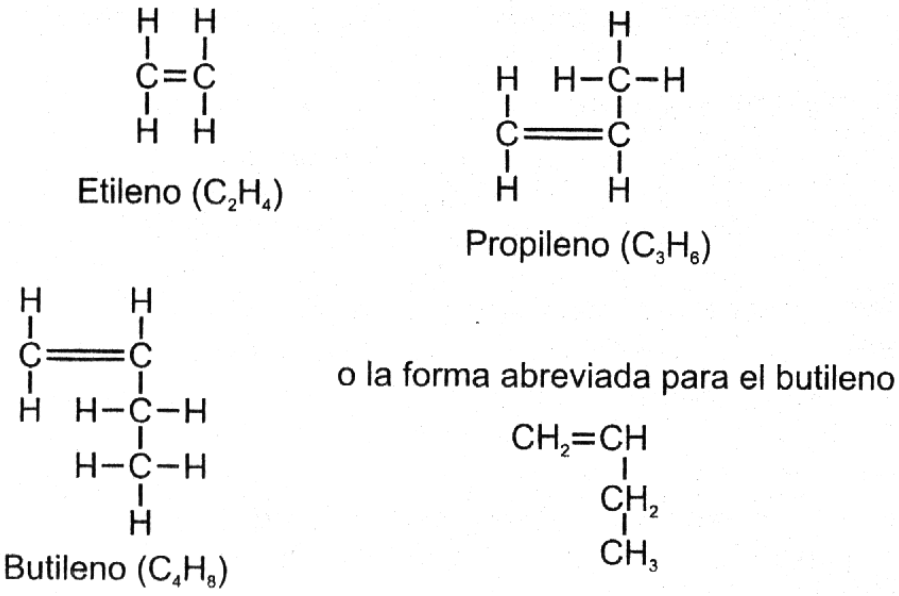


FIGURA 2.2 HIDROCARBUROS NO SATURADOS

2.2.3 Destilación Fraccionada

El proceso de destilación es el más importante en una industria de refinación de crudo de petróleo, no sólo porque de aquí podemos obtener el hidrocarburo del cual se obtiene el producto base para los plásticos, sino que también de otros hidrocarburos que al procesarlos , dan productos bases para obtener diversos productos finales que son muy útiles, como:

- ✓ Gas Licuado de Petróleo
- ✓ Gasolina para aviones
- ✓ Gasolina para automóviles
- ✓ Diesel para carros pesados

El proceso de destilación consiste en llegar al punto de ebullición de cada uno de los hidrocarburos que componen al crudo de petróleo, para poder separarlos mediante un método de condensación. La figura 2.3 muestra un esquema de una torre de destilación primaria.

En este esquema se puede observar que el crudo de petróleo líquido pasa por un proceso de precalentamiento antes de entrar al horno, donde es calentado hasta 400 ºC, convirtiéndolo en vapor supercalentado a presión atmosférica.

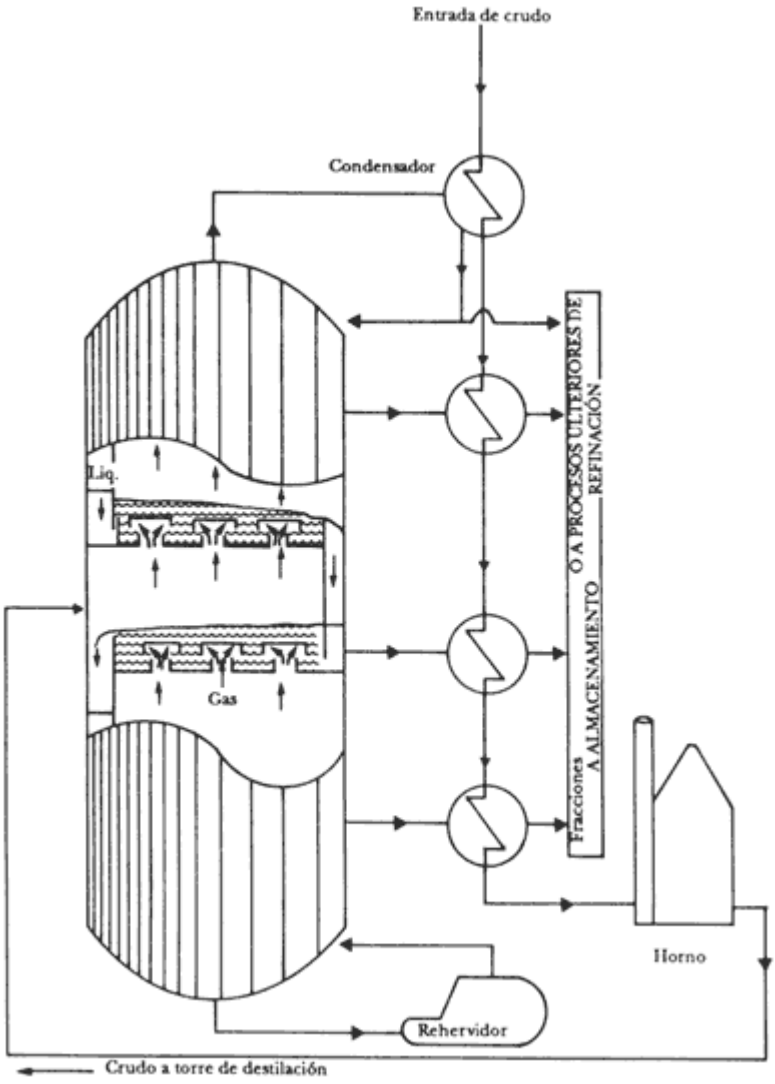


FIGURA 2.3 ESQUEMA DE TORRE DE DESTILACIÓN PRIMARIA

Este vapor entra por la parte inferior de la torre, la cual está dividida en diferentes platos ó bandejas. Cada vez que el vapor va ascendiendo, va perdiendo calor y así cada uno de los

hidrocarburos que componen al crudo llegan a su temperatura de saturación y posteriormente se condensan.

Al condensarse el hidrocarburo, cae sobre la bandeja que se encuentra a su misma temperatura, posteriormente se canaliza este condensado a otros procesos físicos y/ó químicos, en los cuales se transforma en productos bases para la fabricación de productos finales, como los que se mencionó al iniciar la explicación de la destilación fraccionada.

Los hidrocarburos de más bajo punto de ebullición no caen en las bandejas, sino que salen como gases por la parte superior de la torre hacia un condensador que trabaja con el crudo pesado, al ser éste precalentado; es así como se condensan estos gases que luego son tratados para futuros productos.

Los hidrocarburos que se separan en la destilación primaria, desde los más livianos hasta los más pesados, son los siguientes:

1. Por la parte superior de la torre salen los hidrocarburos más ligeros, es decir, los que tienen el más bajo punto de ebullición: GAS NATURAL y NAFTA LIGERA.

De estos productos nacen el GLP, mezclas de gasolina, disolventes y una serie de petroquímicos, como es el caso del grupo de las OLEFINAS. Las olefinas nacen directamente de la nafta ligera, por medio de un proceso físico llamado CRAQUEO TÉRMICO, el cual consiste en someter a un compuesto, en este caso la nafta ligera, a presión y temperatura por medio de vapor de agua para separar sus moléculas en moléculas más livianas. Las olefinas encierran el siguiente grupo:

- ✓ Etileno
- ✓ Propileno
- ✓ Butileno

2. Por la parte lateral salen los hidrocarburos de punto de ebullición intermedio: gasóleo, nafta pesada y destilados. De estos hidrocarburos nacen el queroseno, diesel combustible de avión y material para craqueo.

3. Los hidrocarburos con mayor punto de ebullición son los residuos, los cuales se encuentran en la parte inferior. Estos residuos son enviados a un proceso posterior de destilación al vacío para poder fraccionarlos en diversos hidrocarburos

que después pasan a un proceso de craqueo y así producir productos bases.

Una vez que se tiene el origen del ETILENO, se puede introducir, con detalle, en la formación del POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD.

2.3 Producción del Polietileno de alta densidad.

Una vez que ya se sabe de dónde proviene el producto base del polietileno de alta densidad, se puede avanzar en el estudio de este polímero, estudiando con detalle el proceso de formación y obtención del mismo.

El proceso de formación de todo polímero es la POLIMERIZACIÓN, la cual consiste en enlazar un gran número de monómeros de igual ó similar composición para formar el ya mencionado polímero. Los monómeros que se utilizan deben tener dobles enlaces para reaccionar, lo cuales son abiertos por el calor y el catalizador que inicia y acelera la reacción de polimerización, de esta manera se van uniendo los monómeros hasta formar la cadena que es la que representa al polímero. La Figura 2.4 nos muestra un esquema de polimerización, en el cual

se detalla la apertura del doble enlace y la formación de la cadena ó macromolécula.

Hay tres procesos por los cuales se puede obtener el polietileno de alta densidad, éstos son: en SOLUCIÓN, en SUSPENSIÓN y en FASE GASEOSA.

2.3.1 Polimerización en Solución

En este proceso se utiliza un solvente, el cual disuelve al monómero y al polímero. Al diluir el monómero en el solvente en presencia del iniciador de la polimerización, se libera calor de la reacción y este es absorbido por el solvente, lo cual ayuda a reducir la velocidad de polimerización.

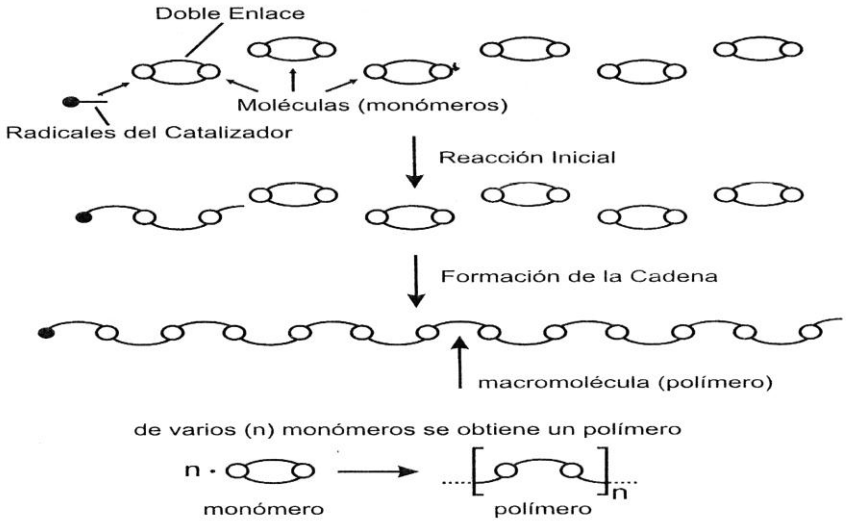


FIGURA 2.4 ESQUEMA DE POLIMERIZACIÓN

2.3.2 Polimerización en suspensión

En este proceso se utiliza agua como medio de reacción y el monómero es dispersado, más que disuelto, en el medio. Al incorporar el catalizador, se acelera la reacción y se obtiene el polímero en forma de pequeñas perlas que son filtradas, lavadas y secadas para formar polvo.

2.3.3 Polimerización en fase gaseosa

En este proceso comienza la alimentación directa del etileno, que debe ser de alta pureza (aproximadamente del 99.8%), y el catalizador en polvo (cromo modificado con sílice). Ambos se alimentan continuamente y el polietileno es desalojado intermitentemente del reactor, a través de una cámara con sello para gases.

Los CATALIZADORES o INICIADORES DE LA POLIMERIZACIÓN que se utilizan en cualquiera de los tres procesos, son del tipo Óxido de un Metal de Transición ó del tipo Ziegler – Natta (Cloruros de Titanio ó Compuestos de Aluminio). Los catalizadores influyen en la rapidez de la reacción de polimerización, dependiendo del tipo de catalizador que se utilice, se tendrá mayor ó

menor temperatura en la reacción, lo cual nos lleva a una mayor ó menor velocidad de la reacción, respectivamente.

Al controlar la temperatura de la reacción, se está controlando la longitud de las cadenas, lo cual determina el peso molecular y la distribución de pesos moleculares. Estas dos propiedades del polímero, el peso molecular y la distribución de pesos moleculares, influyen en las propiedades del producto que se vaya a fabricar, en base a dicho polímero.

En la industria petroquímica, la polimerización se realiza en grandes reactores, los cuales envían el producto de la reacción a un proceso de centrifugación para separar al polímero de los otros compuestos de la reacción. Luego el polímero es enviado a una extrusora para que se convierta en Pellets ó Resina de polietileno de alta densidad, dichos pellets son granos de 3 mm x 3 mm aproximadamente. La Figura 2.5 muestra la forma de estos pellets:

FIGURA 2.5 RESINA DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

A continuación se mostrará un esquema que muestra las etapas del proceso de polimerización a escala industrial:

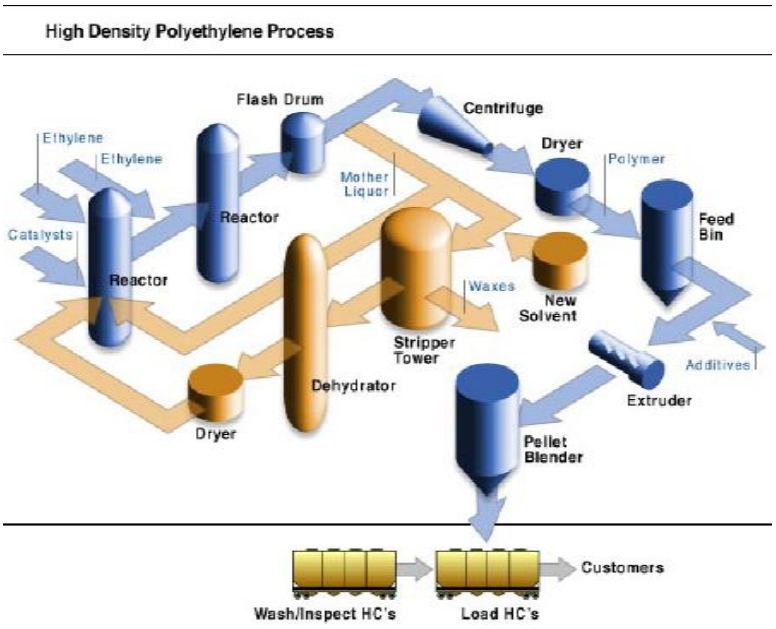


FIGURA 2.6 POLIMERIZACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL

2.4 Estructura Molecular del Polietileno de Alta Densidad

La estructura molecular de este tipo de polietileno tiene diferencias considerables con respecto a la estructura molecular de otros tipos de polietileno. Se empezará analizando la macromolécula del polietileno de alta densidad para encontrar las diferencias.

2.4.1 Macromolécula

La macromolécula del polietileno de alta densidad es lineal, en cambio las macromoléculas de otros tipos de polietileno no son lineales, son ramificadas; por ejemplo, tenemos entre los más comerciales: Polietileno de Baja Densidad y Polietileno Lineal de Baja Densidad ó “LLDPE” por sus siglas en inglés.

En la Figura 2.7 se puede apreciar la macromolécula del polietileno de alta densidad:

FIGURA 2.7 MACROMOLÉCULA DE HDPE

Se puede observar que la macromolécula de HDPE no tiene ramificaciones, esto es lo que permite que este tipo de polietileno sea llamado de alta densidad, ya que el no tener ramificaciones permite que las macromoléculas estén más unidas. También se muestra la representación química de dicha macromolécula, de manera estructural, donde se puede apreciar que su composición tiene linealidad, tal como lo muestra la siguiente figura:

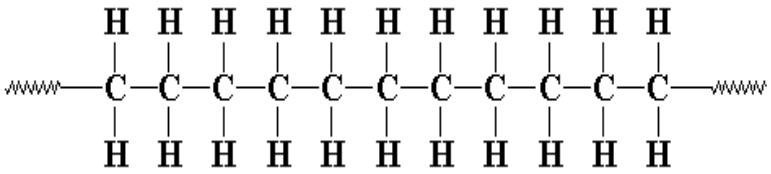


FIGURA 2.8 ESTRUCTURA QUÍMICA DE HDPE

A continuación se observan las macromoléculas del LDPE y del LLDPE. Las diferencias, figurativas con respecto a la macromolécula de HDPE, son las siguientes:

1. La cantidad y el tamaño de las ramificaciones del LDPE supera abismalmente la cantidad y tamaño de las ramificaciones del HDPE, y esto es lógico ya que el HDPE ni siquiera tiene ramificaciones. El carácter ramificado del LDPE se debe a las altas presiones y temperaturas, así como el tipo

de catalizador que se utiliza en su proceso de polimerización. En este caso, es el oxígeno que sirve como catalizador. La Figura 2.9 muestra el carácter ramificado del LDPE.

FIGURA 2.9 MACROMOLÉCULA DE LDPE

Esto es lo que causa que el LDPE sea de baja densidad, ya que la cantidad de ramificaciones y el tamaño de ellas causa que las macromoléculas estén muy separadas con respecto a la distancia que tienen entre si las macromoléculas de HDPE.

También en la Figura 2.1. se tiene la estructura química del LDPE para poder realizar una comparación más detallada:

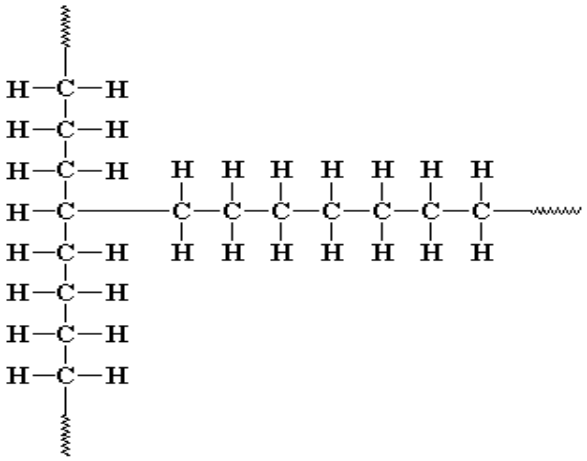


FIGURA 2.10 ESTRUCTURA QUÍMICA DE LLDPE

Esta figura nos muestra el carácter ramificado que tiene la macromolécula de LDPE donde los enlaces de etileno no sólo se realizan en una sola dirección, sino que también lo hacen en otras direcciones, como lo muestra la Figura 2.10.

2. Además se verá cómo la macromolécula del LLDPE se acerca más al carácter lineal que tiene el HDPE, o sea, el LLDPE tiene ramificaciones mucho más pequeñas y menos frecuentes en comparación al LDPE.

   Esto se da debido a que el LLDPE tiene un proceso de polimerización similar al del HDPE, la similitud está en la polimerización del etileno a baja presión, la diferencia se da al añadir un monómero diferente al etileno en el proceso de

polimerización del LLDPE; es decir, que a parte del etileno, también se polimeriza otro monómero.

Como podemos observar, la presencia de un monómero adicional es lo que genera pequeñas ramificaciones en la macromolécula. Este monómero que se añade puede ser cualquiera del grupo de los Alquenos, en el cual se encuentran: Buteno, Hexeno y Octeno. Cualquiera de estos se pueden polimerizar junto con el etileno para formar el copolímero LLDPE.

Un copolímero es la polimerización de dos ó tres monómeros diferentes en una cadena ó macromolécula.

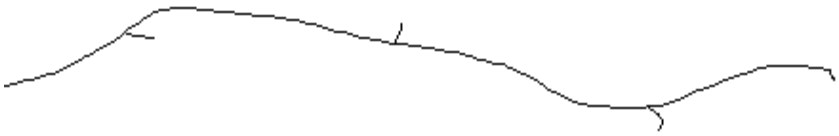


FIGURA 2.11 MACROMOLÉCULA DE LDPE

La Figura 2.11 muestra lo explicado en el párrafo anterior, el tamaño y la frecuencia de las ramificaciones son menores.

Esto es lo que permite que el LLDPE tenga una densidad intermedia entre el HDPE y el LDPE.

La densidad es la propiedad física de un polímero ayuda a comprender otras propiedades. El HDPE, por tener mayor densidad que el LDPE y que el LLDPE, tiene menor espacio entre sus moléculas, esto permite que haya menor transmisión de vapor de agua y/ó gases a través de sus moléculas, lo cual es un beneficio en la producción de películas que se utilizan como empaques plásticos para la protección de productos, como: alimentos ó piezas metálicas.

Además, la mayor densidad mejora propiedades como: Resistencia a la Tensión y Resistencia al Impacto, ya que al estar más unidas las cadenas, es más difícil separarlas al ser estirada ó al ser impactada la película. Estas propiedades son muy importantes en la producción de películas ó empaques que van a ser manipulados de manera considerable.

La alta densidad se debe al proceso que se utiliza para la fabricación del polímero, las tres clases de polietileno que hemos nombrado provienen de un mismo monómero: el etileno. La diferencia se observa en el proceso de polimerización: presión, temperatura, catalizadores y otros monómeros que se puedan añadir al proceso.

En el caso del HDPE, la disminución es considerable en la presión y temperatura de polimerización, además de los tipos de catalizadores y de la presencia de un solo monómero, hace que este tipo de polietileno tenga una macromolécula ó cadena de carácter lineal y más ordenada, lo cual favorece a que las fuerzas de unión entre las cadenas sean mayores y así estén más unidas.

Las fuerzas de unión entre las cadenas son llamadas fuerzas de valencia secundaria y son débiles con respecto a las fuerzas de valencia principal, estas últimas son las fuerzas que existen entre los enlaces que forman la cadena. Las fuerzas de valencia secundaria se dividen en cuatro tipos:

- ✓ Fuerzas de Dispersión
- ✓ Fuerzas Dipolares
- ✓ Fuerzas de Inducción
- ✓ Fuerzas de Puentes de Hidrógeno

Las ***Fuerzas de Dispersión*** son fuerzas de atracción irregular. Reciben este nombre porque la atracción se da entre dos átomos de dos cadenas vecinas, cuyos electrones están girando continuamente, alineándose así de manera periódica con el

núcleo positivo del átomo vecino. La Figura 2.12 puede ilustrar lo explicado.

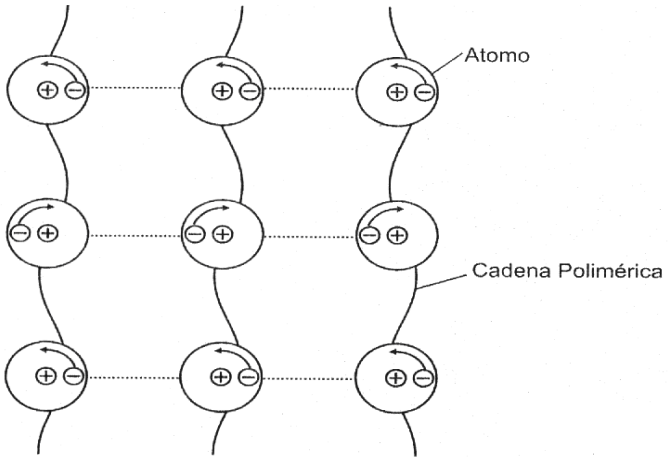


FIGURA 2.12 FUERZAS DE DISPERSIÓN

Las ***Fuerzas Dipolares*** se producen por la formación dipolos en las cadenas, ordenados de manera periódica en cada cadena. Esto causa una fuerza de atracción electrostática entre un polo positivo de una cadena y un polo negativo de otra cadena. La Figura 2.13 ilustra lo explicado:

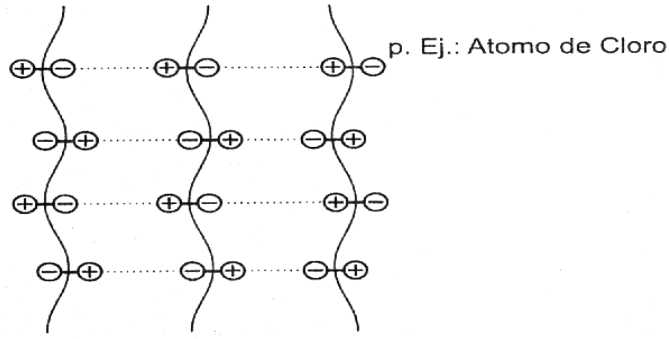


FIGURA 2.13 FUERZAS DIPOLARES

Las ***Fuerzas de Inducción*** surgen del efecto de los campos de los dipolos, ya que ellos pueden deformar la envoltura de electrones de los grupos atómicos vecinos y con ello se producen puntos de mayor carga eléctrica.

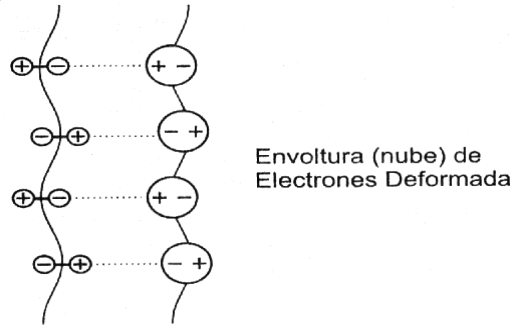


FIGURA 2.14 FUERZAS DE INDUCCIÓN

Las ***Fuerzas de Puentes de Hidrógeno*** aparecen cuando átomos de hidrógeno de ciertos grupos atómicos se polarizan positivamente y producen una fuerza de atracción electrostática con los elementos negativos de la cadena vecina.

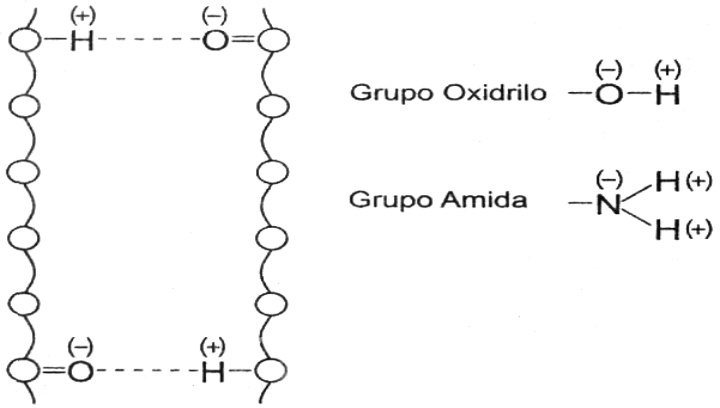


FIGURA 2.15 FUERZAS DE PUENTES DE HIDRÓGENO

Como observamos, las fuerzas de valencia secundaria son de origen electrostático, ya que siempre se producen por la atracción de dos cargas eléctricas opuestas, positivas y negativas. Por el estudio que se ha venido haciendo acerca de la estructura molecular del HDPE y por las comparaciones que se han hecho con otras clases de polietileno al realizar dicho estudio, se concluye que las fuerzas de valencia secundaria son más intensas en el HDPE que en el LLDPE y el LDPE, yendo de una intensidad mayor a una intensidad menor en estos dos últimos tipos de polietileno.

Es lógico que el HDPE tenga mayor intensidad en sus fuerzas de valencia secundaria. Si hay mayor fuerza de atracción entre las cadenas, estas están más unidas. Esto se da por el carácter lineal que tiene el HDPE.

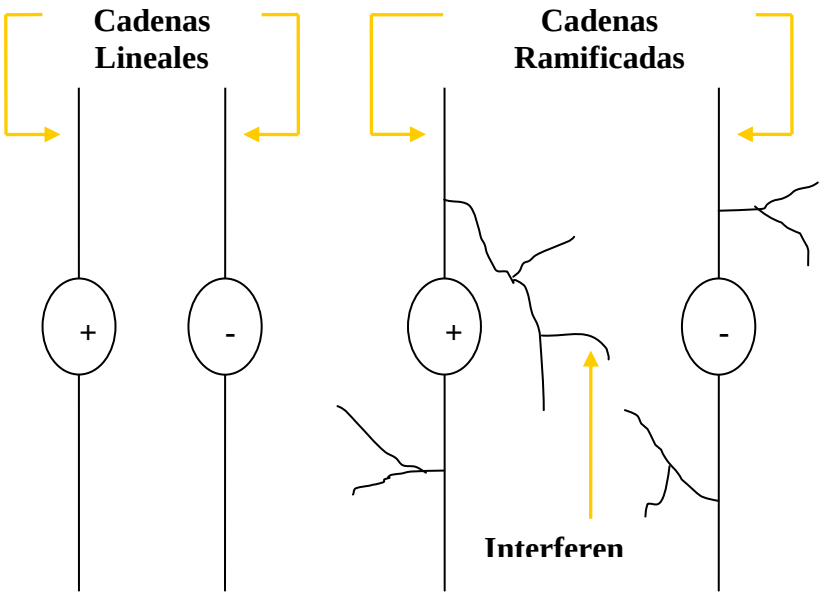


FIGURA 2.16 CADENAS LINEALES Y RAMIFICADAS

La Figura 2.16 muestra la interferencia que existe entre dos átomos vecinos de dos cadenas. Las ramificaciones son las que causan esta interferencia, ocasionando que se pierda intensidad en la fuerza de atracción electrostática entre dos cargas opuestas. Como se puede observar, esto se da en los polietilenos ramificados, LLDPE y LDPE. El HDPE no tiene ramificaciones, su cadena lineal no tiene interferencia alguna, por lo que la intensidad de la fuerza de atracción electrostática es mucho mayor y se refleja en el espacio que existe entre sus cadenas, es decir, están más unidas que las cadenas de LDPE y LLDPE.

El estudio de la densidad del polietileno es importante, ya que es la base de su estructura molecular y a la vez es una propiedad física que caracteriza al polietileno. Esta propiedad física también es importante para comprender las propiedades mecánicas que adquiera una resina de polietileno, en este caso, el polietileno de alta densidad. Hay otra cosa que se debe saber acerca de la estructura molecular del polietileno de alta densidad, como lo es el tamaño de las cadenas, lo cual llevará a comprender mejor el origen de otras propiedades físicas del HDPE, como: peso molecular y distribución de pesos moleculares. Estas propiedades, como se verá más adelante, influyen en las propiedades mecánicas del producto final que se fabrique en base al HDPE.

2.4.2 Peso Molecular

Como ya se ha mencionado, el tamaño de la cadena depende del proceso de polimerización, en sí, de la temperatura a la cual se llegue en la reacción. Esta temperatura depende del tipo de catalizador que se utilice para acelerar la reacción, en nuestro estudio dependerá de que si el catalizador es del tipo Óxido de un Metal de Transición ó si es del tipo Ziegler – Natta (Cloruros de Titanio o Compuestos de Aluminio).

Al utilizar un catalizador que provoque mayor temperatura en la reacción, mayor será la rapidez de la misma y así se obtendrá menor longitud en las cadenas, es decir, se obtendrá menor peso molecular.

En una resina de polietileno hay un número de cadenas y cada cadena tiene su peso molecular. Si la cadena es más larga, la cadena tendrá mayor peso molecular, y si la cadena es más corta, la cadena tendrá menor peso molecular. Esto influye en el peso molecular de la resina, ya que se necesita promediar los pesos moleculares de las cadenas para llegar al peso molecular de la resina de polietileno.

Ahora está más clara la influencia del tamaño de la cadena en el peso molecular de la resina, mientras más pequeñas sean las cadenas, menor peso tendrá cada una de ellas y así el promedio de los pesos moleculares será menor, obteniendo un menor peso molecular para la resina de polietileno. El peso molecular es una propiedad física que de la estructura molecular, ésta es la razón del estudio de esta propiedad.

El peso molecular del polietileno está representado por el Índice de Fluidez ó “MI” por sus siglas en inglés. El MI es un indicador

físico que se mide según la cantidad de masa fundida de polietileno que pasa a través de un orificio, mediante la acción de una fuerza de 2.12 Kg, durante diez minutos.

La unidad de medida para este indicador físico es *g/10 min*. Mientras mayor es el MI, menor peso molecular tendrá el polímero, y viceversa. Es fácil llegar a la razón de esta relación: Mientras menor es el peso molecular del polietileno, menor será el tamaño de las cadenas. El menor tamaño macromolecular facilita el paso del polietileno a través del orificio, no sólo por la menor inercia, sino que también porque al ser más pequeñas las moléculas, tienden a tropezarse menos entre ellas y así fluir con mayor libertad a través del orificio. Entonces, mientras menor sea el peso molecular del polímero, tendrá mayor facilidad para pasar a través del orificio, esto ocasionará que pase mayor cantidad del polímero a través del orificio en un tiempo determinado, o sea, se tendrán más gramos del polímero en diez minutos.

El mismo análisis se realiza para razonar el orden inverso de la relación Peso Molecular – MI. Esto queda para el lector.

Más adelante se verá de qué manera las condiciones de procesamiento, como su nombre lo indica, condicionan los

beneficios que el MI puede dar a las propiedades del producto final, en este caso, películas de polietileno de alta densidad. Pero para ir adelantando, mientras mayor es el MI, mejores serán las propiedades del producto, manteniendo las condiciones de procesamiento constantes.

2.4.3 Distribución de Pesos Moleculares (MWD)

Como ya se mencionó, cada cadena tiene su peso molecular, ya que cada cadena tiene una longitud, la cual es determinada en el proceso de polimerización, originando una distribución de pesos moleculares en una resina de polietileno. La distribución de pesos moleculares ó “MWD” por sus siglas en inglés, se obtiene en laboratorio a través de un proceso de cromatografía de permeación de gel (GPC).

La Figura 2.17 muestra las curvas características del proceso GPC, cada una de ellas indica una distribución específica y diferente, es decir, se observará una distribución ancha y una distribución angosta.

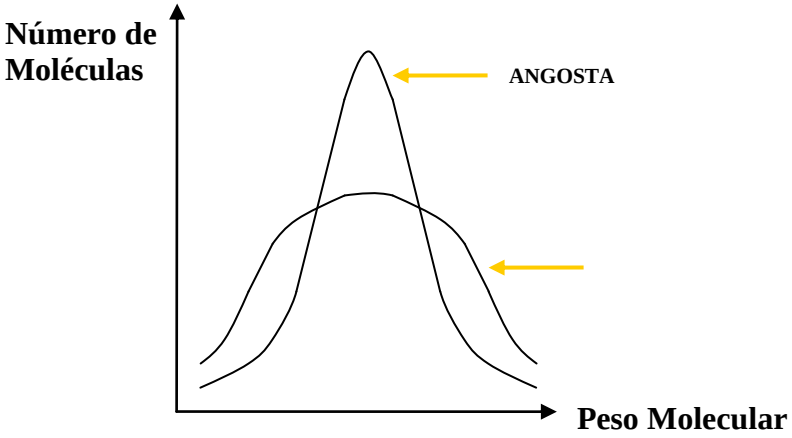


FIGURA 2.17 DISTRIBUCIÓN DE PESOS MOLECULARES

Angosta

Esta distribución es la óptima, ya que la mayor parte de las cadenas ó moléculas, conservan pesos similares, por lo tanto conservan longitudes similares. El tener longitudes similares causa que la resina de polietileno tenga mejores propiedades, lo cual, dependiendo de las condiciones de procesamiento, como veremos más adelante, favorece a las propiedades mecánicas de los productos que se fabriquen en base al polietileno de alta densidad.

Ancha

En una distribución ancha de pesos moleculares, hay un gran número de cadenas con cierto peso molecular, hay otro gran

número de cadenas con otro peso molecular y hay otro conjunto considerable de moléculas con pesos moleculares diferentes. En conclusión, en la distribución ancha no hay uniformidad en la longitud de las cadenas, por lo cual no se obtienen buenas propiedades mecánicas en una resina con distribución de este tipo.

La influencia del MWD sobre las propiedades del polietileno, tiene su origen en las fuerzas de valencia secundaria. Cuando no hay uniformidad en las cadenas, pierde intensidad la fuerza de atracción electrostática que existe entre cadenas vecinas, en cambio, cuando hay uniformidad en el tamaño de las cadenas, aumenta la intensidad de la fuerza. La Figura 2.18 ilustrará acerca del hecho

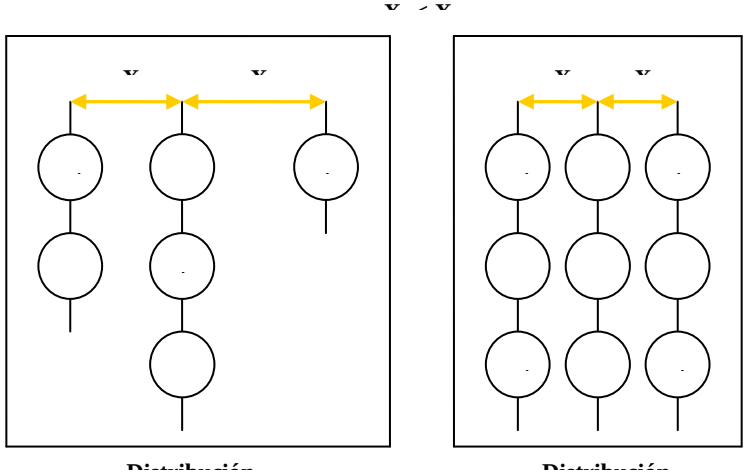


FIGURA 2.18 DISTRIBUCIÓN MOLECULAR Vs. FUERZA

Como se puede observar en la figura anterior, en la distribución angosta se obtiene un menor espacio entre cadenas, el cual es uniforme; esto se debe a que la fuerza de atracción entre cadenas es mayor que en la distribución ancha.

La fuerza es mayor porque hay mayor número de parejas de cargas opuestas interactuando entre sí, favoreciendo así a las propiedades del polímero, ya que mientras más unidas están las cadenas mayor densidad tendrá una resina de polietileno y esto trae beneficios en la barrera contra fluidos como vapor de agua y/ó gases en general, es decir, la resina se vuelve menos permeable.

También, la distribución angosta, favorece a que la resina goce de una buena resistencia a la tensión y de una buena resistencia al impacto, ya que al ser más densa la resina, será más difícil que sus moléculas se separen o se rompan.

Una comparación de distribución de pesos moleculares se la hace incluso entre dos resinas del mismo material, como ejemplo nuestro material en estudio, el HDPE. En el HDPE se maneja un rango de densidades, el cual contiene variaciones de centésimas ó milésimas. Entonces, al observar dos resinas de HDPE con densidades diferentes, se puede concluir que la

resina de mayor densidad es la que tiene una distribución de pesos moleculares más uniforme o angosta, la cual beneficia a las propiedades del polietileno.

Una distribución de pesos moleculares más uniforme, ya sea por una variación en el orden de las centésimas en la densidad, influirá en las propiedades del producto final, si se mantienen las condiciones de procesamiento constantes. Es decir, que al mantener las condiciones de procesamiento constantes, se obtienen mejores propiedades si más angosta es la distribución de pesos moleculares, o sea, si más densa es la resina, aunque sea mayor en el orden de las centésimas.

Finalmente, la distribución de pesos moleculares está representada por la Relación de los Flujos del polímero Fundido ó “MFR” por sus siglas en inglés. Esta relación es, sencillamente, la relación de los índices de fluidez ó de los MI. Para realizar la relación de los MI, se miden a diferentes fuerzas, uno se mide aplicando la fuerza estándar de 2.12 Kg y el otro se mide aplicando una fuerza de 21.2 Kg. Así se obtiene dos índices de fluidez, uno a 2.12 Kg y otro a 21.2 Kg, los cuales se dividen ($MI_{21.2\ Kg}$ / $MI_{2.12\ Kg}$) para obtener el MFR que es el que representa al MWD. Mientras Menor es el MFR, más

angosta es la distribución de pesos moleculares, lo cual beneficia a las propiedades del polietileno.

2.4.4 Cristalinidad

La cristalinidad es una propiedad que refleja la manera en que las moléculas ó cadenas se encuentran en la resina, es decir, si las moléculas se encuentran de manera ordenada o desordenada.

La cristalinidad del HDPE es mayor que la del LDPE y LLDPE, esto quiere decir que las moléculas de HDPE se encuentran más ordenadas que las moléculas de LDPE y LLDPE. Esto se debe al proceso de polimerización que se aplica para la producción de cada uno de estos polietilenos.

El orden de la estructura molecular de un polímero dependerá del tipo de catalizador que se utilice, también dependerá de que si se añade o no uno o dos monómeros a parte del principal, en nuestro caso el principal es el etileno. Esto nos lleva a encontrar la respuesta de por qué el HDPE es más cristalino que el LDPE y que el LLDPE.

Sencillamente el HDPE es más cristalino porque al utilizar los catalizadores Ziegler – Natta, la reacción se acelera de manera

coordinada, permitiéndole a las moléculas de etileno, en su mayoría, enlazarse de manera ordenada. El hecho de utilizar un solo monómero, es lo que también favorece al buen orden de las cadenas. La Figura 2.19 nos puede ilustrar acerca de cómo se podría apreciar una estructura ordenada o cristalina, y de cómo se podría apreciar una estructura desordenada o amorfa.

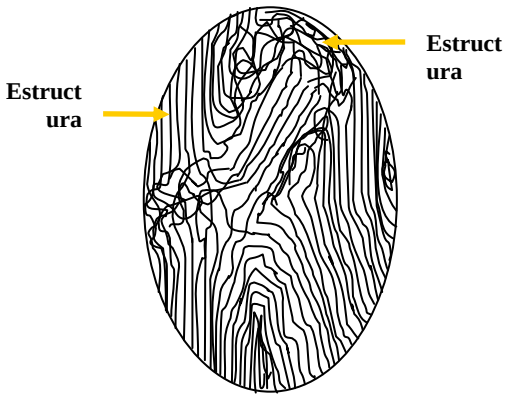


FIGURA 2.19 TERMOPLÁSTICO SEMICRISTALINO

El polietileno es un termoplástico, ya que se ablanda con el calor y se vuelve a endurecer al enfriarse. Como se puede observar en la figura, el polietileno es un termoplástico semicristalino, esto quiere decir que es un material que tiene zonas amorfas y zonas cristalinas en su estructura molecular. El polietileno de alta densidad es el polietileno que más zonas cristalinas tiene en su estructura molecular, lo cual ya se sabe por qué es así.

En la Figura 2.19 se observa que el termoplástico que se busca representar es el polietileno de alta densidad, ya que las zonas cristalinas cubren aproximadamente el 70% de la estructura molecular mostrada. Este porcentaje se encuentra dentro del rango de cristalinidad del HDPE: 60 – 80%.

Por último, al estudiar la cristalinidad del polietileno, se puede dar cuenta que la densidad es una medida que representa muy bien al orden de las cadenas en la estructura molecular. Esto es lógico, ya que mientras más cristalino es el polietileno, más ordenadas están sus moléculas, esto quiere decir que sus moléculas están más unidas y estiradas, formando así regiones de líneas paralelas que son las que, según la cantidad de regiones, determinan la densidad del polietileno.

Como ya se ha mencionado, el HDPE tiene más regiones cristalinas y por ende es el más denso, esto nos lleva a la sencilla conclusión de que la densidad es una medida de la cristalinidad, por lo tanto, mientras mayor sea la cristalinidad, mayor será la resistencia a la tensión, al impacto y a la transmisión de vapor de agua y/ó gases.

Una vez concluido el estudio de la estructura molecular, queda claro que dependiendo de la estructura que tenga el HDPE, se

mejorarán o no las propiedades de la resina, es decir, que mientras más denso sea el HDPE, dentro de su rango de densidades, mayor impermeabilidad al vapor de agua y/ó gases en general tendrá, también tendrá una mayor resistencia a la tensión y mayor resistencia al impacto.

También se puede notar de que mientras menor es el tamaño de las cadenas, mayor es el MI de la resina, con lo cual se mejorarían las propiedades mecánicas de la película si se mantienen constantes las condiciones de procesamiento.

Por último, la distribución de pesos moleculares está representada por el MFR, el cual nos indica si la distribución es angosta o ancha; en el caso de ser angosta, las propiedades mecánicas del polietileno serán mejores.

Vale la pena mencionar que en los últimos años se han descubierto otros catalizadores, como los son los Metalocenos. Estos catalizadores son completamente metálicos y por lo tanto al encontrarse en medio de dos o más monómeros, produce mayor energía cinética entre estos monómeros, lo cual requiere presiones y temperaturas bajas en el proceso de polimerización. La presencia de los Metalocenos en el proceso de polimerización, permiten que los polímeros o copolímeros,

entre estos el HDPE, tengan mejor resistencia a la tensión y al impacto; estos catalizadores, completamente metálicos, pueden estar asociados con otros catalizadores en el proceso de polimerización, por ejemplo: con los catalizadores del tipo Óxido de un Metal de Transición ó del tipo Ziegler – Natta, que son los que se utilizan en el HDPE y LLDPE.

2.5 Producción de Películas de Polietileno de Alta Densidad

Una vez que ya se ha estudiado la estructura molecular del polietileno de alta densidad y con esto, la manera en que influye esta estructura en las propiedades de una resina de este material, ahora se va a estudiar el proceso de producción de las películas de HDPE, para poder profundizar en las condiciones de procesamiento y así ver de qué manera influyen estas condiciones en las propiedades de las películas, que es lo que ya se venía avisando en el estudio de la estructura molecular cuando se establecía la manera en que las propiedades de la resina podrían beneficiar a las propiedades de la película, ***permaneciendo las condiciones de procesamiento constantes*****.**

Esto quiere decir que cuando las condiciones de procesamiento cambian, los beneficios que puede ofrecer la estructura molecular de

la resina a las propiedades de la película, se mejoran ó se merman, según los cambios que se hayan hecho en dichas condiciones.

2.5.1 Proceso de Producción

El proceso de producción en estudio, es el de EXTRUSIÓN DE PELÍCULA SOPLADA. Este proceso se lo utiliza para producir películas plásticas, ya sean estas de HDPE, LDPE ó LLDPE. El análisis del Capítulo 4, se basa al estudio realizado en el Capítulo 2 y se aplica a películas de HDPE que fueron fabricadas a través de este proceso de extrusión, el cual se desarrolla básicamente a través del siguiente flujo:

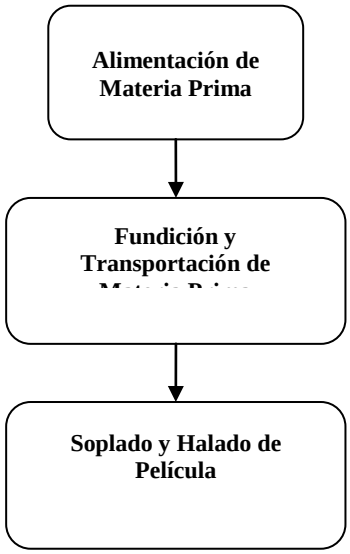


FIGURA 2.20 EXTRUSIÓN DE PELÍCULA SOPLADA

Estos pasos se realizan mediante una unidad de extrusión, la cual es una máquina que está constituida por una serie de partes o equipos que al trabajar en conjunto desarrollan el flujo de extrusión de película soplada.

Las partes que constituyen la unidad de extrusión son:

a. Extrusora
b. Cabezal de extrusión
c. Anillo de enfriamiento
d. Unidad de calibración
e. Marcos colapsibles
f. Sistema de halado
g. Unidad de embobinado
h. Panel de control

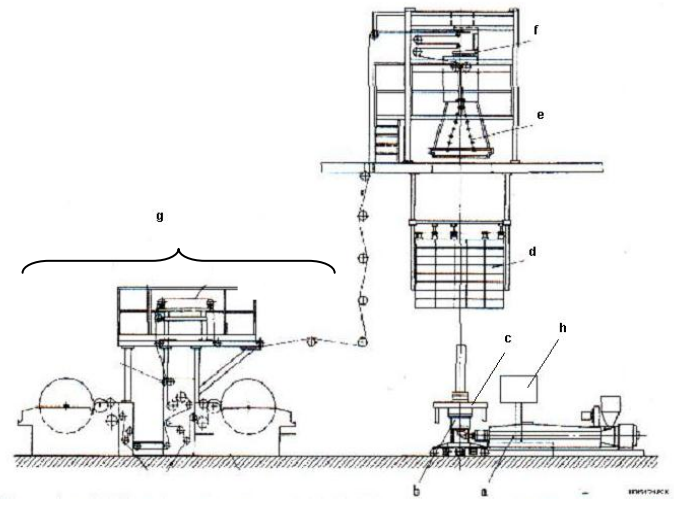


FIGURA 2.21 UNIDAD DE EXTRUSIÓN

Básicamente, la unidad de extrusión trabaja de la siguiente manera:

La materia prima o polímero entra a la extrusora por medio de una tolva que está acoplada a la zona de entrada de la extrusora. Al entrar la materia prima a la extrusora, es transportada hacia el cabezal de extrusión; a medida que es transportada la materia prima, se calienta por medio de unas resistencias eléctricas acopladas a la extrusora, de tal manera que la materia prima llega en estado de fundido al cabezal.

Al entrar el fundido al cabezal, la potencia de la extrusora empuja al fundido para que atraviese el cabezal, distribuyéndose de tal manera que fluye por el espacio anular del cabezal. Una bomba de aire ó ventilador es la que inyecta la fuerza necesaria para soplar el fundido al salir del cabezal y así le da la forma de tubo ó manguera flexible, la cual se llama "***burbuja***"; la misma que es halada por un sistema de rodillos que se encuentra en la parte superior de la misma.

Entre la salida del cabezal y el sistema de rodillos hay una distancia prudente para que se enfríe el fundido y así pase a estado sólido, formándose de esta manera la película. En este

proceso de enfriamiento, a medida que se estira la película, ésta va forjando sus propiedades mecánicas y físicas, como la resistencia a la tensión, la resistencia al impacto, la barrera contra el vapor de agua, el espesor, entre otras.

Una vez forjada la película, es guiada por un tren de rodillos hacia la unidad de embobinado, en la cual se enrolla la película para formar bobinas que posteriormente pueden ser tratadas ó estampadas, si es que el cliente lo requiere.

A continuación se detalla cada una de las partes más importantes de la unidad de extrusión:

Extrusora

Es una parte importante del proceso de extrusión, ya que permite fundir la materia prima por medio de un sistema de calefacción compuesto por resistencias eléctricas y así transportar la materia fundida hacia el cabezal de extrusión. Este equipo está compuesto básicamente de una tolva, de un husillo ó tornillo, y de un cilindro; la Figura 2.22 mostrará las partes de una extrusora.

El ***Husillo* ó *Tornillo*** es de mucha importancia para la extrusora y para la unidad de extrusión, ya que sin éste no se

podría transportar la materia fundida hacia el cabezal de extrusión, desde el cual se sopla dicha materia para ir formando la película.

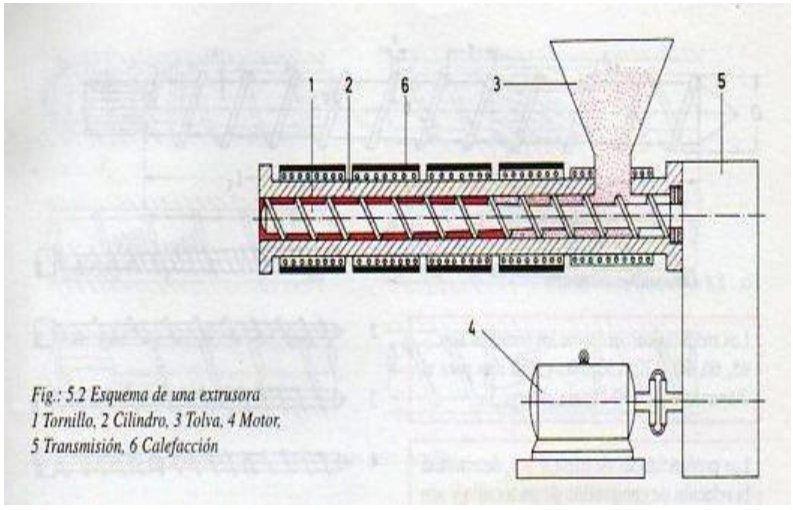


FIGURA 2.22 EXTRUSORA

La siguiente figura nos mostrará las dimensiones características del husillo:

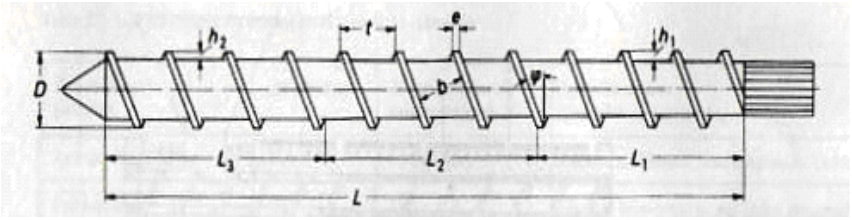


FIGURA 2.23 HUSILLO

La Figura 2.23 nos muestra las dimensiones relevantes en el diseño y selección de un husillo, las cuales serán seleccionadas según las características de los procesos de extrusión a los

cuales estará sometida la extrusora. Estas características están basadas en el volumen de producción y en el tipo de material a procesar. A continuación se nombrará a cada una de las dimensiones relevantes del husillo:

- ✓ ***D*** es el diámetro del husillo;
- ✓ ***L*** es la longitud del husillo;
- ✓ L_1 es la longitud de la primera zona del husillo;
- ✓ L_2 es la longitud de la segunda zona del husillo;
- ✓ L_3 es la longitud de la tercera zona del husillo;
- ✓ ***t*** es el paso del husillo;
- ✓ ***e*** es el ancho del filete;
- ✓ h_1 es la profundidad del husillo al inicio del mismo;
- ✓ h_2 es la profundidad del husillo al final del mismo.

La siguiente tabla nos mostrará claramente unas de las medidas características para una extrusora de HDPE y para una de LDPE:

TABLA 1

DIMENSIONES DE EXTRUSORA

MATERIAL	***D* (mm)**	***L/D***
LDPE	40 – 200	20 – 30
HDPE	35 – 150	16 – 25

La Tabla 1 muestra que las extrusoras de HDPE son más cortas y tienen menor diámetro que las de LDPE, ya que el HDPE es más denso que el LDPE; una materia prima con mayor densidad ocupará menos espacio que una con menor densidad. Es por esta razón que los flujos másicos de una extrusora de HDPE pueden llegar a ser mayores que los de una extrusora de LDPE de igual diámetro.

Los flujos másicos en una extrusora de LDPE pueden variar desde 45 Kg/h para un diámetro de 40 mm, hasta 225 Kg/h para un diámetro de 90 mm; en cambio, en una extrusora de HDPE los flujos másicos pueden variar desde 40 Kg/h para un diámetro de 35 mm, hasta 260 Kg/h para un diámetro de 90 mm.

Entonces, las dimensiones de una extrusora de LLDPE serán intermedias entre una extrusora de HDPE y una de LDPE, ya que la densidad del LLDPE es intermedia entre la densidad del HDPE y la del LDPE.

Los datos sobre diámetro de la extrusora (***D***) y sobre la relación ***L/D***, son dimensiones que indican el rendimiento de una extrusora.

Las profundidades de filete determinan la relación de compresión de un tornillo y son necesarias para la compactación de la masa de plástico que se va fundiendo. Las relaciones más utilizadas entre h_2 y h_1 son 1:2 y 1:3, siendo h_1 mayor que h_2. A continuación se muestra una gráfica en la cual se observa la manera en que varía la presión dentro del cilindro:

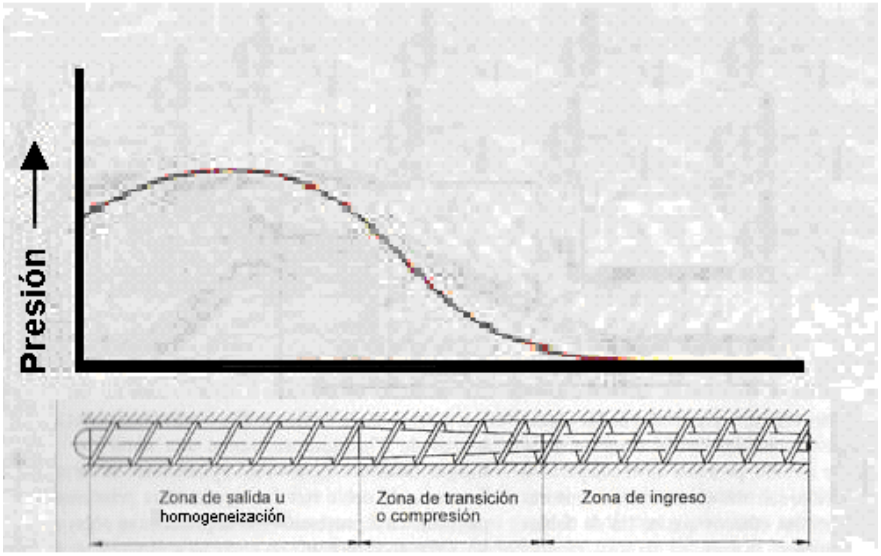


FIGURA 2.24 CURVA DE PRESIÓN DEL HUSILLO

En la Figura 2.24 nos podemos dar cuenta que la presión en el interior del cilindro va aumentando a medida que la materia prima es transportada por el **husillo** desde la ***zona de ingreso*** h**asta la *zona de salida u homogeneización*.** A medida que la profundidad del filete va disminuyendo, el espacio entre el alma

del husillo y el cilindro también disminuye, lo cual permite que haya una mayor compresión de la masa de plástico que se va fundiendo mientras es transportada por el husillo.

El aumento en la compresión es necesario para compactar la masa fundida y homogeneizarla, es por esta razón que la ***zona de salida u homogeneización*** muestra un pico de presión en la mitad de esta zona, ya que en este punto se establece la compresión máxima para terminar de compactar y homogeneizar la masa fundida.

Con respecto a las otras dimensiones características del husillo, podemos mencionar que el paso ***t*** y el ancho del filete ***e***, son acordes con las dimensiones del diámetro del tornillo: ***t*** = ***D*** y ***e*** = 0.1***D***.

A través de los años, en la práctica de extrusión de película soplada, lo que generalmente se observa es dos tipos de husillos: ***Husillo de 3 zonas*** **y** ***Husillo progresivo***.

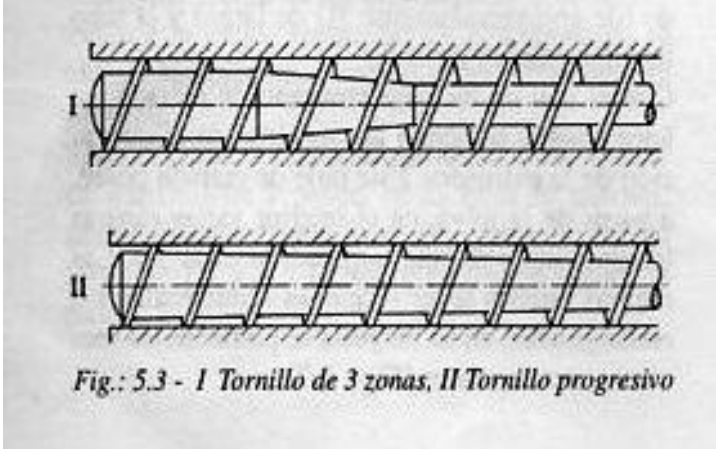


FIGURA 2.25 DIVISIÓN GENERAL DE LOS TORNILLOS

Como se mencionó, estos tipos de tornillos son los que más se utilizan en la práctica de la extrusión de película soplada, práctica que con el pasar del tiempo exige mayor eficiencia, lo cual significa aumento en la calidad y en el volumen de producción.

Por la necesidad de aumentar la eficiencia en el proceso de extrusión, se han incluido diseños en los tornillos, los cuales consisten en dientes ó ranuras en su alma para obtener una notoria mejora en la capacidad de plastificación y homogeneización de la materia prima que ingresa al cilindro. La siguiente figura muestra los diferentes diseños de dientes o ranuras que se pueden incluir al tornillo para mejorar el cizallamiento y la mezcla de la materia prima:

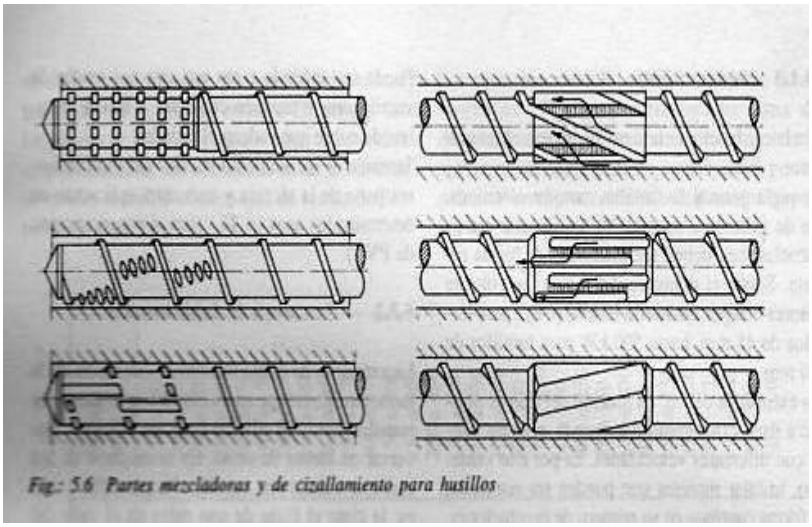


FIGURA 2.26 PARTES MEZCLADORAS Y DE CIZALLAMIENTO PARA TORNILLOS

El ***Cilindro*** es otra parte importante de la extrusora, esta parte junto con el husillo se encargan de plastificar la materia prima, es decir, de comprimir, de cizallar y con ello mezclar la materia prima que se va fundiendo mientras es transportada a lo largo de la extrusora. La plastificación lleva a homogeneizar la materia prima, es decir, a que la materia plastificada tenga prácticamente las mismas propiedades físicas en cada punto de su masa.

El cilindro es la parte de la extrusora que proporciona el mayor porcentaje de calor necesario para la fundición de la materia prima que ingresa por medio de la tolva; este calor se genera en el sistema de calefacción que se encuentran alrededor del

cilindro, el cual es un conjunto de resistencias eléctricas a través de las cuales fluye corriente para generar dicho calor que es conducido hacia el interior del cilindro, calentando y derritiendo la materia prima. El sistema de calefacción ayuda mucho en el proceso de plastificación, ya que la fundición de la materia prima es parte de este proceso, fundición que se lleva a cabo a través de los siguientes medios:

- ✓ Compresión en el interior del cilindro;
- ✓ Esfuerzos de Cizalladura;
- ✓ Sistema de Calefacción.

Así como se han incluido diseños en el husillo para aumentar la capacidad de plastificación del mismo, en el cilindro se ha incluido un buje ranurado, el cual también ayuda a aumentar la capacidad de plastificación de la extrusora.

Es una práctica frecuente que en las extrusoras de polietilenos se utilicen bujes ranurados en combinación con husillos de corte y mezcla; el buje ranurado se ubica al inicio del cilindro, es decir, al ingreso de la materia prima.

Los cilindros con bujes ranurados se dividen en dos zonas: ***ranurada*** **y** ***lisa***. La zona ranurada es la zona de entrada del

cilindro, siendo ésta la primera en atravesar la materia prima al ingresar en la extrusora por medio de la tolva.

La zona ranurada permite aumentar la capacidad de plastificación de la materia prima, al haber una compactación más rápida y un cizallamiento más intenso sobre la materia prima; el hecho de que la compactación sea más rápida ayuda a que haya una mejor alimentación de materia prima, o sea, que haya un mayor volumen de materia prima plastificada por unidad de tiempo y así pueda aumentar el volumen de producción.

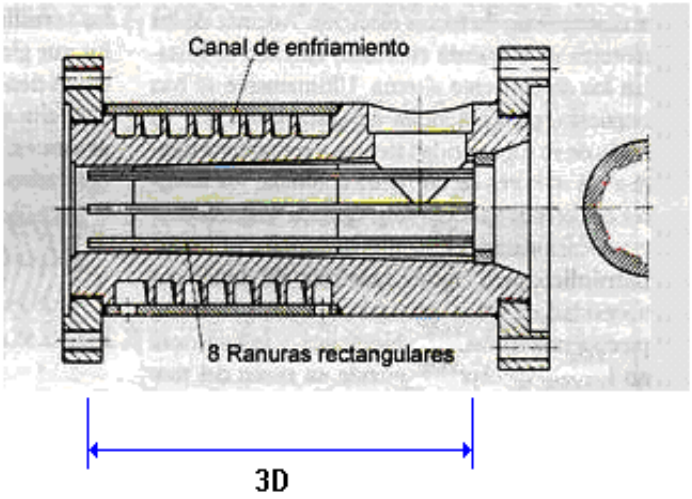


FIGURA 2.27 ZONA RANURADA

La zona ranurada tiene una longitud aproximada de tres veces el diámetro del husillo (3***D***). Esta zona consta de un buje con

ranuras longitudinales en su interior, de 3***D*** de longitud; las ranuras pueden tener secciones transversales semicirculares ó rectangulares, aunque son preferibles las rectangulares, ya que éstas permiten transportar mayor volumen por tener mayor área de flujo. También observamos el canal de enfriamiento, el cual sirve para mantener aislado al buje del cilindro; este canal ayuda al buje a no sobrecalentarse y así no haya problemas en su funcionamiento.

Cabezal de Extrusión

El cabezal de extrusión es el encargado de distribuir adecuadamente la masa fundida proveniente de la extrusora, de tal manera que al ser soplada la masa fundida y así salir del cabezal, se obtenga uniformidad en el espesor y temperatura de dicha masa.

Al tener uniformidad en el espesor y la temperatura, se obtiene uniformidad en la densidad de la materia fundida y al mismo tiempo los esfuerzos que se originen en la masa fundida serán uniformes, de esta manera se reduce la concentración de esfuerzos.

Como ya se lo explicó en el proceso de producción, por medio de la potencia de la extrusora, el husillo transmite la fuerza necesaria a la masa fundida, para que ésta se distribuya por el cabezal y así salga a través de un espacio anular.

La masa fundida es soplada por una bomba de aire, la cual proporciona la fuerza y estabilidad necesaria para que el fundido se mantenga en forma de tubo ó manguera flexible; a este tubo lo llamaremos ***burbuja***. Todo cabezal consta de las siguientes partes:

- ✓ Cuerpo del cabezal
- ✓ Mandril
- ✓ Espacio anular

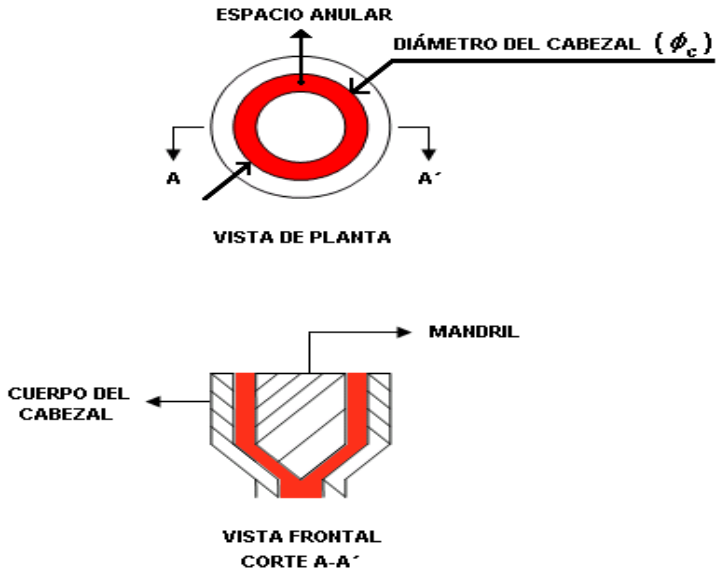


FIGURA 2.28 CABEZAL DE EXTRUSIÓN

Existen tres tipos de cabezales utilizados en la industria:

- ✓ Cabezal de alimentación lateral
- ✓ Cabezal de porta mandril
- ✓ Cabezal con distribuidor helicoidal

El ***cabezal de alimentación lateral*** **se** caracteriza por la manera en que la masa fundida ingresa al mismo. La materia prima en su estado líquido ingresa por la parte lateral del cabezal, el hecho produce un choque entre la masa fundida y el mandril del cabezal.

Por esta misma razón se maquina un canal en forma de corazón alrededor del mandril, permitiendo así una distribución de la masa fundida entorno al mandril.

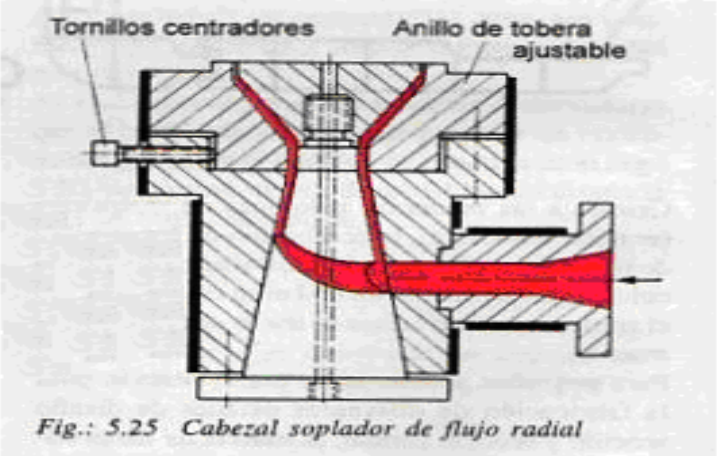


FIGURA 2.29 CABEZAL DE ALIMENTACIÓN LATERAL

Este tipo de cabezal es útil para formar burbujas de diámetros pequeños ó medianos. Hay una ventaja, el mandril está empotrado al cuerpo del cabezal, lo cual no permite que haya divisiones de flujo en la masa fundida que recorre el espacio anular entre el mandril y el cuerpo del cabezal.

También hay desventajas en el cabezal de alimentación lateral, las cuales se deben a la diferencia de esfuerzos alrededor del mandril. Esta diferencia de esfuerzos se origina cuando la masa fundida ingresa por la parte lateral del cabezal, produciendo así un impacto de mayor intensidad en un lado del mandril e impactos de menor intensidad en el otro lado del mandril. Las desventajas que se producen, son las siguientes:

1. Se necesita que un operador centre el cabezal según el material a procesar y las condiciones de operación a utilizar.
2. Si el cabezal no es centrado adecuadamente, se pueden producir líneas de unión en el fundido, las cuales ocasionarían líneas marcadas en el producto final, facilitando que la película se rompa en estas líneas.

El ***cabezal de porta mandril*** es aquel que se sujeta al cuerpo del cabezal por medio de elementos radiales. Estos elementos

provocan divisiones de flujo que pueden ocasionar líneas marcadas en el producto final y así provocar daños en la película, tanto en presentación como rompimiento en estas líneas.

Estos elementos deben ser diseñados según la fuerza axial con la que fluye el fundido hacia la salida del cabezal. Esta fuerza se la puede estimar según el material a procesar, la mínima temperatura con la cual puede ingresar el fundido al cabezal y el máximo caudal de fundido al cual se podría llegar en el proceso de extrusión.

Las divisiones de flujo que se produzcan por los elementos de sujeción, pueden ser reducidas ó eliminadas por altos esfuerzos de cizalladura que se provoquen al reducir el espacio anular. También se pueden lubricar las superficies que limitan el espacio anular, de tal manera que se favorezca al flujo circunferencial del fundido; esto reduciría de manera considerable las divisiones de flujo.

El fundido entra al cabezal por la parte inferior del mismo. La entrada, del fundido al cabezal, se realiza a través de un codo que tiene conectado uno de sus extremos a la extrusora, y el

otro extremo a la parte inferior del cabezal. La Figura 2.30 nos ilustrará al respecto:

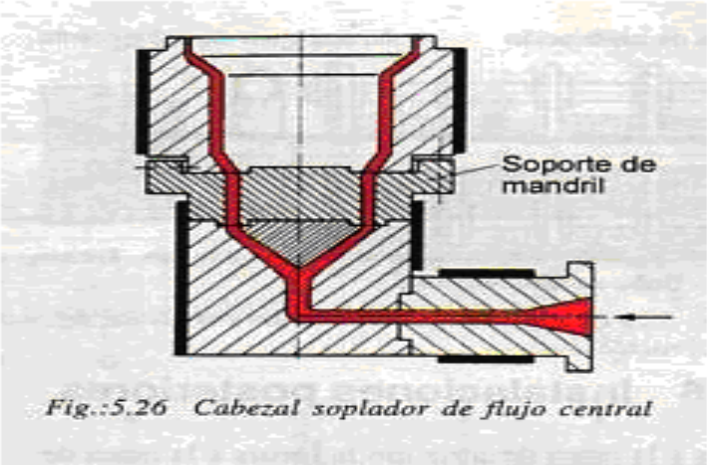


FIGURA 2.30 CABEZAL DE PORTAMANDRIL

Como podemos observar, al entrar el fundido por la parte inferior del cabezal, se produce un impacto simétrico en la punta del cono del mandril y así se distribuye uniformemente el fundido en el espacio anular, espacio que al ser recorrido en dirección axial, lleva al fundido a salir del cabezal.

El cabezal de porta mandril se lo utiliza para producir películas de espesor estrecho, esto se da por la reducción del espacio anular que debe tener en relación a los otros tipos de cabezales. Esta misma reducción del espacio anular, la cual sabemos que sirve para mermar las divisiones de flujo, es la

que no permite altos caudales de fundido. Las ventajas de este tipo de cabezal son las siguientes:

- Es de fácil construcción.

- Es un cabezal que se diseña para que se produzca un flujo simétrico del fundido a través del mandril. Esto evita que un operador tenga que centrar el cabezal, es decir, el cabezal se mantiene centrado, sin necesidad de algún ajuste manual, para la materia prima que se necesite procesar y/ó para las condiciones de operación que se requieran en el proceso.

El ***cabezal con distribuidor helicoidal*** tiene un mandril con canales en forma de espiral maquinados alrededor de él, los cuales permiten al fundido fluir en dirección axial y en dirección helicoidal. El fundido entra por la parte inferior del cabezal a través de un codo y una vez que entra, topa con los puertos del mandril, los mismos que tienen conexión con los canales helicoidales.

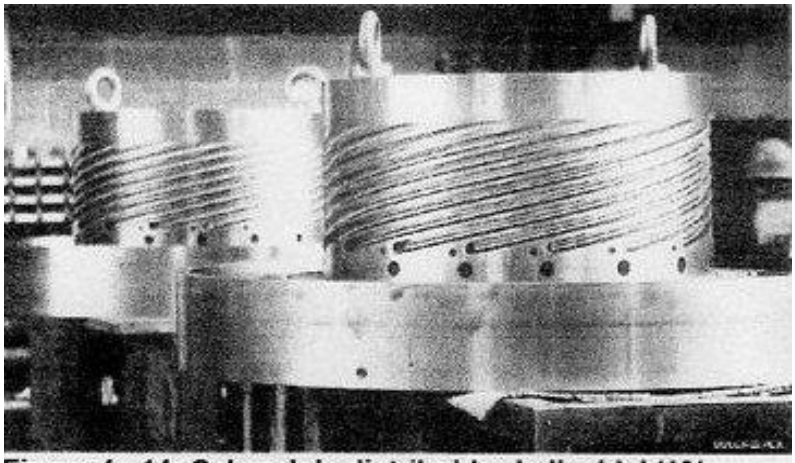


Figura 4 - 14: Cabezal de distribuidor helicoidal /19/

FIGURA 2.31 CABEZAL CON DISTRIBUIDOR HELICOIDAL

Estos canales van reduciendo su área transversal ó profundidad de maquinado, a medida que el espacio anular aumenta en la dirección que el flujo de fundido avanza hacia la salida del cabezal. Este aumento en el espacio anular es lo que no permite procesar películas de espesores menores a 0.005 mm, en cabezales de este tipo. Esta es la razón por la cual este tipo de cabezales se utilizan para soplar fundidos que formen mangueras flexibles de mediano y de gran diámetro.

Este tipo de distribución que ofrecen los canales, permite que las diferencias de espesores producidas en el fundido al fluir alrededor del mandril, se distribuyan uniformemente, favoreciendo así a que la película obtenga también un espesor uniforme.

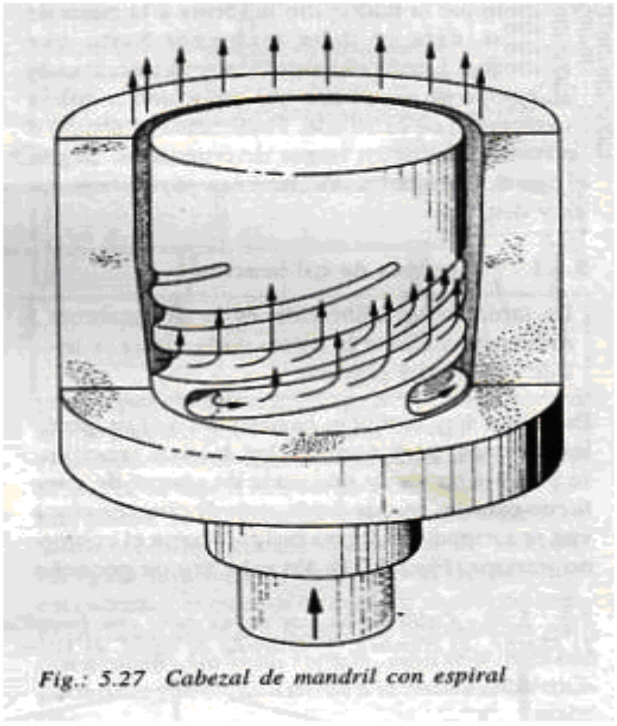


FIGURA 2.32 DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO

Al observar el mandril del cabezal con distribuidor helicoidal, nos damos cuenta que tiene una superficie lisa después de los canales. Esta superficie tiene una longitud que se mide desde la terminación de los canales hasta el final del mandril, que es por donde sale el fundido del cabezal. Dicha longitud es relevante en el diseño de la superficie lisa, ya que depende de la caída de presión y de la relajación de esfuerzos que se requiere en el fundido.

La distribución del flujo de fundido, que ofrece este tipo de cabezal, trae las siguientes ventajas:

- No genera líneas de unión, lo cual se debe al traslape de capas de fundido que se originan en los canales helicoidales.
- Es un cabezal que no necesita ser centrado por el operador, esto quiere decir que puede ser utilizado en un amplio rango de polímeros y de condiciones de procesamiento, sin necesidad de algún ajuste manual.
- Tiene un bajo requerimiento de presión por parte de la extrusora para lograr que el fundido fluya por el espacio anular y así salga del cabezal para que sea soplado en forma de burbuja.
- Puede ser más pequeño y liviano que los tipos de cabezales mencionados anteriormente.
- Distribución uniforme de los esfuerzos que se originan en el fundido al fluir alrededor del mandril, y también de la temperatura de dicho fundido. Esto favorece a que haya una distribución circunferencial de las diferencias de espesores en el fundido, de tal manera que la película obtenga un espesor uniforme.

Anillo de Enfriamiento

El anillo de enfriamiento es una parte muy importante en el proceso de extrusión, ya que permite enfriar adecuadamente el

material fundido y así forjar las propiedades requeridas en la película. Este sistema de enfriamiento es el que permite que en la burbuja haya prácticamente dos zonas: zona líquida y zona sólida.

Hay una línea que divide las dos zonas de la burbuja, esta línea es llamada ***línea de enfriamient****o*; la distancia desde la línea de enfriamiento hasta el cabezal, es **llamada *altura de enfriamiento*** y comprende la zona líquida.

Al recorrer el fundido la altura de enfriamiento, se va enfriando por el sistema de enfriamiento y estirando por los rodillos que se encuentran en la parte superior de la burbuja. El fundido llega a la línea de enfriamiento en estado sólido, con su estructura molecular estirada y orientada, es decir, ordenada; este producto que se obtiene en la línea de enfriamiento y que es halado por los rodillos, se llama *película* y es la que al final se embobina para que sea utilizada para empacar alimentos, basura, etc.

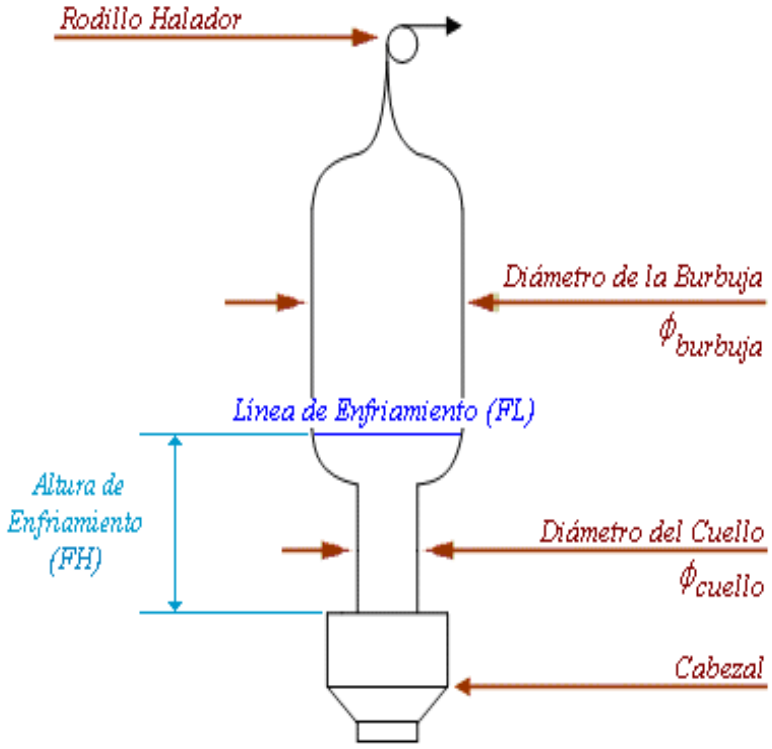


FIGURA 2.33 ALTURA DE ENFRIAMIENTO

Hay dos clases de anillos o sistemas de enfriamiento:

- ✓ Anillo de enfriamiento externo
- ✓ Anillo de enfriamiento interno

El ***anillo de enfriamiento externo*** es aquel que se encuentra en la parte inferior de la burbuja, circundando la superficie externa del cabezal, de tal manera que permite la salida de aire alrededor de la superficie externa de dicha burbuja.

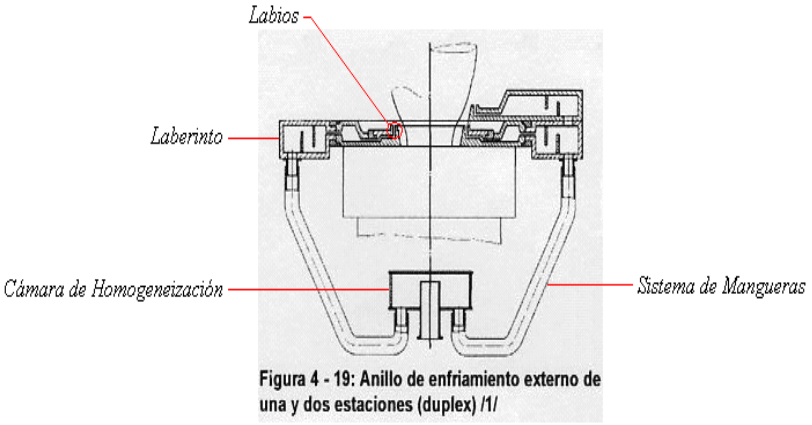


FIGURA 2.34 ANILLO DE ENFRIAMIENTO EXTERNO

Una bomba de aire transporta el fluido hacia una cámara de homogeneización, que es la que se muestra en la Figura 2.34. Es en esta cámara donde se calibra la presión y la velocidad del aire, de tal manera que todo el aire que sale de la cámara, lo hace a una misma presión y velocidad.

El aire que sale de la cámara de homogeneización, fluye a través de un sistema de mangueras que está conectado al anillo. La parte interior del anillo consta de un laberinto que permite atenuar más la presión y aumentar la velocidad del aire, para estabilizar de esta manera la operación del sistema.

Luego que el aire recorre el laberinto, pasa a través de los labios del anillo y así fluye hacia el exterior, produciéndose un colchón de aire alrededor de la superficie exterior de la burbuja,

el cual va enfriando la burbuja y así va forjando las propiedades mecánicas y físicas de la misma.

El ***anillo de enfriamiento interno*** es aquel que se suma, dependiendo del nivel de producción, al anillo externo. Comúnmente, sólo existe el sistema de enfriamiento externo, existiendo al interior de la burbuja aire que no es renovado y que en el transcurso del proceso se calienta hasta llegar a un equilibrio térmico con la burbuja. Cuando la capacidad de la extrusora aumenta a tal punto que su producción es mayor ó igual a 2.6 Kg/h de fundido, por centímetro de circunferencia del diámetro del cabezal, se necesita un sistema de enfriamiento interno. Para producciones menores a este límite (2.6 Kg/h-cm), el sistema de enfriamiento externo es suficiente para poder enfriar la masa fundida que sale del cabezal.

Cuando la producción llega a los 2.6 Kg/h-cm, la capacidad que tiene el sistema de enfriamiento externo queda corta para la transferencia de calor que se necesita desde la masa fundida hacia el aire externo, de tal manera que el aire exterior también puede llegar a un equilibrio térmico con la masa fundida. Esto traería como consecuencia que la película se demore en enfriar

y al mismo tiempo se producirían alteraciones en las propiedades mecánicas y físicas de la misma.

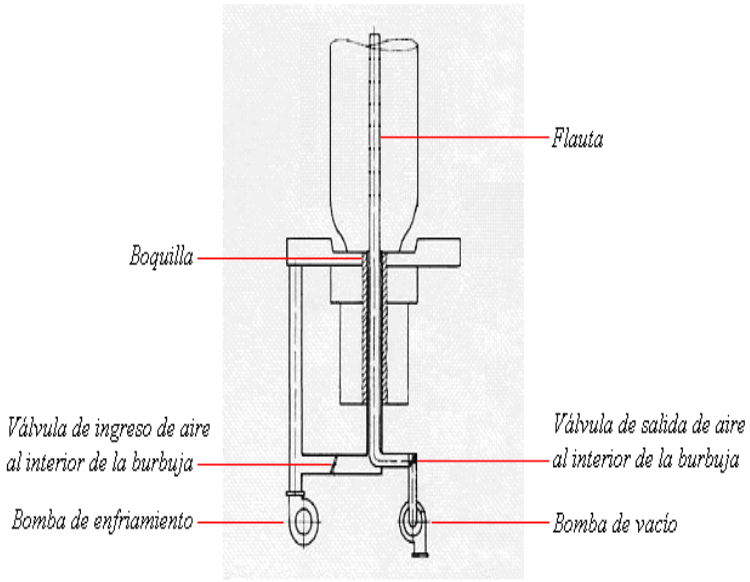


FIGURA 2.35 ANILLO DE ENFRIAMIENTO INTERNO

El sistema de enfriamiento interno consiste en un tubo en forma de flauta (con perforaciones) en el interior de la burbuja, dicho tubo tiene perforaciones distribuidas uniformemente de manera circunferencial, a través de las cuales, por medio de una bomba de vacío, se extrae el aire caliente. Al mismo tiempo, a través de una boquilla ubicada en el centro del cabezal, se inyecta aire en forma de anillo al interior de la burbuja, aire que es proporcionado por la bomba que también se encarga de formar el anillo de enfriamiento externo.

De esta manera se realiza el constante proceso de renovación de aire al interior de la burbuja, enfriando la superficie externa e interna de la burbuja, respondiendo así a la demanda de aire frío para producciones mayores o igual a 2.6 Kg/h-cm.

Unidad de Calibración

Es un sistema en forma de cesto que se encuentra alrededor de la burbuja y sirve para controlar el diámetro y la altura de enfriamiento de la misma. Este sistema consta de un grupo de anillos que tienen rodillos para regular la altura y el diámetro del cesto, además de poseer un dispositivo de contacto con la burbuja para controlar el diámetro de ésta y un sensor de temperatura para controlar la altura de enfriamiento de la misma.

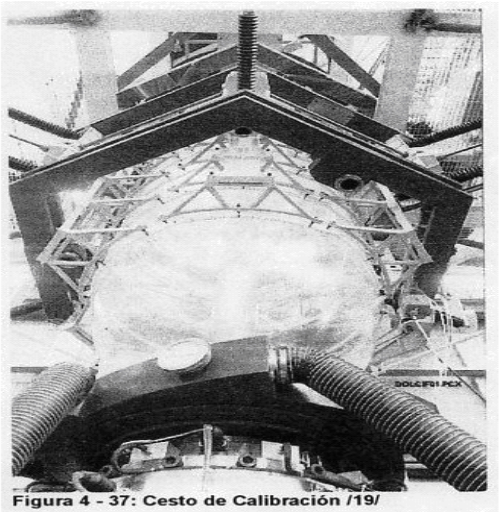


FIGURA 2.36 UNIDAD DE CALIBRACIÓN

Este sistema de anillos trabaja en conjunto con dos sistemas reguladores: el sistema regulador del diámetro y la altura del cesto, y el sistema regulador del diámetro y la altura de enfriamiento de la burbuja. Estos sistemas reguladores pueden ser de dos tipos:

- ✓ Manual
- ✓ Automático

El ***sistema regulador manual*** funciona según la capacidad de observación del operador de la unidad de extrusión. El operador deberá primero regular el cesto de calibración según el diámetro y la altura de enfriamiento que se requiere en la burbuja, una vez que el operador calibra el cesto según las medidas requeridas en la burbuja, él deberá observar cualquier variación en el diámetro y en la altura de enfriamiento.

Con respecto al diámetro de la burbuja, al observar cualquier variación en dicha medida, según el tipo de sistema de enfriamiento que tenga la unidad de extrusión, el operador deberá proceder de la siguiente manera:

En el caso que sólo exista el sistema de enfriamiento externo en la unidad de extrusión, si el operador observa que el

diámetro de la burbuja aumenta hasta presionar más de lo normal al dispositivo de contacto, el operador deberá confirmar que la válvula de ingreso de aire al interior de la burbuja está completamente cerrada, una vez que confirme que la válvula está completamente cerrada, el operador hará un pequeño orificio en la burbuja para reducir la presión de aire al interior de la misma y así reducir un poco el diámetro de la burbuja hasta que ésta presione dentro de lo normal al dispositivo de contacto.

Si el operador observa que el diámetro de la burbuja disminuye, volviéndose menor que el diámetro requerido en el proceso de extrusión, tendrá que abrir gradualmente la válvula de ingreso de aire al interior de la burbuja, hasta que se observe que el diámetro recuperó su medida. Una vez que el diámetro volvió a la medida requerida, se cierra la válvula de ingreso de aire al interior de la burbuja.

En el caso que existe un sistema de enfriamiento interno adherido a la unidad de extrusión, si el operador observa que el diámetro de la burbuja aumenta presionando ésta más de lo normal al dispositivo de contacto, el operador deberá abrir gradualmente la válvula de salida de aire al interior de la

burbuja, quedando ésta más abierta que la válvula de entrada de aire al interior de la burbuja, hasta que la burbuja presione dentro de lo normal al dispositivo de contacto, ya que en este instante se equilibrarán las válvulas, es decir, la válvula de salida se cerrará hasta que se observe que el diámetro se mantiene estable.

Si el operador observa que disminuye el diámetro de la burbuja, volviéndose menor que el diámetro requerido, él deberá cerrar gradualmente la válvula de salida hasta recuperar la medida del diámetro; una vez que se llega al diámetro requerido, el operador tendrá que abrir la válvula de salida hasta observar que el diámetro de la burbuja se mantenga en la medida requerida.

Con respecto a la altura de enfriamiento, ésta siempre debe estar descubierta y no entrar en contacto con el cesto, es decir, la línea de enfriamiento debe estar debajo del cesto. El operador, al observar cualquier variación en la altura de enfriamiento, procederá de la siguiente manera, según el tipo de sistema de enfriamiento que tenga la unidad de extrusión:

En el caso que la unidad de extrusión sólo tiene sistema de enfriamiento externo y la altura de enfriamiento empieza a

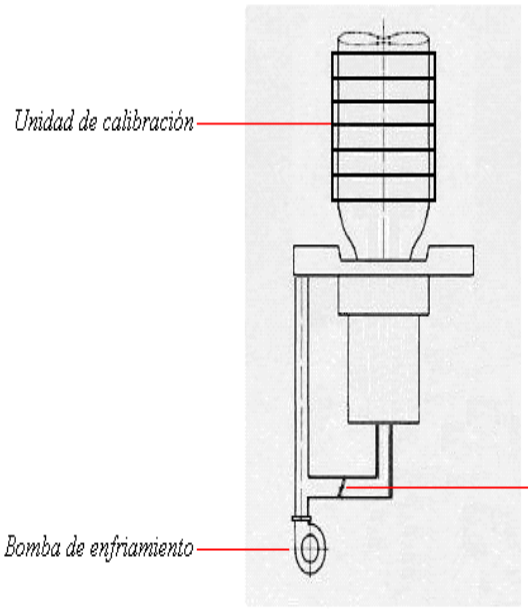
crecer, volviéndose mayor que la altura requerida, el operador deberá revisar si la velocidad del tornillo está elevada con respecto a la velocidad del proceso, de ser así, tendrá que disminuir la velocidad del tornillo hasta que llegue a la velocidad del proceso o hasta que la altura de enfriamiento se estabilice en el valor requerido. La otra opción es que el operador abra más la válvula de succión de aire de la bomba de enfriamiento, para que haya mayor caudal de aire alrededor de la burbuja y así disminuya la altura de enfriamiento hasta el valor requerido.

Ahora, si la altura de enfriamiento empieza a disminuir, el operador tendrá que proceder a la inversa, es decir, aumentar la velocidad del tornillo en el caso que la misma esté por debajo de lo normal, o, cerrar gradualmente la válvula de succión de aire de la bomba de enfriamiento hasta que la altura llegue al valor requerido.

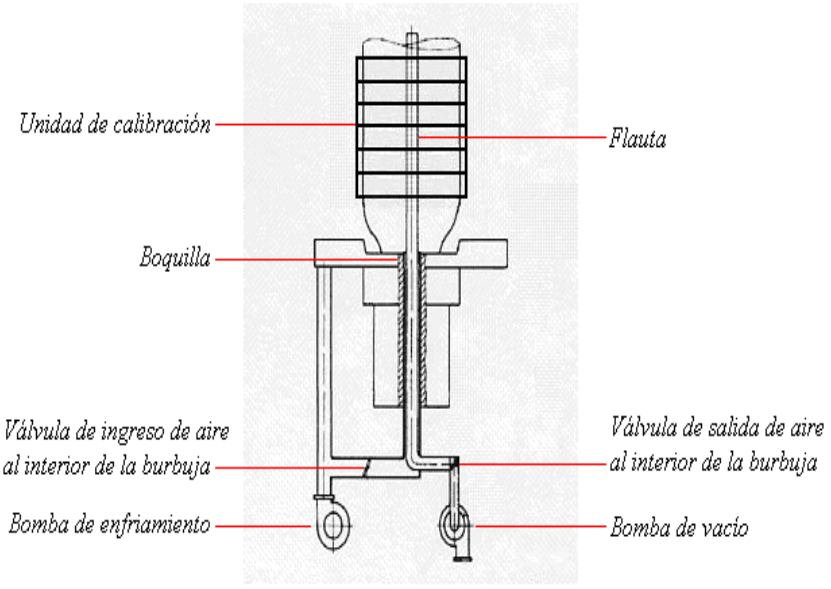
En el caso que la unidad de extrusión tenga adherido un sistema de enfriamiento interno, si el operador observa que la altura de enfriamiento ha aumentado, deberá revisar la velocidad del tornillo, si la misma está elevada con respecto a la velocidad del proceso, tendrá que disminuir gradualmente la velocidad del tornillo hasta que la altura llegue al valor

requerido. Si la velocidad del tornillo es la que requiere el proceso, el operador tendrá que abrir gradualmente la válvula de succión de aire de la bomba de enfriamiento hasta que la altura llegue al valor requerido.

Si observa que la altura de enfriamiento disminuye, él deberá observar que la velocidad del tornillo sea la que el proceso necesita. Si esta velocidad ha disminuido, habrá que aumentarla gradualmente hasta que la altura aumente y se estabilice en el valor requerido. Si la velocidad del tornillo es la que necesita el proceso, deberá cerrar gradualmente y de manera equilibrada, las válvulas de entrada y salida de aire al interior de la burbuja, hasta que la altura llegue al valor requerido.



a) Sin enfriamiento interno



b) Con enfriamiento interno

FIGURA 2.37 SISTEMA REGULADOR MANUAL

El ***sistema regulador automático*** está compuesto por dos reguladores, uno para calibrar el diámetro y la altura del cesto, y otro para calibrar el diámetro y la altura de enfriamiento de la burbuja; los dos reguladores pueden cruzar información entre sí para calibrar en conjunto el cesto y la burbuja.

El regulador de la burbuja trabaja con dos sensores: el sensor de contacto y el sensor de temperatura. El sensor de contacto siente el aumento o la disminución en la presión al interior de la burbuja, lo cual significa un aumento o una disminución en el diámetro de la burbuja, respectivamente; la señal mecánica que capta el sensor se transforma en señal eléctrica, la cual es enviada hacia un regulador, el cual, a su vez, envía la corriente necesaria a las válvulas del sistema de enfriamiento para regular el diámetro de la burbuja.

Respecto a la altura de enfriamiento, el sensor de temperatura tiene como referencia la temperatura de la línea de enfriamiento, si el sensor capta un aumento o disminución de temperatura respecto a la temperatura de referencia, quiere decir que la altura de enfriamiento ha aumentado o disminuido, respectivamente; cualquier cambio con respecto a la temperatura de referencia, será captado por el sensor en forma

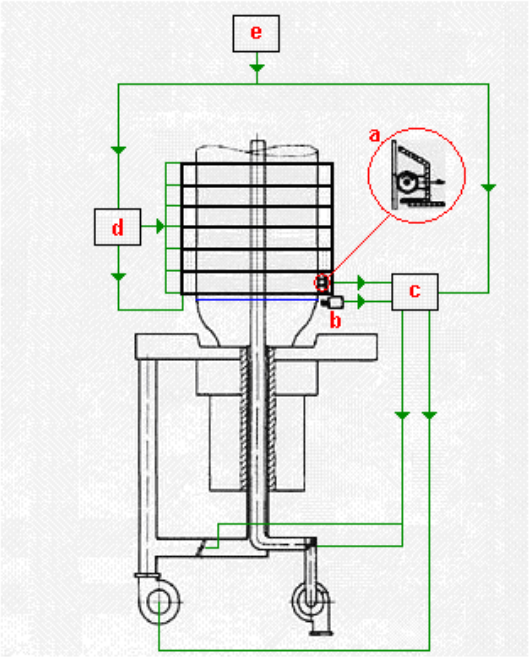
de energía térmica, la cual, a través de un transductor se transformará en energía eléctrica que es enviada al regulador para que la procese y así envíe la corriente necesaria a las válvulas del sistema de enfriamiento para regular la altura de enfriamiento al valor requerido.

El regulador del cesto trabaja con un mando electrónico, el cual envía la señal eléctrica a dicho regulador que procesa la señal eléctrica para enviar la corriente necesaria a los rodillos que se encuentran en los anillos del cesto, y así calibrar el diámetro y la altura del cesto.

Estos reguladores, como se mencionó, trabajan en conjunto cuando a través del mando electrónico se envía una señal al regulador del cesto o al regulador de la burbuja, los cuales cruzan la señal recibida, para actuar en conjunto en la calibración del cesto y de la burbuja.

El sistema regulador automático tiene que trabajar con un sistema de enfriamiento externo e interno, para poder calibrar el diámetro y la altura de enfriamiento de la burbuja según los requerimientos del proceso de extrusión. La calibración automática de la burbuja tendrá el mismo procedimiento que la

calibración manual de la burbuja, sino que ahora la energía eléctrica hará el trabajo del operador.



a. Sensor de contacto, b. Sensor de temperatura, c. Regulador de burbuja, d. Regulador de cesto, e. Mando electrónico

FIGURA 2.38 SISTEMA REGULADOR AUTOMÁTICO

Sistema de Halado

El sistema de halado consta de unos rodillos que se encuentran en la parte superior de la burbuja, en los que ocurre el plegado de la burbuja, en el cual no debe existir adherencia entre las ***dos capas*** de película que pasa a través de dichos rodillos.

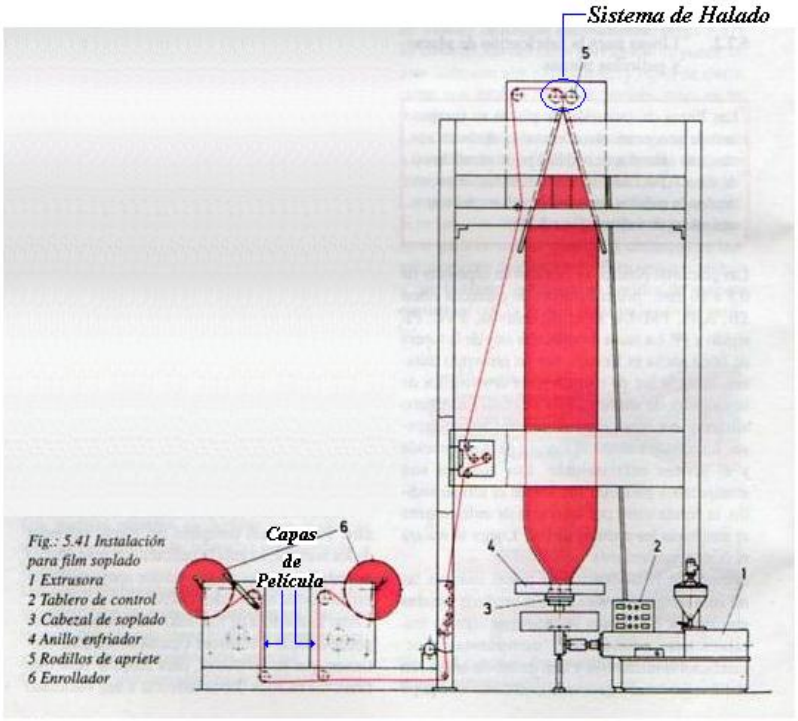


FIGURA 2.39 SISTEMA DE HALADO

Los rodillos que halan la burbuja son unos cilindros macizos de acero que están cubiertos con caucho. Entre los rodillos hay un espacio para que éstos puedan presionar a la burbuja, cerrarla o plegarla, de tal manera que al girar los rodillos, puedan halar la burbuja, permitiendo que el producto que salga de los rodillos sea ***dos capas*** de películas traslapadas, las cuales son guiadas por un tren de rodillos a la unidad de embobinado o enrollador, donde se separan las ***dos capas*** de películas.

La velocidad a la que giran los rodillos haladores y el espacio que debe de haber entre estos, es algo que se debe calibrar

según la intensidad de halado que se requiere en la película y el espesor de la misma.

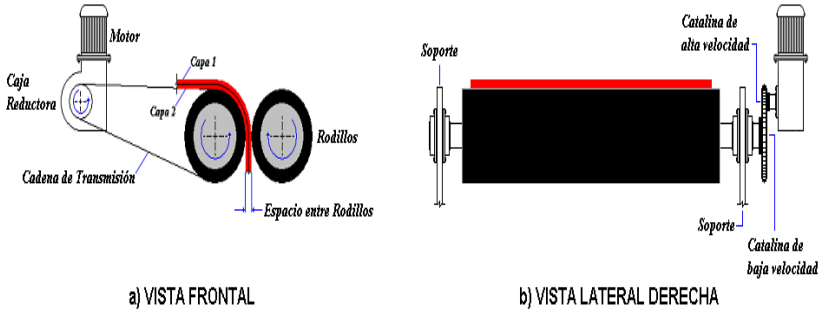


FIGURA 2.40 RODILLOS HALADORES

Para ayudar al plegado de la burbuja, se necesitan los marcos colapsibles, los cuales forman un ángulo para que la burbuja se introduzca en los rodillos con mayor facilidad y así sea halada.

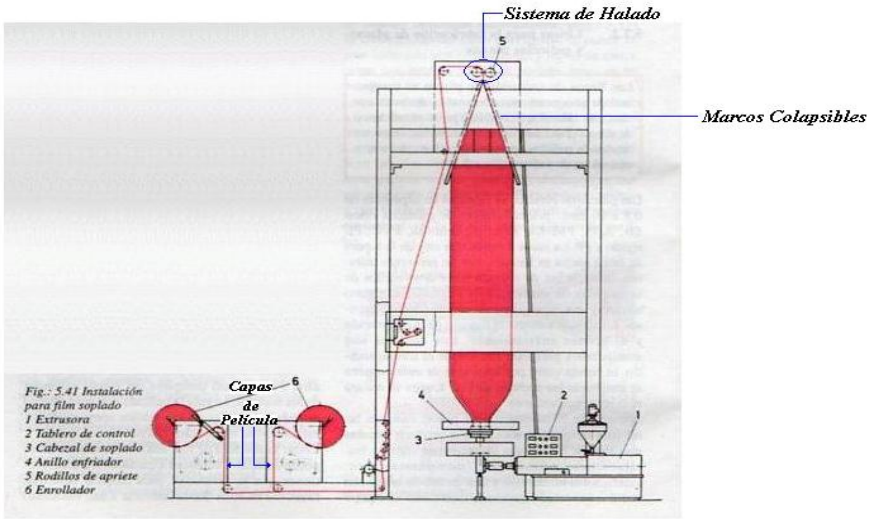


FIGURA 2.41 MARCOS COLAPSIBLES

Los marcos colapsibles deben formar un ángulo lo más pequeño posible, para disminuir de manera favorable las fuerzas de deformación de la burbuja al ingresar a los rodillos.

Unidad de Embobinado

Esta unidad permite recolectar todo el producto final, o sea, acumular la película que se obtiene del proceso de extrusión de película soplada.

La unidad de embobinado consta, principalmente, de un rodillo macizo, en el cual se enrolla la película; el conjunto, rodillo macizo con película enrollada, es llamado bobina. La película es guiada, a través de un sistema de rodillos, a la unidad de embobinado; estos rodillos guías se encuentran luego del sistema de rodillos de halado. Hay dos clases de embobinado:

- ✓ Embobinado de contacto
- ✓ Embobinado de accionamiento central

El ***embobinado de contacto***, a parte del rodillo macizo donde se enrolla la película, consta de un rodillo con accionamiento eléctrico, normalmente cromado o de caucho, conocido como rodillo de contacto; también consta de un sistema de brazos, sobre los cuales se apoya la bobina.

En la figura 2.42 se puede apreciar el embobinado de contacto.

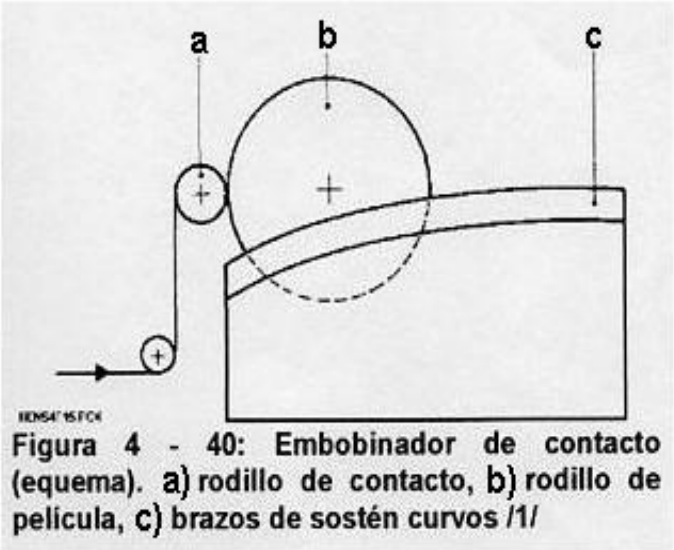


Figura 4 - 40: Embobinador de contacto (equema). a) rodillo de contacto, b) rodillo de película, c) brazos de sostén curvos /1/

FIGURA 2.42 EMBOBINADO DE CONTACTO

Para obtener una buena formación de la bobina, es importante que su eje esté paralelo al del rodillo de contacto, como se observa en la Figura 2.42. Este paralelismo se obtiene con el sistema de brazos acoplados a la unidad de embobinado.

Cuando se requiere someter a tensión a la película, antes de que ingrese a la bobina, se acopla un sistema de rodillos de tensión, los cuales halan la película, generando tensión en ella para que al ser guiada por un sistema de rodillos, pueda ingresar a la bobina. Hay un rodillo ***danzante* ó *viajero*,** el cual regula la tensión de la película, según los requerimientos de la bobina.

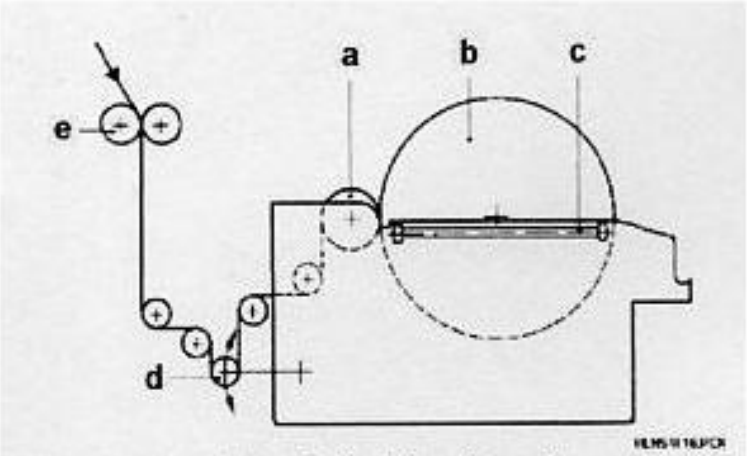


Figura 4 - 42: Embobinador de contacto (esquema). a Rodillo de contacto, b Rodillo de película, c cilindro neumático, d rodillo viajero, e rodillos de tensión. /1/

FIGURA 2.43 EMBOBINADO DE CONTACTO CON SISTEMA TENSOR

El embobinado de contacto tiene dos ventajas:

- ✓ Fácil operación.
- ✓ Construcción estable y robusta.

Así también tiene sus desventajas:

- ✓ Impide la producción de bobinas muy blandas, o sea, que la película se enrolla con poca tensión.
- ✓ Al fallar el proceso de embobinado, se producen interrupciones en la operación.

El ***embobinado de accionamiento central*** está constituido por un motor que acciona directamente el eje de la bobina, regulando la velocidad del mismo al ir aumentando el diámetro de la bobina. La velocidad del motor disminuye al ir aumentando el diámetro de la bobina, de esta manera aumenta el torque del motor para mantener la tensión de la película constante.

Este tipo de embobinado, se utiliza para producir bobinas muy blandas, es decir, con baja tensión en la película que se enrolla. Este sistema es costoso, ya que se lo utiliza cuando se requieren altas exigencias en la bobina.

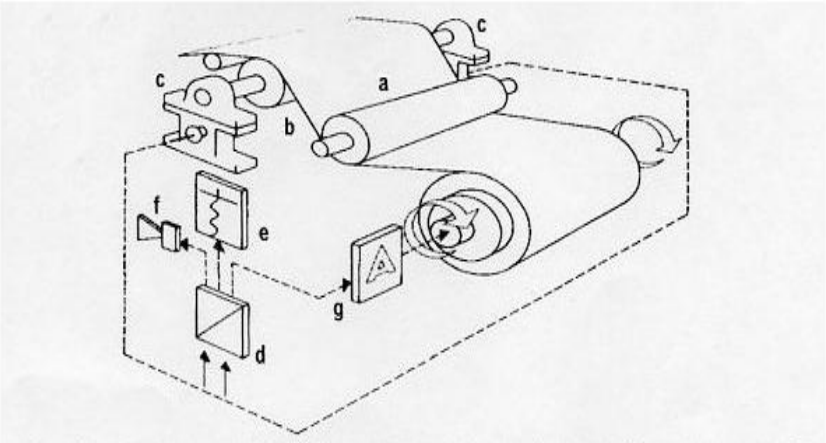


Figura 4 - 43: Diagrama funcional de un sistema de tensión de bobina. a. Tensor de la película, b. Rodillo de medida, c. Celda de carga para el rodillo de tensión, d. Unidad electrónica, e. Monitor, f. Señal de alarma, g. Sistema de control /1/

FIGURA 2.44 EMBOBINADO DE ACCIONAMIENTO CENTRAL

Panel de Control

El panel de control es aquel que reúne todos los instrumentos y dispositivos de control del proceso de extrusión de película soplada. Esta unidad debe tener como mínimo los siguientes elementos:

- ✓ Controles de temperatura, los cuales son utilizados para censar y controlar las temperaturas del polímero fundido que fluye a través de la extrusora y del cabezal de extrusión.
- ✓ Control de la velocidad de rotación del husillo.
- ✓ Medidor de amperaje del motor.
- ✓ Dispositivo de apertura y cierre de los rodillos haladores.
- ✓ Control de velocidad de los rodillos haladores.

Como se mencionó anteriormente, este grupo de controles electrónicos que se citó, es lo mínimo que debe de tener una unidad de extrusión, ya que los demás mecanismos, como la unidad de embobinado, pueden ser controlados por dispositivos neumáticos ó hidráulicos.

2.5.2 Condiciones de Procesamiento

Las condiciones de procesamiento son las que, al igual que la estructura molecular de la resina, influyen en las propiedades

de la película. Las condiciones de procesamiento son parámetros que puede manejar el fabricante de películas y por lo tanto, en el momento que no tenga la materia prima o la resina adecuada, puede sobreponerse a esto mediante el manejo adecuado de las condiciones de procesamiento.

Anteriormente, en este capítulo, se mencionaron las condiciones de procesamiento, en lo que tiene que ver con la manera en que la estructura molecular de la resina puede influenciar de manera considerable en las propiedades de la película, al ***mantener las condiciones de procesamiento constantes***. Esto quiere decir que la influencia puede ser apreciable si no se manipula de manera directa ninguna de las condiciones de procesamiento.

Las condiciones de procesamiento que intervienen en un proceso de extrusión de película soplada, son las siguientes:

- ✓ FLUJO
- ✓ Die Gap
- ✓ Altura de Enfriamiento
- ✓ BUR
- ✓ DDR

El cliente, o sea, la persona que compra la película, debe de dar al fabricante los requerimientos de la película; esto quiere decir que el comprador debe de indicar la aplicación de la película, además, del ambiente donde va a ser aplicada. Esto es importante para cualquier proceso de manufactura, en este caso, en el proceso de extrusión de película soplada, ya que el conocimiento de la aplicación y del ambiente donde se aplica la película permite al fabricante encontrar la combinación adecuada de las condiciones de procesamiento para satisfacer los requerimientos del cliente. A continuación explicaremos cada una de las condiciones de procesamiento:

1. Flujo

El FLUJO es la cantidad de masa de polímero fundido que atraviesa la extrusora y que sale del cabezal, por unidad de tiempo. Es decir, que según el Sistema Internacional se identifica por las siguientes unidades: *Kg/s*.

El flujo másico del polímero fundido puede influir de manera considerable en el proceso de extrusión de película soplada, de tal manera que puede ser determinante en el espesor de la película. Si sólo se modifica el FLUJO, aumentándolo, el espesor de la película aumentará, ya que al haber mayor

cantidad de masa por unidad de tiempo saliendo del cabezal y no aumentar la velocidad de los rodillos haladores, no se logra estirar lo suficiente el incremento de masa que sale del cabezal, produciéndose que un diferencial de masa incremente el espesor de la película a medida que se va enfriando.

Aunque no se modifiquen directamente las demás condiciones de procesamiento, se modificará indirectamente el DDR, ya que al aumentar la velocidad a la que sale el polímero fundido del cabezal y no elevar la velocidad de los rodillos haladores, disminuirá el DDR.

Como veremos más adelante, el DDR es la intensidad de halado que se le da a la película en su proceso de enfriamiento, esta condición de procesamiento depende de la velocidad lineal de los rodillos haladores y de la velocidad a la que sale el fundido del cabezal. La división entre estas dos velocidades es el DDR.

Ahora ya se sabe por qué aumenta el espesor de la película al aumentar el FLUJO. Al tener mayor velocidad en el fundido a la salida del cabezal y no incrementar la velocidad de los rodillos haladores, o sea, la intensidad de halado, va a

ver cierta acumulación de masa fundida que no se estire lo suficiente o lo que falte por estirar, lo cual hará que el espesor de la película aumente.

Es como tener una masa de plastilina, mientras más la estiramos, más fina se convierte. Así mismo, mientras aumenta la intensidad de halado se estira más la masa fundida, volviéndose más fina; al contrario, mientras disminuye la intensidad de halado de la máquina, menos se estira la masa fundida, aumentando su espesor, ya que disminuye el DDR al dosificar al cabezal, en cada instante, más masa fundida durante el proceso.

Además, la disminución en el DDR traerá como consecuencia una película fofa, es decir, blanda, ya que al haber masa fundida que no se estire lo suficiente o que quede sin estirar, se va a encontrar gran proporción de moléculas de polietileno enrolladas y desordenadas al llegar el fundido a su estado sólido, que como ya se sabe, no dan buena resistencia a la tensión, al impacto y tampoco al vapor de agua.

Hay otra condición de procesamiento que también se modificará indirectamente, esta condición es la ***Altura de***

***Enfriamiento*,** parámetro que más adelante se explicará con detalle la manera en que puede influir en las propiedades de la película.

Al aumentar el FLUJO, va a aumentar el tiempo de enfriamiento del fundido, ya que se va a obtener mayor cantidad de masa fundida saliendo del cabezal y al no aumentar el caudal de aire del sistema de enfriamiento, la masa fundida o carga térmica sobrepasará la capacidad de enfriamiento de la máquina, provocando que el aire que sale del anillo de enfriamiento se caliente más rápido y se sature más rápido de calor, disminuyendo rápidamente la transferencia de calor entre la película y el aire, o sea, la velocidad con la que se cede calor desde la masa fundida hacia el aire de enfriamiento, se reduce rápidamente.

Esto quiere decir que a medida que el aire de enfriamiento recorre el cuello de la película soplada, se le dificulte enfriar al polímero, ya que el aumento en la temperatura del aire reduce la diferencia de temperaturas entre el aire y el polímero, lo que reduce la transferencia de calor desde el polímero hacia el aire.

A continuación se mostrará un esquema que da una idea de la manera en que el aire se calienta a medida que fluye alrededor del polímero fundido:

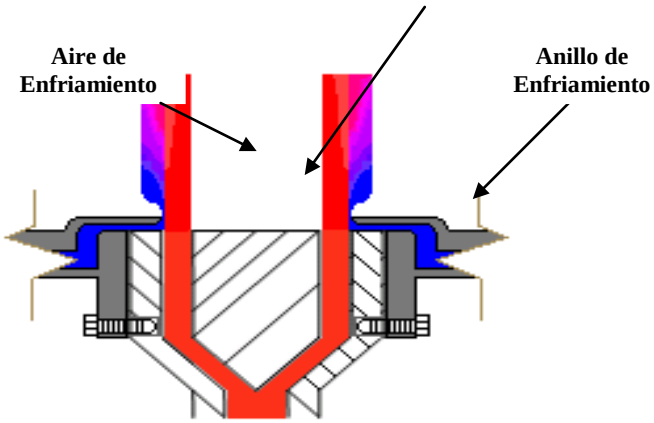


FIGURA 2.45 CALENTAMIENTO DEL AIRE DE ENFRIAMIENTO

El cambio de FLUJO sólo se lo puede hacer en un motor de velocidad variable, si es que se está trabajando en una sola máquina. También se lo puede hacer cambiando de máquina, o sea, un motor con potencia diferente.

2. DIE GAP

Este parámetro condiciona propiedades importantes de la película, ya que al variar el ***die gap*** se pueden mejorar las propiedades finales de la película y mermar las propiedades así se tenga una muy buena materia prima.

El ***die gap***, como su nombre traducido al español lo indica, es un ***espacio*** que tiene el cabezal, y que al haber explicado esta parte importante de la extrusora que permite la distribución del fundido, se lo llama ***espacio anular*.**

Cuando sólo cuando se modifica directamente el ***die gap***, se observa que al incrementar este espacio, reduce la caída de presión en el fundido al salir del cabezal. Esto es debido a que el flujo se encuentra sometido a menor stress por las paredes del espacio anular, lo cual ayuda a que el fundido se relaje con mayor facilidad en el proceso de enfriamiento.

Lo que causa el stress en el fundido es el esfuerzo cortante, mientras mayor es el esfuerzo cortante en el fundido, mayor será el stress en el mismo, de tal manera que las moléculas estarán más concentradas y desordenadas. Por lo tanto, será más difícil relajar las moléculas, estirarlas y orientarlas en el proceso de enfriamiento, ya que habrá mayor número de regiones amorfas, en las cuales se encontrará una mayor cantidad de moléculas enrolladas con mayor fuerza o intensidad.

Como se lo explicará en el estudio de la estructura molecular de la resina de HDPE, mientras más ordenadas, estiradas y

orientadas estén las moléculas, mejores propiedades mecánicas tendrá la película.

Las moléculas, por más densa que sea la resina, sufrirán un desorden al fundirse la materia prima en la extrusora, ya que tienden a separarse por la acción del calor, lo cual debilita las fuerzas de enlace que son las que mantienen el orden y la densidad en las moléculas.

Al salir el fundido del cabezal, mientras más sometido esté al stress, más difícil será estirar las moléculas y así ordenarlas; en este caso, un aumento regulado del ***die gap***, generaría menor stress por parte de las paredes del cabezal en el fundido, ya que menos apretado estaría el fundido al fluir por dichas paredes y así se relajarían sus moléculas con mayor facilidad.

Mientras más se relajen sus moléculas al ser estiradas por los rodillos que halan la burbuja desde su parte superior, y por el aire que sopla la burbuja en su interior, más ordenada y orientada estará la estructura molecular de la película, una vez que el fundido se haya enfriado totalmente.

Entonces, mientras más relajado salga el fundido del cabezal, más fácil será estirar sus moléculas y de esta

manera ordenar la estructura molecular, para que al enfriarse se obtengan buenas o excelentes propiedades mecánicas, según la intensidad de estiramiento y la velocidad de enfriamiento que se le da al fundido.

El efecto de los esfuerzos cortantes sobre el fundido se puede explicar mediante un modelo mecánico, el cual consiste en el caso de ***Placas Planas Paralelas*** que trata la ***Mecánica de Fluidos*****.**

Este caso consiste en el recorrido de un fluido a través de un espacio confinado por dos placas planas paralelas, este caso sería el más idóneo para adaptarlo al modelo del **die gap**, ya que al rolar dos placas planas paralelas, forman un espacio en forma de anillo. Para el **die gap,** el fundido se encuentra confinado entre dos placas planas paralelas que han sido roladas, las cuales son el cuerpo del cabezal y el mandril.

Al rolar las dos placas no se altera el caso de la mecánica de fluidos que estamos adaptando al ***die gap***, ya que las dos placas roladas siguen siendo paralelas, como lo muestra la Figura 2.28 al estudiar el cabezal de extrusión. Además, el efecto de la curvatura no afecta la mecánica del fluido.

El siguiente esquema muestra el caso de las placas planas paralelas, en el cual se detalla la manera cómo actúan los esfuerzos cortantes al recorrer el fluido en medio de ellas:

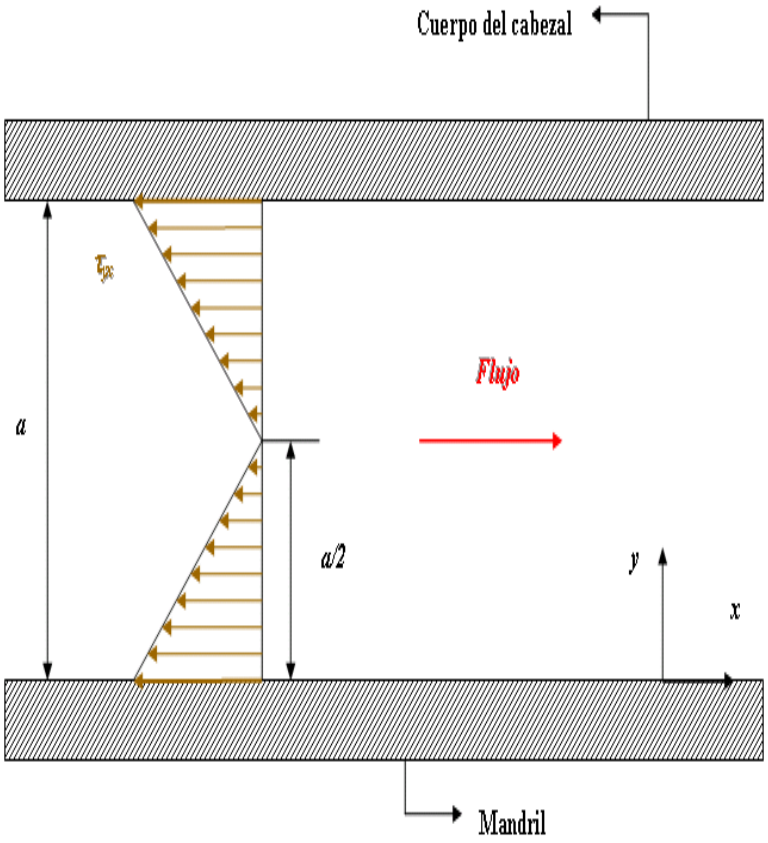


FIGURA 2.46 PERFIL DE ESFUERZOS CORTANTES

En la Figura 2.46 se muestra el perfil de los esfuerzos cortantes que actúa en contra del flujo del fundido que pasa a través del espacio anular.

Se observa que son fuerzas que ofrecen máxima resistencia en las paredes de las placas y van disminuyendo en los puntos lejanos a las paredes, hasta que la resistencia al flujo es cero en el centro del espacio anular.

Según la mecánica de fluidos, el perfil de los esfuerzos cortantes que se muestra en la Figura 2.46, se encuentra representado mediante el siguiente modelo matemático:

$$\tau_{yx} = a\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\left[\frac{y}{a} - \frac{1}{2}\right] \qquad \textbf{Ecuación 2.1}$$

Donde:

- ✓ τ_{yx} es el esfuerzo cortante en el fluido;
- ✓ a es el espacio entre las dos placas o espacio anular;
- ✓ $\frac{\partial p}{\partial x}$ es la pérdida o caída de presión que sufre el fluido, por unidad de longitud, al realizar su recorrido entre las dos placas;
- ✓ y es la coordenada que nos indica el punto del espacio anular en el cual se quiere evaluar el esfuerzo cortante.

En la Figura 2.46 se observa del perfil de los esfuerzos cortantes a través del espacio anular. El esfuerzo cortante tiene

el subíndice yx, el cual significa que el esfuerzo depende de la coordenada y, como se muestra en la Ecuación 2.1, y que actúa en la dirección de la coordenada x, pero en sentido contrario al flujo. También se aprecia que el esfuerzo cortante es ***cero*** en la mitad del espacio anular ($y = a/2$) y es *máximo* en las fronteras entre el fluido y las placas ($y = 0, y = a$).

Estos resultados son lógicos, no sólo porque la Ecuación 2.1 los confirma al evaluar el esfuerzo cortante en los valores de frontera y en la mitad del espacio anular, sino que, también es lógico porque el fluido experimenta máxima fricción en las fronteras con las placas, en esos puntos es donde el fluido se estanca, es decir, su velocidad es *cero*; los puntos del fluido lejanos a las fronteras ofrecen menos resistencia al flujo porque más alejados están de las fuentes de fricción, el cuerpo del cabezal y el mandril.

Estas dos fuentes son las que provocan esfuerzos máximos de corte en sus fronteras con el fundido; mientras más alejado se está de estas fuentes, menos fricción siente el fundido al fluir a través del espacio anular, a tal punto que en el centro del espacio el esfuerzo cortante es *cero*.

Ahora que ya se tiene claro el modelo matemático y la causa física que provoca los esfuerzos cortantes, se establecerá relaciones entre el **die gap** y los esfuerzos cortantes. Antes de esto, se va a incluir la ecuación de flujo que también se la obtiene del caso de placas planas paralelas:

$$\frac{Q}{l} = \frac{a^3 \Delta p}{12 \mu L} \qquad \textbf{Ecuación 2.2}$$

Donde:

- ✓ $\frac{Q}{l}$ es el caudal del fundido que atraviesa el cabezal, por unidad de longitud, donde l es la profundidad de las dos placas, o sea, es la tercera dimensión que existe en la Figura 2.46. Se incorpora l en la Ecuación 2.2, ya que el caudal implica un volumen;
- ✓ μ es la viscosidad del fundido;
- ✓ Δp es la caída de presión que sufre el fluido al atravesar el cabezal;
- ✓ L es la longitud del recorrido del fundido a través del espacio anular, esta longitud se mide en la dirección de la coordenada x.

La longitud L se la puede mostrar en la siguiente figura, al observar la ***vista frontal*** del *corte A-A´* realizado al cabezal en la Figura 2.28:

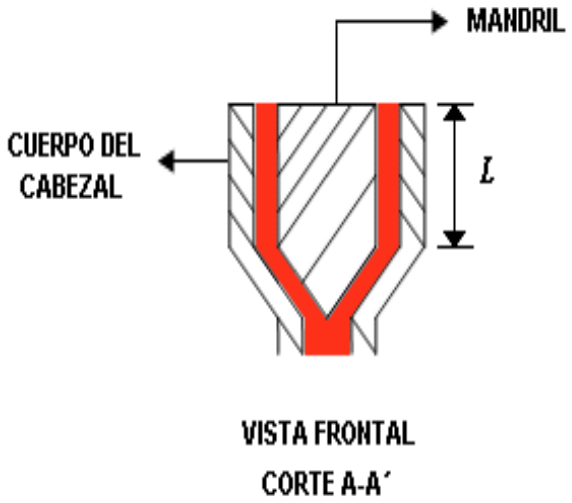


FIGURA 2.47 LONGITUD L

Para el cabezal, l es aproximadamente igual al producto entre π y el diámetro del mandril (ϕ_m):

$$l = \pi\phi_m \qquad \textbf{Ecuación 2.3}$$

Es decir, l es la circunferencia del mandril, cuyo diámetro es ϕ_m, como se muestra en la siguiente figura:

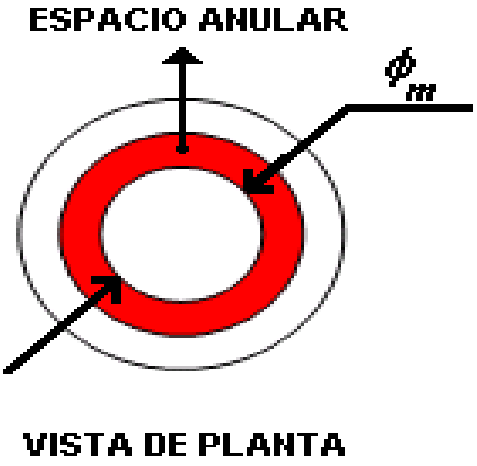


FIGURA 2.48 DIÁMETRO DEL MANDRIL

En esta figura se aprecian las dos placas roladas, de las cuales, el mandril tiene diámetro ϕ_m y longitud circunferencial l. Esta última se muestra desarrollada en la siguiente figura:

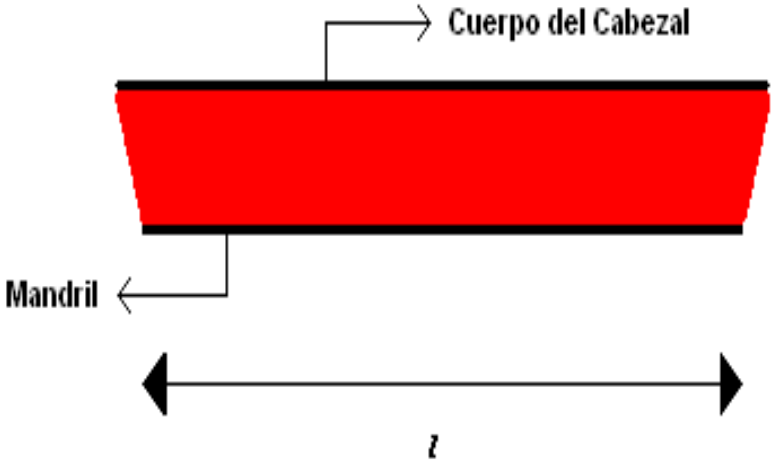


FIGURA 2.49 DESARROLLO DEL CABEZAL

Una vez que se ha incluido al caudal del polímero fundido y explicado las dimensiones del cabezal que influyen en el caso de mecánica de fluidos que se está tratando, se establecerá las relaciones respectivas entre el ***die gap*** y el ***esfuerzo cortante***, como se lo había indicado anteriormente:

El motor de la extrusora es el que le da la fuerza suficiente al fundido para atravesar el cabezal. El fundido, durante el proceso, se estabilizará en un caudal a través del cabezal, lo cual llevará a mantener constante Q en la Ecuación 2.2.

Según las condiciones de procesamiento de una de las muestras obtenidas, el caudal de fundido para la producción de dicha muestra era:

$$Q = 1.50E^{-05}\ \frac{m^3}{s}$$

A esta muestra se la identifica con la letra C, de la cual, al ser sometida a prueba, se obtuvo el siguiente valor de viscosidad:

$$\mu = 3{,}709.3\frac{Kg}{m \cdot s}$$

Este valor de viscosidad también es una constante, ya que se considera que no varía la viscosidad del fundido al atravesar el cabezal.

También es necesario calcular la longitud circunferencial del mandril con el que fue elaborada la muestra *C*. Según los datos de las muestras, los cuales se señalan claramente en el Apéndice de este tema. La muestra que se está analizando, fue elaborada en un cabezal con las siguientes medidas:

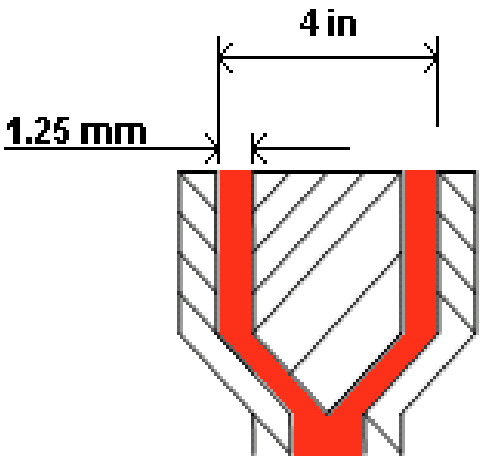


FIGURA 2.50 DIMENSIONES DEL CABEZAL DE LA MUESTRA *C*

Como se puede observar en la Figura 2.50, el diámetro del cabezal es de *4 in*, medida equivalente a *101.6 mm*; además el espacio anular es de *1.25 mm*. Con estos datos es fácil calcular el diámetro del mandril, ϕ_m:

$$\phi_m = \phi_c - 2a \qquad \textbf{Ecuación 2.4}$$

Se aprecia que el diámetro del mandril es equivalente a restarle dos veces el espacio anular al diámetro del cabezal. Se puede a reemplazar valores en la Ecuación 2.4, según los datos obtenidos de la muestra C, antes de esto, se necesita convertir las unidades de longitud de ϕ_c y a, las cuales se encuentran en milímetros (*mm*), a metros (*m*); es decir, el diámetro del cabezal sería de *0.1016 m* y el espacio anular de *0.00125 m*. Estos valores, reemplazados en la Ecuación 2.4, dan como resultado el siguiente valor de ϕ_m:

$$\phi_m = 0.0991\ m$$

Con este valor de ϕ_m, reemplazándolo en la Ecuación 2.3, se obtiene el siguiente valor de longitud circunferencial del mandril, l:

$$l = 0.31133\ m$$

Ahora se puede saber el valor $\frac{Q}{l}$ de la Ecuación 2.2, el cual es también una constante:

$$\frac{Q}{l} = 4.82E^{-05}\ \frac{m^3/s}{m}$$

Con los valores de $\frac{Q}{l}$ y μ se puede reemplazar valores en las ecuaciones 2.1 y 2.2, para establecer relaciones entre a y τ_{yx}, y

así realizar una gráfica que ilustre la manera en que estas dos variables se relacionan. A continuación se muestra una tabla de relaciones, en la cual se observa al esfuerzo cortante evaluado en la frontera entre el fluido y el cuerpo del cabezal:

TABLA 2

RELACION ENTRE EL ESFUERZO CORTANTE EVALUADO ENTRE EL FLUIDO Y EL CUERPO CABEZAL

↑ a	↓ $\Delta p/L$	↓ $\tau_{yx}\big\|_{y=a}$
mm	*psi/m*	*Psi*
1,25	159.255	99,53
1,38	119.651	82,26
1,50	92.162	69,12
1,63	72.488	58,90
1,75	58.038	50,78
1,88	47.187	44,24
2,00	38.881	38,88
2,13	32.415	34,44
2,25	27.307	30,72
2,38	23.218	27,57
2,50	19.907	24,88

La unidad del espacio anular que se muestra en la Tabla 2, no es la que se utilizó en el momento de reemplazar dicha variable en las ecuaciones 2.1 y 2.2; así mismo, las unidades de la caída de presión y del esfuerzo cortante que se aprecian en la Tabla 2, no son las que se obtuvieron inicialmente.

Al reemplazar valores en las ecuaciones, se utilizó el Sistema Internacional (SI) y lógicamente se obtuvieron valores con unidades en dicho sistema de unidades. Además se utilizó el Sistema Inglés de unidades, para la caída de presión y para el esfuerzo cortante, con el objetivo de no obtener cifras astronómicas, las cuales se tendrían si se hubiera utilizado sólo el SI para mostrar las variables de la Tabla 2.

Así mismo, para el **die gap** se utilizó el milímetro, porque así se obtienen números enteros que ayudan a mostrar mejor los datos en una tabla o en una gráfica.

Se puede notar que mientras aumenta el espacio anular, disminuye la caída de presión y así mismo el esfuerzo cortante. La mecánica de fluidos no miente, porque asegura que mientras más espacio se da para que fluya el fundido a través del cabezal, menos apretado va a estar el fluido y por lo tanto hay menor fricción entre las placas y el fluido, dejándolo al fundido menos estresado; esto es lo que provoca que haya menor caída de presión.

No sería vano mostrar una tabla en la cual se indique de manera porcentual la manera en que el espacio anular influye

en la caída de presión y en el esfuerzo cortante. A continuación se muestra lo mencionado:

TABLA 3

INFLUENCIA PORCENTUAL DEL DIE GAP SOBE EL ESFUERZO CORTANTE

↑ a	↓ $\Delta p/L$	↓ $\tau_{yx}\big\vert_{y=a}$
%	%	%
0	0,00	0,00
10	24,87	17,36
20	42,13	30,56
30	54,48	40,83
40	63,56	48,98
50	70,37	55,56
60	75,59	60,94
70	79,65	65,40
80	82,85	69,14
90	85,42	72,30
100	87,50	75,00

La Tabla 3 ilustra la manera en que a influye de manera porcentual en el decremento de la caída de presión y del esfuerzo cortante. Además como al aumentar inicialmente en

un *10%* el ***die gap***, disminuye la caída de presión en un *25%*; esto quiere decir que inicialmente, sólo por aumentar en ***13 centésimas de milímetro*** el ***die gap***, la caída de presión disminuye ***39,604 psi/m***, tal como lo indica la Tabla 3.

Un decremento en miles de $\frac{\Delta p}{L}$ es sumamente significativo para las propiedades de la película a elaborar. El decremento en la caída de presión indica que el fundido pierde menos presión al atravesar el cabezal, es decir, que el cuerpo del cabezal y el mandril ejercen menor resistencia al flujo del fundido, lo cual disminuye la intensidad de los esfuerzos cortantes, como se muestra en la Tabla 3. Esta reducción del esfuerzo cortante reduce el stress en el fundido, lo cual facilita la relajación de sus moléculas y con ello la elaboración de una película con mejores propiedades mecánicas. Esto ya se lo dijo anteriormente, la mecánica de fluidos lo confirma.

3. ALTURA DE ENFRIAMIENTO

Esta condición de procesamiento ya se la ha mencionado, por lo tanto ya se sabe que es una distancia que necesita el fundido para enfriarse y llegar a su estado sólido, mientras va siendo estirado por los rodillos haladores y por el aire que se encuentra al interior de la burbuja. A la altura de

enfriamiento se la va a representar en esta tesis por sus siglas en inglés: FH (*Frost Height*).

Mientras menor sea la altura de enfriamiento, menor va a ser el espacio y el tiempo para estirar las moléculas y así relajarlas, lo cual aumentará la velocidad de los rodillos haladores y/o la cantidad de aire al interior de la burbuja, para que las moléculas se relajen adecuadamente y así la película obtiene las propiedades que necesita.

Como ya se conoce lo que significa DDR, se puede observar que al aumentar la velocidad de los rodillos haladores sin aumentar el FLUJO, aumentará el DDR; también sucederá lo mismo si se aumenta la velocidad de los rodillos haladores en una proporción mayor a la que se aumenta la velocidad del FLUJO.

Si se aumenta la velocidad de enfriamiento o disminuye el tiempo de enfriamiento del fundido, lo cual se logra aumentando el caudal de aire de enfriamiento, disminuirá la altura de enfriamiento, lo cual obligará a aumentar la velocidad de los rodillos si es que no se quiere que aumenten las regiones amorfas en la estructura macromolecular de la película.

Así mismo, al aumentar la cantidad de aire al interior de la burbuja, aumentará el diámetro de la burbuja y con ello se estirarán más las macromoléculas para reducir las regiones amorfas que puede provocar el aumento de la velocidad de enfriamiento en el fundido. Más adelante se verá con mayor detalle el BUR, el cual es una condición de procesamiento que depende del diámetro de la burbuja y del diámetro del cuello de la misma, es decir:

$$BUR = \frac{\phi_{burbuja}}{\phi_{cuello}} \qquad \textbf{Ecuación 2.5}$$

Mediante esta fórmula se puede notar que al aumentar el diámetro de la burbuja, se aumentará el BUR. Hay dos formas de disminuir la altura de enfriamiento:

a) Aumentando el flujo de aire que sale a través del anillo o de los anillos de enfriamiento.

b) Disminuyendo el FLUJO.

La ***primera forma*** consiste en aumentar el caudal de aire que sale del anillo de enfriamiento o de los anillos de enfriamiento si es que también se está trabajando con un anillo de enfriamiento interno. El aumento de caudal de aire trae como consecuencia una mayor transferencia de calor

desde el fundido hasta el aire, esto causa que el fundido se enfríe más rápido, recorriendo menor altura de enfriamiento para llegar a su estado sólido.

La ***segunda forma*** consiste en disminuir el FLUJO, lo cual lleva a obtener menor cantidad de masa fundida a la salida del cabezal, es decir, el aire tendrá menor cantidad de masa que enfriar o tendrá menor carga térmica; esto reduce el tiempo de enfriamiento del fundido, por lo tanto se necesitará menor espacio o menor altura de enfriamiento para que el fundido llegue a su estado sólido.

Como ya se mencionó, al disminuir la altura de enfriamiento, se obtiene menor espacio para relajar las moléculas. Al utilizar la primera forma para disminuir FH, se tendrá que aumentar el DDR para incrementar la intensidad con la que se halan las macromoléculas de la película en la dirección en la que sale el fundido del cabezal, llamada ***Dirección Máquina*** **(DM).**

Se aumenta el DDR hasta que las macromoléculas puedan estar, en menor tiempo, estiradas y ordenadas en la dirección máquina, en su totalidad o en mayor porcentaje posible, ya que no se pueden estirar y ordenar las

macromoléculas de la película, al llegar éstas a su estado sólido.

No se pueden manipular las macromoléculas de la película al llegar ésta a su estado sólido, porque las fuerzas de unión se han intensificado a tal punto que se han plasmado de manera permanente en la película “fría”, sólo la acción del calor disminuiría la intensidad de las fuerzas de unión y así se podrían manipular de nuevo las macromoléculas.

Como ya se conoce, si las macromoléculas se llegan a enfriar hasta su estado sólido, sin haberse estirado y ordenado lo suficiente, dejando en su mayoría, regiones amorfas, se obtendrá una estructura macromolecular fofa, ya que al tener una estructura macromolecular amorfa, la película carece de resistencia a la tensión, al impacto y a la transmisión de vapor de agua.

Por la misma razón que se intensifica el DDR, se deberá intensificar el halado de la película en la ***Dirección Transversal*** (DT) a la dirección máquina, esto se logra al aumentar la cantidad de aire al interior de la burbuja. La intensidad de halado en la dirección transversal, se mide a través del BUR.

A continuación se mostrará un esquema acerca de las direcciones de halado:

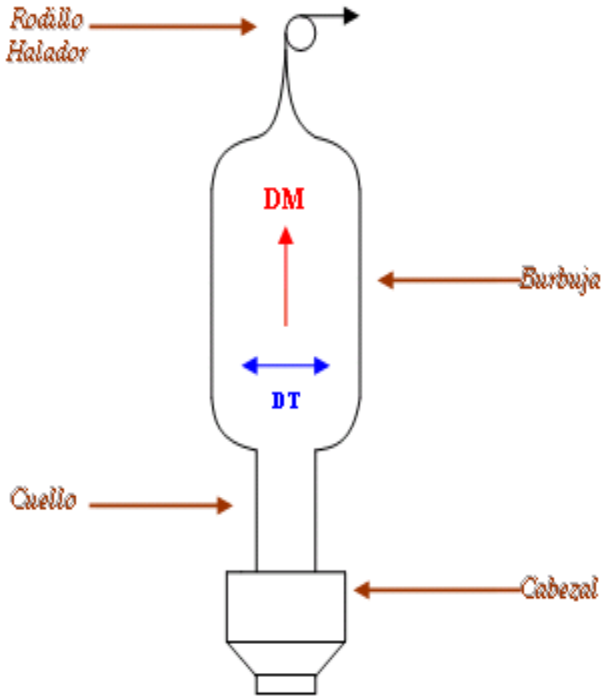


FIGURA 2.51 DIRECCIONES DE HALADO EN LA PELÍCULA

Al reducir FH, reduciendo el FLUJO, no se necesitará aumentar el DDR ni el BUR, por lo menos no se lo hará en la misma proporción que se lo hace cuando se reduce el FH por vía de caudal de aire.

Esto se debe a que al reducir el FLUJO, se reduce la velocidad de salida del fundido y con ello se aumenta el DDR, también, el hecho de que haya menos FLUJO, causa que el espesor del

fundido sea menor, por lo que necesita menos tiempo de estiramiento para que las macromoléculas se estiren y se ordenen lo suficiente.

Se aumentará poco o nada el BUR, ya que al haber menos FLUJO, habrá menos masa fundida que estirar, la cual saldrá con menos fuerza y consistencia, y hará que el aire se expanda naturalmente en el interior de la burbuja y así aumente el diámetro de la misma.

Una vez más se han visto las causas y consecuencias de la reducción de FH, por lo que se puede deducir que las causas y consecuencias del aumento de FH serán inversas.

Como se ha mencionado, una película necesita ser bien estirada para poder ordenar las macromoléculas de su estructura y así poder obtener una estructura macromolecular cristalina, la cual tiene mejores propiedades mecánicas que una estructura amorfa.

Pero no sólo se tiene que estirar bien las macromoléculas, también hay que relajarlas bien y esto no sólo se logra a través del DDR y el BUR, es un trabajo conjunto entre el DDR, BUR y la Altura de Enfriamiento, es decir, si la película

es sometida a una gran intensidad de halado en DM y en DT, pero se enfría muy rápido, no se relajará bien aunque quede bien estirada.

Esta falta de relajamiento provoca rigidez en la película, lo que no favorece a su elongación ni a su resistencia al impacto, ya que para soportar una carga de tensión o impacto, la película también necesita elasticidad y plasticidad, lo cual se obtiene a través de un proceso de enfriamiento moderadamente lento; es como en los metales, mientras más rápido es el proceso de enfriamiento de ellos, más rígida es su estructura luego de dicho proceso, lo que causará que el metal esté más vulnerable a fallar al ser sometido a una carga mecánica, ya que carece de propiedades elásticas y plásticas.

El término “plasticidad”, se utiliza en los materiales para denotar su capacidad de deformarse hasta el punto de ruptura, al ser sometido a una carga mecánica. En cambio, a medida que se aumenta el tiempo del proceso de enfriamiento, la estructura del metal será más dúctil, esto significa que al ser sometido el metal a una carga mecánica, éste tendrá mayor porcentaje de elasticidad y plasticidad para soportar la carga.

Con lo explicado en el párrafo anterior, se puede entender que el tiempo o la rapidez de enfriamiento de la película son importantes, ya que influye directamente en su capacidad de elongación y en su resistencia al impacto.

Por lo tanto, a parte de un buen estiramiento macromolecular, hay que tener un proceso de enfriamiento moderadamente lento, ya que esto permite estirar y relajar mejor las moléculas, lo que causa que la película tenga mayor tenacidad para soportar una carga mecánica.

El término “tenacidad” denota la capacidad de elongación que tiene el material hasta el punto de ruptura, al ser sometido a un esfuerzo mecánico, es decir, la cantidad de energía que puede absorber un material, de la carga mecánica a la cual es sometido, hasta el punto de ruptura. Aumentar el tiempo de enfriamiento significa aumentar la altura de enfriamiento.

4. BUR

Como ya se lo ha manifestado, el BUR es la relación que existe entre el diámetro de la burbuja y el diámetro del cuello de la misma. En la Figura 2.33 se muestran las variables de

las cuales depende esta condición de procesamiento, y la fórmula con la cual se la mide es la Ecuación 2.5.

Esta condición de procesamiento es importante, ya que estira las macromoléculas de la película en la dirección transversal, por esto puede ayudar a equilibrar la influencia que causan los cambios de las demás condiciones sobre las propiedades de la película, especialmente las propiedades transversales de la misma, como la resistencia a la tensión en dirección transversal. La influencia de estos cambios sobre las propiedades de la película, ya se la ha mencionado al haber estudiado condiciones de procesamiento, como: FLUJO, **Die Gap** y Altura de Enfriamiento.

Cuando se habló del FLUJO, no se mencionó la manera como el BUR puede equilibrar la influencia del aumento del caudal de fundido en el proceso, debido a que el aumento del caudal de fundido no afecta directamente al BUR, como si lo hace con el DDR, que por lo menos no afecta al BUR en la misma proporción como lo hace con el DDR.

De todas maneras, el BUR, puede ser de gran ayuda en el equilibrio del proceso, cuando se generan cambios en otras condiciones, como las que ya se han mencionado, por

ejemplo: si se aumenta el FLUJO, se tendría que aumentar de golpe el DDR para equilibrar su reducción, pero si después de llegar al equilibrio, se quiere reducir más el espesor de la película y dar mayor tensión a ésta en la dirección transversal, un aumento en el BUR sería de gran ayuda, ya que al aumentar el diámetro de la burbuja las macromoléculas de la película se estiran más transversalmente, lo que ocasiona que éstas aumenten su resistencia a la tensión en DT; esto también reduciría el espesor, ya que a medida que se más estira la película, el espesor de ésta se reduce más, tal como se mencionó al estudiar el FLUJO, sino que ahora el estiramiento es en DT, lo cual tiene la misma concepción que el estiramiento en DM. Aumentar o disminuir el BUR es más económico y seguro que aumentar o disminuir el DDR, con esto se quiere decir que hay casos en los que el aumento o disminución en el BUR puede sustituir de manera parcial o completa un aumento o disminución en el DDR, respectivamente, lo cual sería más económico y seguro.

Al aumentar el DDR, en el caso de un aumento de FLUJO, se tendría que aumentar la velocidad de los rodillos haladores, lo cual equivale a que se aumente la corriente al

motor de estos rodillos, y con ello se invertiría más dinero en consumo de energía eléctrica.

En una disminución del FLUJO ya no sería necesario aumentar el DDR, ya que al haber menos cantidad de masa saliendo del cabezal en menos tiempo, disminuye el espesor de la película y aumenta al DDR, pero lo puede aumentar hasta un punto que no convenga a los intereses del cliente ni del productor.

Si uno disminuye la dosificación de masa fundida al cabezal, lógicamente se tendrá menos espesor en la película sólo por la disminución de masa fundida, o sea, con la misma intensidad de halado que se tenía antes de disminuir el FLUJO sería suficiente para poder estirar bien el fundido, pero aparte de disminuir el espesor por la menor cantidad de masa fundida, la disminución de la velocidad con la que sale esta masa fundida del cabezal, aumenta el DDR, causando que se estire al fundido más de lo que se esperaba y con ello disminuye aún más el espesor de la película, lo que no sería adecuado si el cliente no necesita una película con un espesor muy reducido.

En este caso habría que disminuir el DDR, lo que equivale a que disminuya la velocidad de los rodillos haladores y con ello la corriente de su motor. El cambio frecuente de la corriente del motor es perjudicial para el circuito eléctrico del mismo, y para el circuito del variador de velocidad del motor, también, ya que los cambios frecuentes de corriente originan esfuerzos cíclicos térmicos en el circuito, tendiendo éste a dañarse en menos tiempo de lo que se estima. Éste duraría si es que no son tan frecuentes los cambios de corriente.

Mientras menor sea la frecuencia de los cambios de corriente, menos se verá afectada la vida útil del motor; lo mismo pasará si es que la intensidad del cambio es menor, o sea, si es que el motor, estando a una velocidad específica, no cambia a una velocidad mucho mayor o mucho menor.

Si el circuito del motor de los rodillos haladores llega al final de su vida útil, o sea, llega a fallar en un momento inesperado, el motor deja de funcionar y con ello no se tendría capacidad de halado de la película en DM, lo que ocasionaría que el fundido que sale del cabezal se chorree alrededor de la parte externa de éste, y si hay una persona cerca del mismo en ese momento, le puede causar

quemaduras, ya que el fundido sale del cabezal a una temperatura mayor a los 100 ºC.

Con lo explicado, se estima que en algunos casos es más económico y seguro cambiar el BUR para equilibrar el proceso, aunque en muchas ocasiones no sea tan eficaz como lo es el DDR, ya que éste último tiene a su favor la potencia de un motor, lo que es más eficaz que la presión de aire que viene del compresor, lo que a su vez infla a la burbuja para aumentar su diámetro y estira las macromoléculas en DT.

El BUR, como ya se sabe, representa el estiramiento de la película en dirección transversal a la dirección de estiramiento que realizan los rodillos haladores.

El estiramiento en DT es muy importante, ya que permite que la película no sólo tenga resistencia a la tensión en DM, a través del DDR, sino que también la tenga en DT.

El estiramiento bidireccional de la película en su proceso de enfriamiento es importantísimo, ya que esto permite que la película tenga resistencia a la tensión en dos direcciones,

por lo tanto, el cliente podrá estirar y manipular su producto en dos direcciones con menor riesgo de que se rompa.

Si sólo una macromolécula falla al ser manipulada, la película se empieza a romper a través de esta macromolécula, por lo tanto, es esencial que el proceso de extrusión de la película soplada se concentre en estirar, ordenar y relajar bien a las macromoléculas en su proceso de enfriamiento.

Mientras mayor sea el estiramiento bidireccional de la película en su proceso de enfriamiento, mayor será el orden de las macromoléculas, lo cual favorece a las propiedades mecánicas, como resistencia a la tensión, resistencia al impacto e impermeabilidad, tal como se lo mencionó en el estudio de la cristalinidad de la resina.

Con lo que se ha estudiado hasta el momento acerca del BUR, se puede notar la importancia que tiene esta condición de procesamiento en la fabricación de la película, la cual junto al DDR, es capaz de optimizar las propiedades mecánicas de la película, ya que si no hay estiramiento transversal, de nada sirve que se hayan estirado y relajado

bien las macromoléculas en DM, porque éstas van a fallar, empezando a rasgarse la película desde está la falla.

Si no hay un buen estiramiento transversal, las macromoléculas se encuentran desordenadas y dispersas en esta dirección, siendo camino fácil para el vapor de agua y/u otros gases; como se lo refirió en el estudio de la estructura molecular, mientras más unidas estén las macromoléculas, más difícil será el acceso para el vapor de agua, así mismo, mientras más dispersas estén las macromoléculas, más fácil será para el vapor de agua fluir a través de ellas.

A continuación se muestra una figura para ilustrar la apariencia de una estructura bien estirada transversalmente y de una no bien estirada en esta misma dirección.

En la Figura 2.52, se pueden observar los espacios que quedan al no haberse estirado bien las macromoléculas en la dirección transversal, dichos espacios son mayores que los observados en la estructura macromolecular que ha tenido un BUR mayor, es decir, que ha tenido una intensidad de halado mayor en la dirección transversal. Mediante la Figura 2.52 se aprecia el aspecto físico que tendría una estructura

macromolecular de una película, después de un proceso de estiramiento.

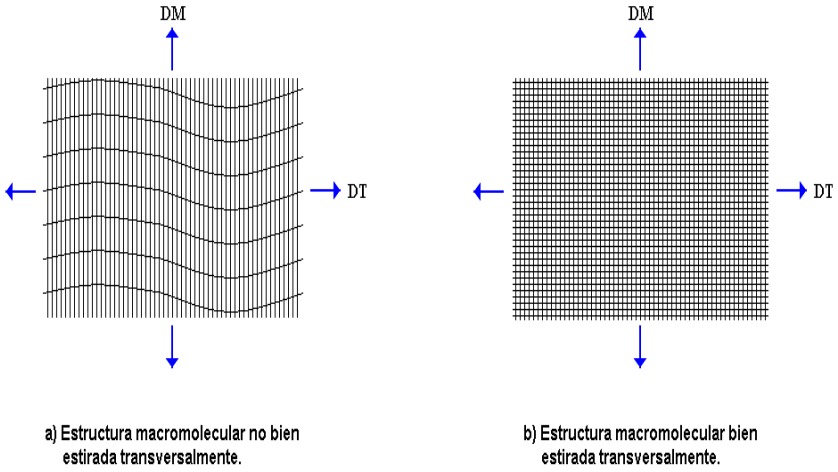


FIGURA 2.52 ESTIRAMIENTO EN DT

Visualmente es obvio que en la estructura macromolecular que tiene espacios más grandes, fluye mayor cantidad de vapor que en la estructura de menores espacios entre macromoléculas. Así mismo, se puede deducir que la estructura macromolecular de la Figura 2.52 tiene menor intensidad de halado en la dirección transversal, es decir, menor BUR que la estructura macromolecular de la misma figura.

Al haber puesto como ejemplo la manera en que el BUR, junto al DDR, puede optimizar las propiedades de la película al equilibrar el cambio que se dio en el proceso por causa de un aumento del FLUJO, se hizo un estudio extenso de las bondades que tiene el BUR. Estas bondades son importantes para cualquier cambio en el proceso.

Aunque no se mencionó la Altura de Enfriamiento en el estudio del BUR, se notó la manera en que el BUR puede equilibrar y optimizar el proceso de producción de película soplada; en el estudio del ***Die Gap*** no se mencionó al BUR de manera directa, aunque estaba intrínseco al haberse explicado la necesidad de estiramiento que tienen las macromoléculas en el proceso de enfriamiento, si las moléculas salen con mayor stress del cabezal.

En muchos casos, el proceso de producción de película soplada no sólo se equilibrará a través del BUR, también se necesitará del DDR para llegar al equilibrio, pero será menor la ayuda que se necesite del DDR para equilibrar y optimizar el proceso, si es que interviene el BUR en el equilibrio, lo cual traerá beneficios económicos y de seguridad.

5. DDR

Esta condición de procesamiento ha sido mencionada en el estudio de las demás condiciones de procesamiento, por esta razón ya se tiene en claro lo significa el DDR. Sólo faltan ciertos detalles para poder culminar su estudio, entre estos se tiene la ecuación que denota matemáticamente al DDR:

$$DDR = \frac{V_L}{V_o} \qquad \textbf{Ecuación 2.6}$$

Donde:

- ✓ V_L es la velocidad lineal de los rodillos haladores;
- ✓ V_o es la velocidad que tiene el FLUJO de polímero fundido al salir del cabezal.

La diferencia entre estas velocidades es lo que causa el estiramiento o halado de la película, si la masa fundida sale a la misma velocidad lineal que tienen los rodillos haladores, el estiramiento de las macromoléculas fuese despreciable, ya que éstas se estirarían muy poco en su proceso de enfriamiento, a tal punto que, luego de dicho proceso, casi toda la estructura macromolecular de la película, sería fofa.

Mientras mayor es la diferencia entre estas velocidades ($V_L >> V_o$), mayor será la intensidad de halado de la película, es decir, las macromoléculas serán sometidas a un estiramiento mayor. En cambio, mientras menor es la diferencia entre estas velocidades, el estiramiento de las moléculas será menor y las propiedades mecánicas también.

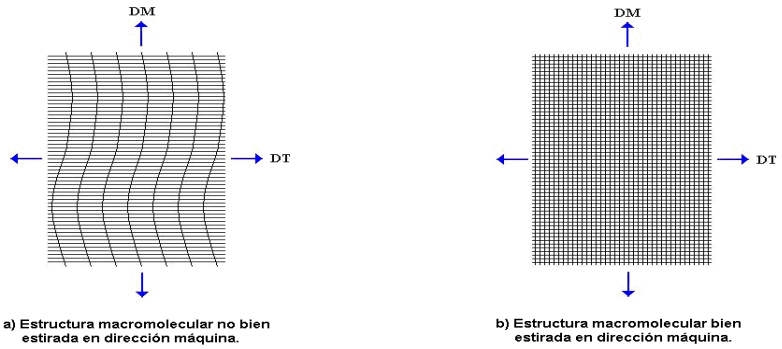
Esta condición de procesamiento es muy importante para las propiedades mecánicas de la película, a tal punto que si no hay estiramiento de la película en DM, la masa fundida que sale del cabezal puede chorrearse alrededor del mismo, lo cual puede provocar un accidente. Esto, sucede si el DDR es cero, o sea, si la velocidad de los rodillos haladores es cero.

Si el DDR es menor que 1, también se podría ocasionar un accidente del mismo tipo, esta condición sucede cuando la velocidad lineal de los rodillos es menor que la velocidad de salida de la masa fundida.

Cuando el DDR es igual a 1, ya se sabe que el estiramiento es despreciable y que se obtendría una estructura macromolecular fofa. En cambio, cuando el DDR es mayor que 1, el halado de la película se torna apreciable, esto se da

si la velocidad lineal de los rodillos es mayor que la velocidad de salida de la masa fundida. Cada vez que el DDR esté más arriba del 1, mayor será la diferencia entre V_L y V_o, lo que aumentará la intensidad de halado de la película y con ello las propiedades mecánicas. A continuación se mostrará una película bien estirada en DM y una no bien estirada en la misma dirección.

Sin mucho esfuerzo, se puede notar visualmente en la figura 2.53 la diferencia entre las dos estructuras, la estructura que no está bien estirada en DM y la estructura que está bien estirada en DM. Esto hace que haya una diferencia entre las propiedades de estas estructuras macromoleculares, es decir, la película de la primera película tendrá mejores propiedades mecánicas que la segunda película de la Figura 2.53.



a) Estructura macromolecular no bien estirada en dirección máquina.

b) Estructura macromolecular bien estirada en dirección máquina.

FIGURA 2.53 ESTIRAMIENTO EN DM

Al haber mejor estiramiento en la estructura de la primera película los espacios intermoleculares serán más pequeños, lo que causará que pase menor cantidad de vapor de agua a través de ellos, o sea, el vapor de agua u otros gases tendrán mayor dificultad para entrar a través de estos espacios intermoleculares más pequeños, lo que le da a esta película una mayor resistencia contra la transmisión de vapor de agua y/u otros gases.

En cambio, al haber una estructura que, aunque tenga un buen estiramiento en DT, no haya tenido un buen estiramiento en DM, como es el caso de la estructura de la segunda película, los espacios intermoleculares serán mayores y con ello la transmisión de vapor a través de ellos, es decir, la estructura de la primera película tendrá menor resistencia contra el vapor de agua y/u otros gases.

Lo mismo sucederá con la resistencia a la tensión, ya que el mayor estiramiento macromolecular provoca una mayor resistencia a la tensión en la película, por lo tanto, la primera película, tendrá mayor resistencia a la tensión en DM que la segunda película de la Figura 2.53.

Aunque se note que haya un buen estiramiento en DT para ambas películas, no quiere decir que las dos tengan igual resistencia a la tensión en DT, una película pudo haber sido estirada más que la otra en esta dirección, lo que le daría una mayor resistencia en esta dirección; no se sabe cuál de las dos películas tendría mayor resistencia a la tensión en la dirección transversal, ya que es un ejemplo cualitativo, más no cuantitativo, pero lo que se puede asegurar es que las dos películas tienen una buena resistencia a la tensión en esta dirección.

Para que la película tenga una buena resistencia al impacto, debe haber un buen estiramiento de las macromoléculas en las dos direcciones de halado, además de un buen relajamiento de las mismas, lo cual implica un enfriamiento moderadamente lento. El proceso de halado en DM en la primera película de la Figura 2.53, no ha sido bueno, por lo tanto esto resta tenacidad en la misma.

Mediante el estudio de este ejemplo, se ha podido demostrar que la segunda película de la Figura 2.53 tiene mejores propiedades mecánicas que la primera película de la misma Figura 2.53. Esta demostración es a nivel teórico, falta el

nivel práctico o de ensayos, lo que se ha estudiado acerca de la estructura molecular, de las condiciones de procesamiento y de las propiedades de las películas de HDPE de uso múltiple.

2.6 Proceso de Calidad de Películas de Polietileno de Alta Densidad

El proceso de calidad para películas de HDPE, consta de una serie de ensayos que permiten establecer o ponderar las propiedades mecánicas y físicas de la película. Mediante algunos de estos ensayos se demostrará lo que se ha estudiado a nivel teórico acerca de la estructura molecular, de las condiciones de procesamiento y de las propiedades de películas de HDPE de uso múltiple. Los ensayos más importantes que sirven para ponderar la calidad de una película son:

- ✓ Ensayo de Tracción y Elongación (ASTM D-882)
- ✓ Ensayo de Resistencia al Impacto (ASTM D-1709)
- ✓ Ensayo de Resistencia a Rasgarse/Ruptura (ASTM D-1922)
- ✓ Ensayo de Coeficientes de Fricción (ASTM D1894-93)
- ✓ Ensayo de Transmisión del Vapor de Agua “WVTR” (ASTM E-96)
- ✓ Ensayo de Transmisión de Gases (ASTM D-1434)
- ✓ Ensayo de Brillo (ASTM D-2457)
- ✓ Ensayo de Opacidad (ASTM D-1003)

Como se ha notado a lo largo del estudio, la calidad de las películas se ha enfocado en la resistencia a la tensión o tracción, en la capacidad de elongación, en la resistencia al impacto, y en la resistencia a la transmisión de vapor de agua. La calidad de la película se ha enfocado en estas propiedades, porque no hay la facilidad de la instrumentación necesaria para realizar todos los ensayos que se mencionaron anteriormente, además, la demanda de las películas de HDPE enfoca su exigencia de calidad en las propiedades que se ha estudiado en este capítulo, por lo cual, se estudiarán los ensayos correspondientes para establecer dichas propiedades.

2.6.1 Ensayo de Tracción y Elongación (ASTM D-882)

La ***resistencia a la tracción*** es la capacidad que tiene la película de resistir una caga de tensión, ya sea ésta en DM o en DT, hasta la ruptura. La ***elongación*** es la cantidad de estiramiento que el material puede soportar antes de romperse.

La máquina de ensayo está compuesta de unas mordazas, en las cuales se sujeta una tira de la película que se somete a este ensayo. Una vez que se sujeta la tira a las mordazas, se enciende la máquina, la cual empieza a desplazar la mordaza superior para estirar la tira, mientras la mordaza inferior ofrece una fuerza de resistencia al movimiento de la mordaza superior,

que es lo que hace posible estirar la tira para ponderar su elongación y resistencia a la tensión.

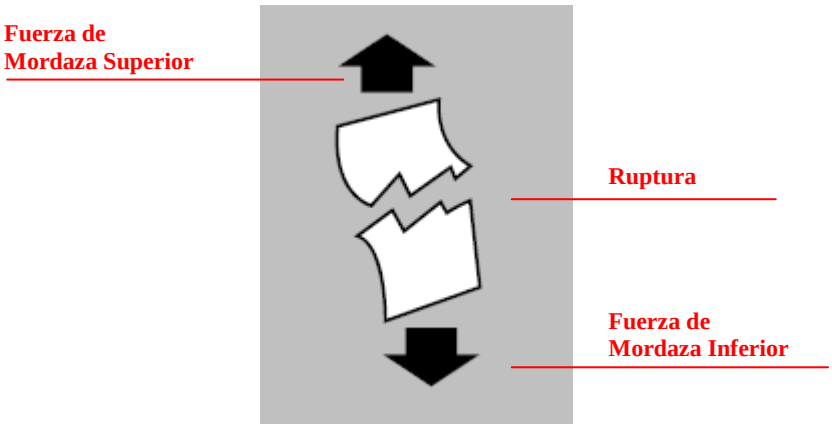


FIGURA 2.54 TRACCIÓN Y ELONGACION DE PELICULAS

Para que la explicación acerca de la composición y funcionamiento del equipo sea mejor, se mostrarán dos figuras, una figura contiene la foto de un equipo característico para el ensayo de tracción y elongación, la otra, contiene la secuencia de elongación de la tira que es sometida a tensión, hasta que llega a la ruptura, momento en el cual la máquina anota el valor de la fuerza y elongación.

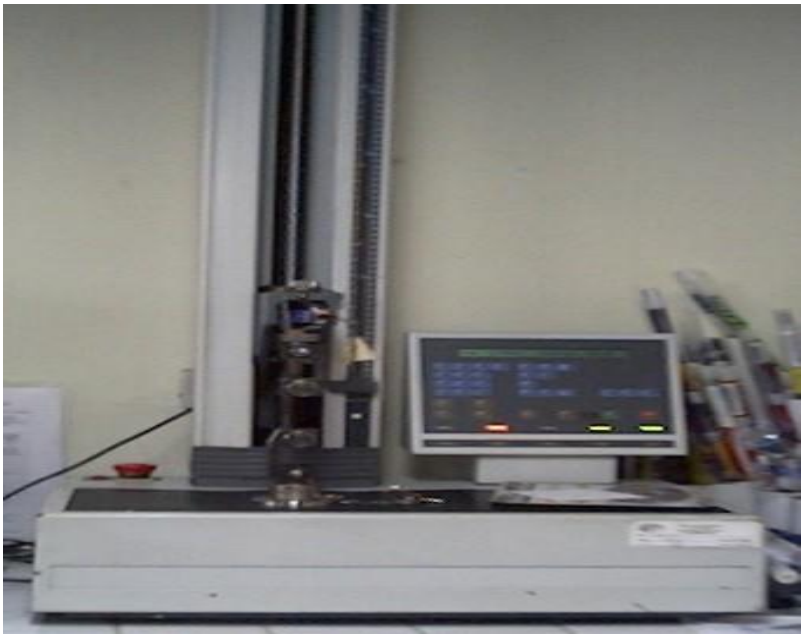


FIGURA 2.55 MÁQUINA DE ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN

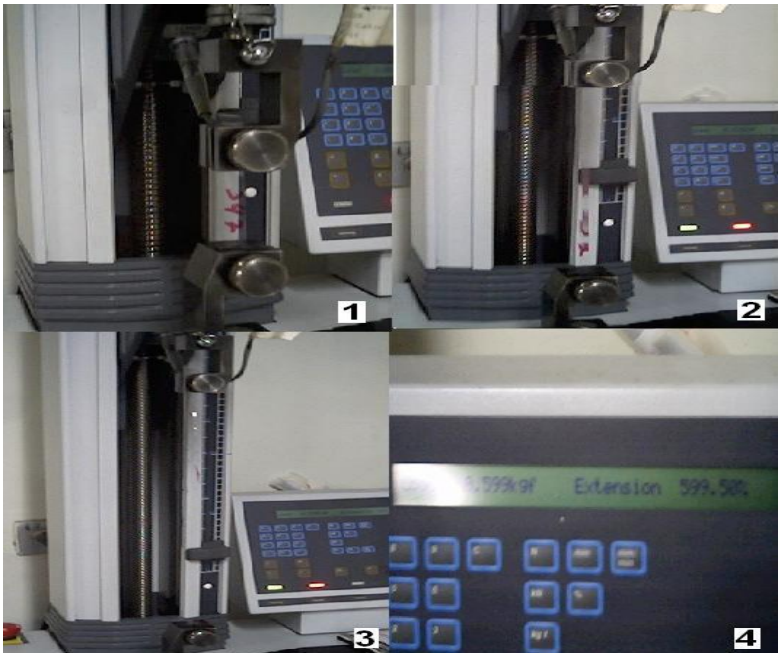


FIGURA 2.56 SECUENCIA DE ELONGACIÓN

Al ser estirada la tira, ésta sufre el fenómeno de la elongación, hasta que llega a la ruptura, punto en el cual la máquina toma el dato de la fuerza con que la tira sufrió la ruptura, además de la elongación que sufrió hasta este punto. Para que la tira sufra elongación, la máquina irá aumentando la fuerza de estiramiento, o sea, el esfuerzo de tensión, hasta que se llegue a la ruptura.

La siguiente figura muestra, de manera cualitativa, curvas características de ***Esfuerzo–Deformación***, para tiras sometidas al ensayo de tracción. y la relación entre el esfuerzo de tracción y la elongación que sufre la película, relación que señala el aumento paulatino del esfuerzo de deformación a medida que la película sufre elongación.

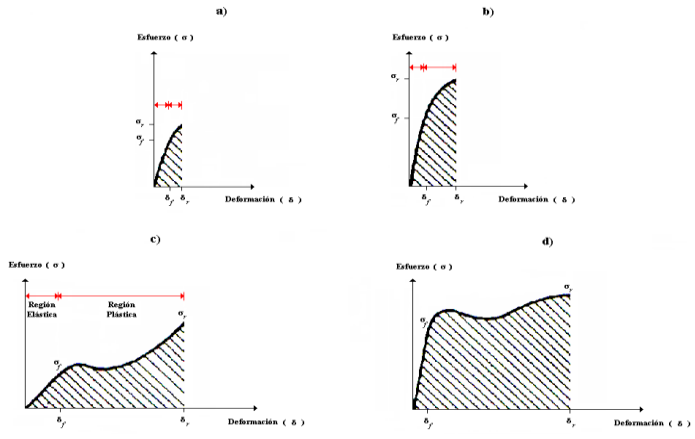


FIGURA 2.57 CURVAS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN

Las curvas que muestra la Figura 2.57, son las posibles curvas características que puede tener una película que se somete a ensayo de tracción, las cuales son una muestra clara de la calidad de la película, no sólo con respecto a su resistencia a la tensión y a su elongación, sino también que se puede obtener una idea acerca de otras propiedades mecánicas, como su resistencia al impacto y su resistencia a la transmisión de vapor de agua.

A parte de tener una idea con respecto a la calidad de la película, también se puede tener una idea con respecto a las condiciones de procesamiento de la película, ya que por lo que se ha estudiado en este capítulo, las condiciones de procesamiento juegan un papel relevante en la calidad de la película.

La curva **a)** muestra una película que ha tenido una baja intensidad de halado con una alta rapidez de enfriamiento, lo cual da como resultado una película con una estructura molecular amorfa y frágil. Es por esto que su resistencia a la tracción hasta la ruptura (σ_r) es muy baja en relación a las otras curvas, ni qué decir de su resistencia a la fluencia (σ_f), la cual por naturaleza debe ser menor que la resistencia a la ruptura.

Toda curva que muestra la resistencia a la tracción de un material, tiene dos regiones, ***Región Elástica*** **y** ***Región Plástica***. La región elástica es aquella en la cual la película puede volver a su posición original luego de haber sido estirada o de haber sufrido elongación, siendo su máxima elongación δ_f, elongación que sufre el material al ser sometido a su esfuerzo de fluencia, en el cual la película llega a su límite elástico, un esfuerzo mayor a éste provocaría la fluencia del material, es decir, el material se estiraría sin que este pueda volver a su posición original luego de sufrir elongación por causa de un esfuerzo mayor a σ_f.

La región plástica se inicia desde que se ha sometido el material a su esfuerzo de fluencia y termina en el instante en el que el material falla o llega a la ruptura, o sea, termina en el instante en el que el material es sometido a su esfuerzo a la ruptura σ_f. En el rango de plasticidad, el material sufre una elongación, llegando estirarse hasta δ_r, denotación que se le da a la elongación máxima que sufre el material hasta su punto de ruptura. La región elástica siempre antecede a la región plástica, ya que para que un material entre en fluencia, necesita llegar primero hasta el límite de su elasticidad.

La curva **b)** es característica para una película que ha sido procesada con una alta intensidad de halado y una alta rapidez de enfriamiento, provocando que la película sea dura o que soporte altos esfuerzos de tensión, pero que tenga poca plasticidad para soportar la deformación o fluencia del material al ser sometido a una carga mayor a σ_f.

La carencia de plasticidad es lo que no ayuda al material a soportar una carga mayor a la carga de fluencia, ya que la película absorberá, en la región plástica, muy poca cantidad de la energía que transmite la carga, rompiéndose fácilmente los enlaces entre macromoléculas o entre regiones (cristalinas y amorfas) dentro de la estructura molecular. En cambio, si el material tiene un rango extenso de plasticidad, el material absorberá, en la región plástica, toda la energía o gran parte de la energía que transmite la carga al mismo, demorando así su proceso de falla.

La curva **c)** muestra las características mecánicas de una película que ha sido bien relajada y sometida a una baja intensidad de halado en su proceso de producción, es decir, el fundido se ha enfriado lentamente y sus macromoléculas se han ido estirando con poca fuerza, causando que la película

tenga un amplio rango de elasticidad y plasticidad, pero una relativa baja resistencia a la tracción. La capacidad de elongación que tiene esta clase de películas es muy buena y es esto lo que le ayuda a amortiguar la carga a la que es sometida y suplir hasta cierto punto la falta de resistencia a la tracción, es decir, absorberá gran parte de la energía de la carga de tracción hasta que llegue a la ruptura, esto causará que demore el proceso de falla de la película.

La curva **d)** pertenece a una película que tiene muy buenas propiedades mecánicas, tanto de dureza como de elasticidad y plasticidad. Esta clase de películas logran obtener muy buenas propiedades mecánicas por el proceso de producción al cual han sido sometidas, dicho proceso implica un buen relajamiento de las moléculas con una buena intensidad de halado de las mismas, causando que la película tenga dureza y un amplio rango de elongación.

El área bajo la curva esfuerzo–deformación sirve para ponderar la tenacidad de la película, mientras mayor es el área bajo la curva, mayor es la tenacidad; por lo tanto, la clase de películas que muestra la curva **d)**, tienen mayor tenacidad que las otras clases de películas que muestran las otras curvas, esto quiere

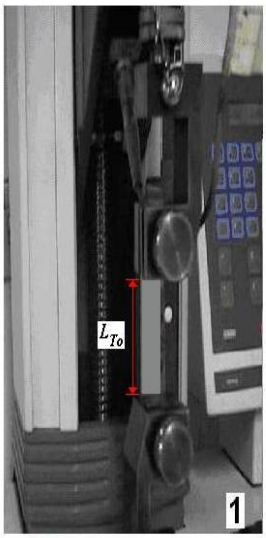
decir, que la película que muestra la curva **d)**, tiene mayor capacidad de deformarse al someterse a un alto esfuerzo.

Las curvas de esfuerzo–deformación tienen características comunes, las cuales merecen ser explicadas con detalle para entender la razón de estas características y así poder conocer a fondo el comportamiento de la estructura molecular de la película, cuando está siendo sometida a alguna carga mecánica, en este caso, de tensión. Para explicar la razón de estas características, se debe observar lo que sucede a nivel molecular en la película, al ser sometida ésta a una carga de tracción.

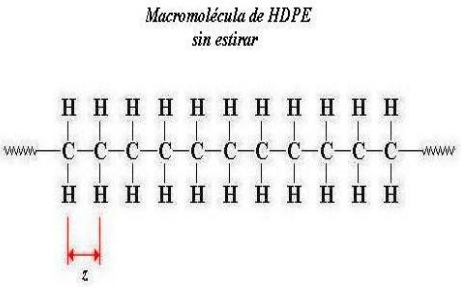
Cuando la película se somete a tensión, ésta va siendo estirada, por lo que sufre elongación, la cual puede desaparecer si es que la fuerza de tensión, trabajando dentro de la región elástica, deja de actuar; en cambio, si la fuerza de tensión es tal que se supera la resistencia a la fluencia, la elongación que sufre la película ya no puede desaparecer una vez que la fuerza deja de actuar. Con esta introducción se puede ir profundizando en lo que sucede a nivel molecular en la película, cuando ésta es sometida a una carga de tensión.

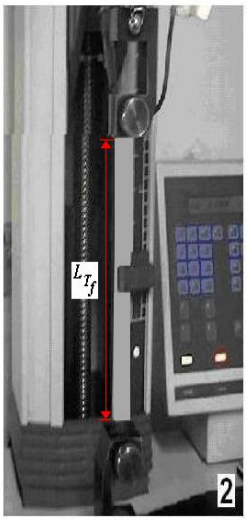
La razón por la cual una película que está siendo estirada en la región elástica, puede regresar a su longitud o estado original, está en los enlaces que forman a las macromoléculas. La siguiente figura muestra lo que sucede en los enlaces que forman a las macromoléculas, cuando la película está siendo estirada en la región elástica.

Como se puede observar, la Figura 2.58 muestra la extensión de los enlaces que forman a la macromolécula, también llamados ***enlaces principales*** y los cuales existen por las fuerzas de valencia principal, que son las fuerzas de atracción entre los átomos de Carbono que forman parte de la macromolécula de HDPE. Estas fuerzas son las que no permiten que en la cadena, en este caso de HDPE, se anulen los enlaces principales de sus átomos, no sólo en la región elástica, también en la región plástica.



1) Tira de HDPE sin estirar





2) Tira de HDPE estirada hasta su límite elástico

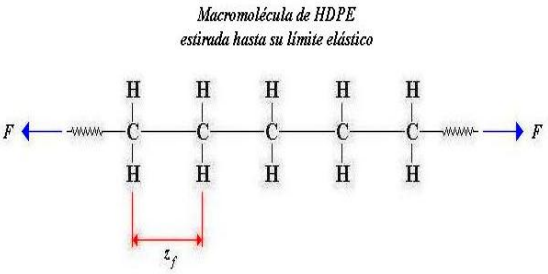


FIGURA 2.58 ELONGACIÓN EN REGIÓN ELÁSTICA

Lo que sucede en la región elástica, cuando una película es sometida a tensión, es que la distancia original entre los átomos de Carbono (z) aumenta, pero las fuerzas de valencia principal

siguen actuando, aumentando la intensidad de ellas a medida que se extiende el enlace principal. Es por esto que la máquina de tensión tiene que ir aumentando la fuerza con que las mordazas someten a tensión a la película.

Cuando la película que está siendo estirada, llega a su límite de fluencia o elástico, la extensión de los enlaces principales también llega a su límite (z_f); estos enlaces ya no pueden extenderse más, por lo que la macromolécula ya no sufre elongación por la extensión de sus enlaces principales.

Una vez que la extensión de los enlaces principales llega a su límite, las fuerzas de atracción entre los átomos de Carbono siguen actuando de manera eficaz, manteniendo los enlaces principales, o sea, no dejando que se rompan estos enlaces aunque se siga aumentando la fuerza de tensión.

Es por esto que la elongación en la región elástica puede desaparecer, ya que al no haber ruptura de los enlaces principales, la energía almacenada en ellos por la aplicación de la carga mecánica, puede disiparse a través del acercamiento o reposición de los átomos de carbono, cuando la carga mecánica deja de actuar.

Con lo explicado en el anterior párrafo, se puede concluir que los enlaces principales funcionan como pequeños resortes, los cuales absorben la energía transmitida por la carga mecánica, hasta el punto en que ya no pueden ser estirados más.

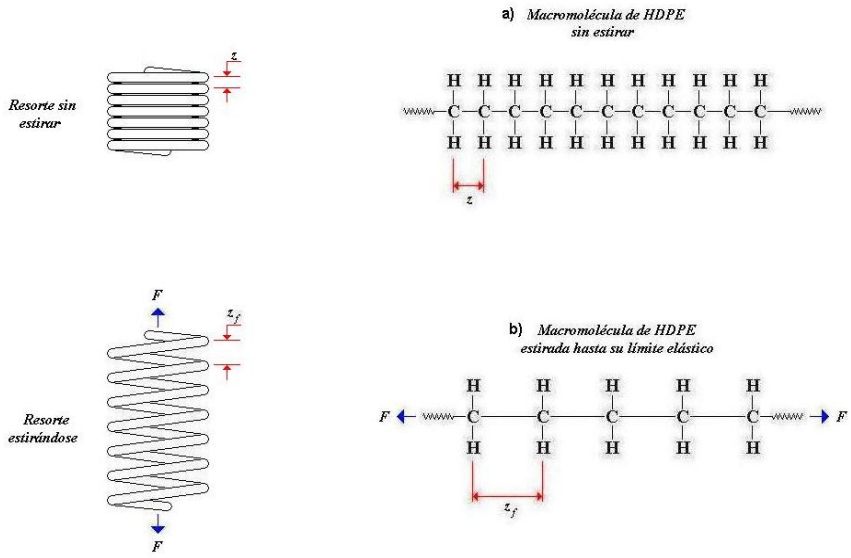


FIGURA 2.59 ANALOGÍA ENTRE EL ENLACE PRINCIPAL Y EL RESORTE MECÁNICO

La Figura 2.59 nos enseña la manera en que se da la analogía entre un resorte mecánico y el enlace principal de una cadena de HDPE. El resorte mecánico tiene sus dimensiones originales, cuando se muestra en la figura el ***resorte sin estirar***, siendo análogo a la cadena de ***HDPE sin estirar***, es decir, ambos ejemplos conservan sus dimensiones originales cuando no se ha aplicado una carga mecánica sobre ellos.

La longitud original del enlace principal es z, lo que sería análogo al espacio original entre dos espiras continuas del resorte. Cuando sobre el resorte actúa una carga mecánica, en este caso de tensión, éste se empieza a estirar y con ello se extiende el especio entre dos espiras continuas del resorte hasta que se llega al límite elástico del resorte mecánico.

El proceso para que el resorte mecánico llegue hasta su límite elástico, es análogo al proceso para que la cadena de HDPE llegue hasta su límite elástico, en ambos ejemplos se aplica una carga mecánica de tensión hasta que, tanto el enlace principal como el espacio entre espiras, llega a su extensión máxima producida por la elongación elástica. La extensión máxima del enlace principal se identifica con z_f, lo que sería análogo a la extensión máxima del espacio entre espiras en la región elástica del resorte, como lo muestra la Figura 2.59.

El resorte, cuando se estira o se comprime, absorbe energía, la cual, una vez que cesa de actuar la carga sobre el resorte, se disipa a través de la reposición del resorte a su estado original. Vale la pena acotar, que mientras más se estira o se comprime un resorte mecánico, mayor es la resistencia del resorte a estirarse o comprimirse, o sea, mayor es la fuerza que se tiene

que ejercer sobre el resorte cuando más se lo quiere estirar o comprimir; esto se debe a la energía que el resorte va absorbiendo en su proceso de estiramiento o compresión, esta energía la utiliza el resorte para llegar a su dimensión original, o sea, mientras más se estira el resorte, mayor energía tiene para volver a su dimensión original, lo que equivale a decir que mayor energía tiene para resistirse a la fuerza de compresión.

Así mismo, como el resorte, se comportan los enlaces principales de una cadena de HDPE, mientras más se los quiera extender, más se resisten a extenderse. Esto quiere decir que al estirar una película en la región elástica, mientras más se la quiera estirar, más fuerza de tensión hay que ejercer, ya que los enlaces principales más se resisten a extenderse.

Los enlaces principales también absorberán la energía transmitida por la fuerza de tensión, ya que al dejar de actuar la carga de tensión, los enlaces principales disipan esta energía a través de su reposición, es decir, los enlaces principales utilizan la energía absorbida para volver a su longitud original, una vez que la carga de tensión deja de actuar sobre la película.

La analogía entre el resorte y los enlaces principales, conduce a ver la razón por la cual el esfuerzo de tensión aumenta a medida que aumenta la elongación de la película en la región elástica de la curva de esfuerzo - deformación de la misma. El aumento del esfuerzo de tensión con el aumento de la elongación en la región elástica, es una de las características de las curvas de esfuerzo – deformación, por la cual se ha ahondado en el campo molecular, para encontrar así la razón de dicha característica.

En la región elástica, la razón por la cual aumenta el esfuerzo de tensión, al aumentar la elongación, radica en la capacidad que tienen los enlaces principales de una cadena de HDPE, para absorber energía en su proceso de estiramiento.

Lo que se ha explicado en el campo molecular, acerca del estiramiento de una película en la región elástica, se expresa en la película de manera visible para un ser humano, en la longitud de la tira de HDPE que se está estirando en la Figura 2.58.

Cuando la tira no está siendo estirada, tiene una longitud original, a la cual se la ha denotado como $\boldsymbol{L_{To}}$, lo que significa ***Longitud Original de la Tira***; esta longitud, al ser estirada la tira

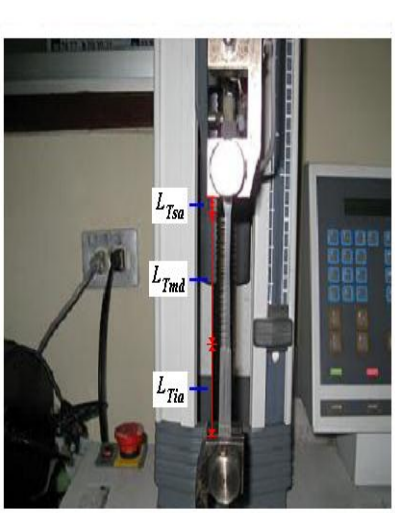
en la región elástica, aumenta hasta llegar a $\boldsymbol{L_{Tf}}$, que significa ***Longitud de la Tira en el límite de Fluencia*.**

Este aumento en la longitud de la tira equivale a lo que sucede a nivel molecular en la tira: cuando la tira tiene su longitud original ($\boldsymbol{L_{To}}$), la distancia del enlace principal es $\boldsymbol{z}$; en cambio, cuando la máquina de tensión estira la tira hasta su límite de fluencia ó elástico, la longitud de la tira aumenta hasta $\boldsymbol{L_{Tf}}$, lo que equivale a nivel molecular que los enlaces principales se hayan extendido desde $\boldsymbol{z}$ hasta $\boldsymbol{z_f}$.

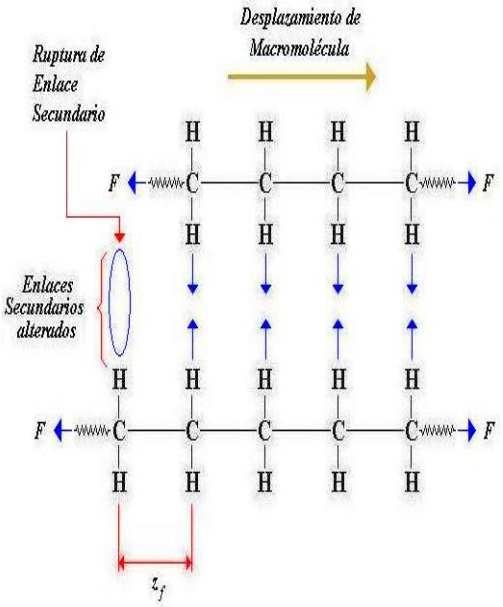
Si se sigue estirando la película más allá del límite de fluencia, la película seguirá sufriendo elongación, la cual ya no se deberá a la extensión de los enlaces principales, ahora se deberá al desplazamiento que existe entre las macromoléculas de la estructura molecular. El desplazamiento que existe entre macromoléculas, va rompiendo enlaces secundarios, lo cual permite que la película siga sufriendo elongación después de la que ha sufrido en la región elástica; es decir, el hecho de que los enlaces secundarios lleguen a ser menos fuertes que los enlaces **principales (*desde que la película llega al límite de fluencia*),** permite que la película siga sufriendo elongación una

vez que ésta ha llegado al límite de fluencia, o sea, permite que la película tenga una región plástica.

Dos macromoléculas que se desplazan entre sí por medio de una carga mecánica, rompiendo un enlace o algunos enlaces secundarios entre ellas, no pueden regresar a la misma posición que tenían antes de desplazarse, esto significa que el enlace o los enlaces secundarios que se rompieron entre estas macromoléculas, ya no se pueden restablecer, lo cual explica la razón por la cual la elongación en la región plástica no puede desaparecer una vez que deja de actuar la carga de tensión sobre la película. La siguiente figura muestra de manera gráfica la elongación de una película en la región plástica:



1) Inicio de Deformación Plástica



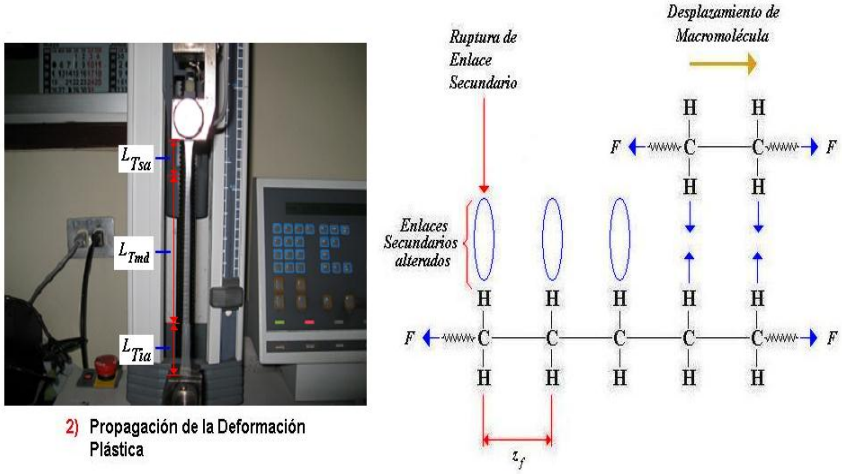


FIGURA 2.60 ELONGACIÓN EN REGIÓN PLÁSTICA

La Figura 2.60 muestra lo que pasa a nivel molecular cuando la película está sufriendo elongación en la región plástica y que la película sufre la permanecería en ella, una vez que la fuerza de tensión deje de actuar, lo cual confirmaría que el proceso de elongación de la película, en la región plástica, no es reversible; esto también confirmaría que el proceso de ruptura de los enlaces secundarios no es reversible.

En realidad, los enlaces secundarios que se rompen por medio de una carga mecánica, ya no pueden restablecerse a través de la misma, la única forma de restablecerlos sería por medio de un proceso termo – mecánico, es decir, fundir la película para transformarla en materia prima que pueda volver a procesarse en la extrusora de película soplada.

Lo que se ha explicado a nivel molecular, en la Figura 2.60, se expresa de manera visible, para un ser humano, en la deformación que sufre la tira. Se puede observar que la tira, al iniciar su deformación o su elongación en la región plástica por medio de la máquina de tensión, tiene tres longitudes a lo largo de ella, estas son: $\boldsymbol{L_{Tsa}}$, $\boldsymbol{L_{Tmd}}$ y $\boldsymbol{L_{Tia}}$.

Estas longitudes cambian a medida que se propaga la elongación en la región plástica, se puede notar a simple vista, en la Figura 2.60, que las dos primeras longitudes ($\boldsymbol{L_{Tsa}}$ y $\boldsymbol{L_{Tmd}}$) se han incrementado desde el inicio de la deformación plástica, hasta la propagación de dicha deformación, lo cual equivale a que al inicio de la deformación plástica haya pocas rupturas de enlaces secundarios, en relación a la cantidad de rupturas que hay en la propagación de la deformación plástica de la tira.

Es necesario detallar lo que significa la denotación que se le ha dado a las tres longitudes de la tira: $\boldsymbol{L_{Tsa}}$ significa ***Longitud Superior Ancha de la Tira***, $\boldsymbol{L_{Tmd}}$ significa ***Longitud Media Delgada de la Tira***, y, $\boldsymbol{L_{Tia}}$ significa ***Longitud Inferior Ancha de la Tira***.

A continuación, se muestra una película de HDPE en buen estado, la cual se somete a tensión manualmente hasta llegar a deformarla plásticamente:

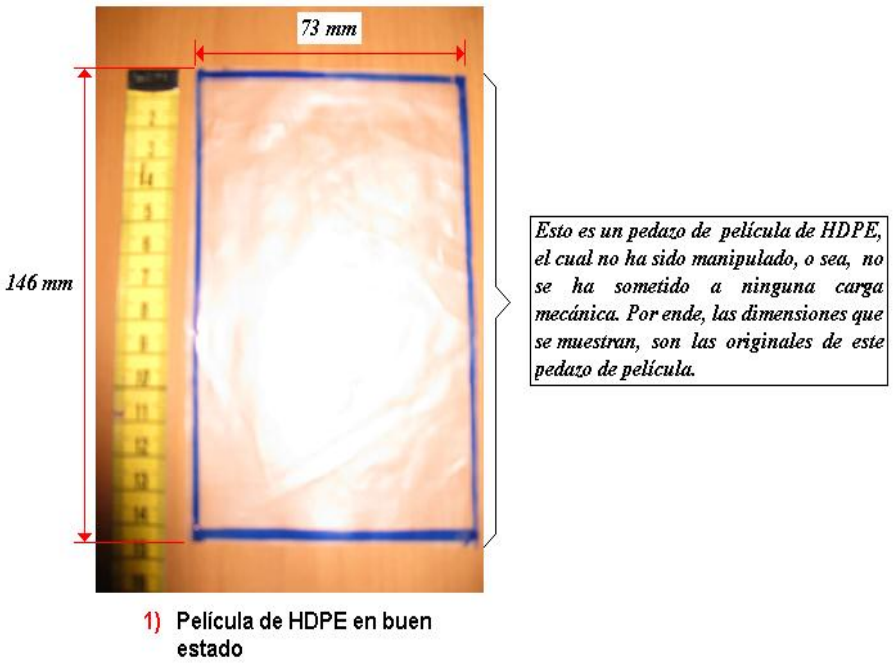


FIGURA 2.61 PELICULA DE HDPE EN BUEN ESTADO

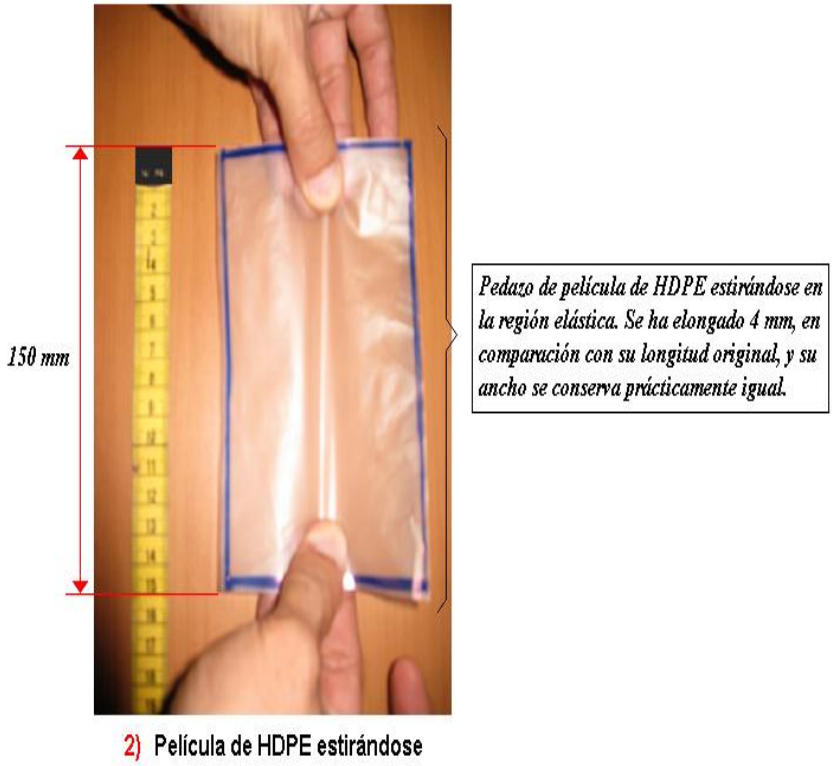


FIGURA 2.62 PELÌCULA ESTIRÀNDOSE

FIGURA 2.63 PELÌCULA DE HDPE LUEGO DE ESTIRARSE ELÀSTICAMENTE

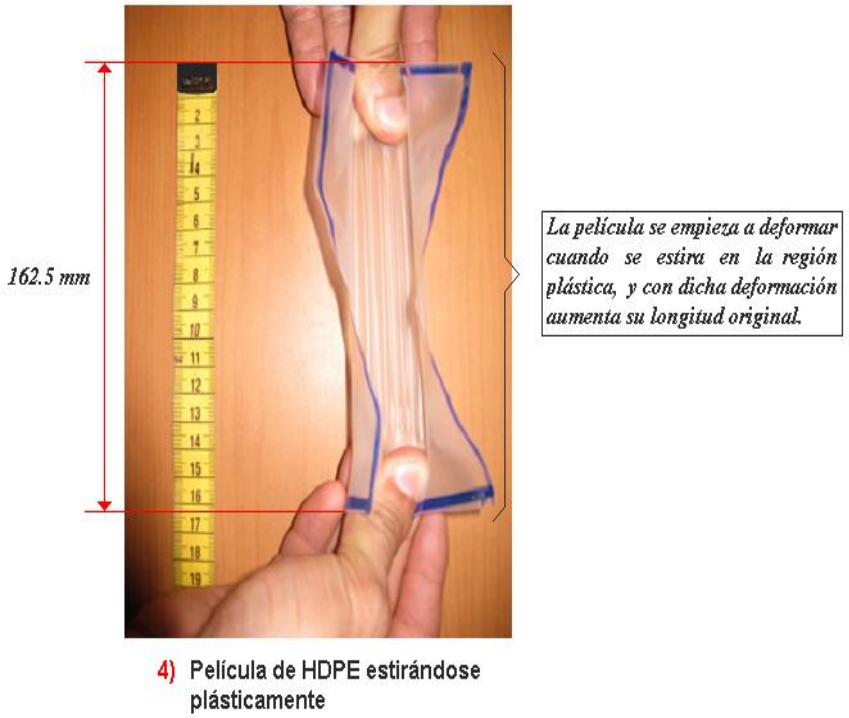


FIGURA 2.64 PELÌCULA DE HDPE ESTIRÀNDOSE PL

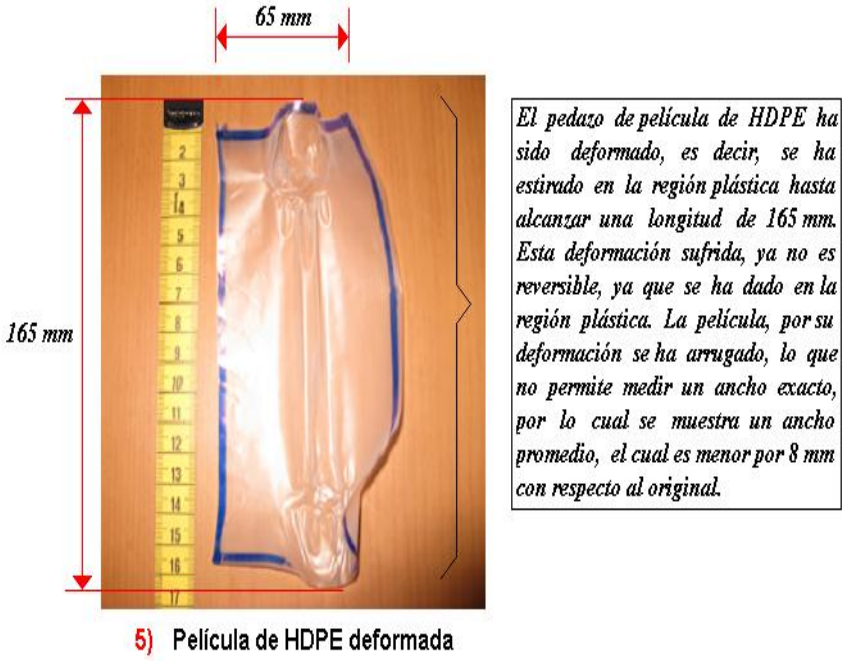


FIGURA 2.65 DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE PELÍCULA

La Figura 2.65 confirma que la deformación plástica de una película no es reversible, una vez que la carga mecánica deja de actuar en ella. Así mismo, confirma que si la fuerza de tensión aplicada en la película, deja de actuar en la misma dentro de la región elástica, la película volverá a sus dimensiones originales, ya sea de manera visible para un ser humano, como a nivel molecular.

Con la Figura 2.65, se confirma la teoría de la deformación elástica y de la deformación plástica, cuya comprensión es importante para entender claramente el proceso de

deformación de una película en ambas regiones (elástica y plástica), a través de una carga mecánica.

Para conocer la razón de las características de las películas en sus procesos de esfuerzo – deformación en la región plástica, más adelante se las podrá apreciar en la siguiente figura.

La Figura 2.62 muestra las etapas características que generalmente aparecen en una curva de esfuerzo – deformación de una película, en dichas etapas se desarrollan tres procesos de tensión - deformación diferente, los cuales se explicarán en los siguientes párrafos.

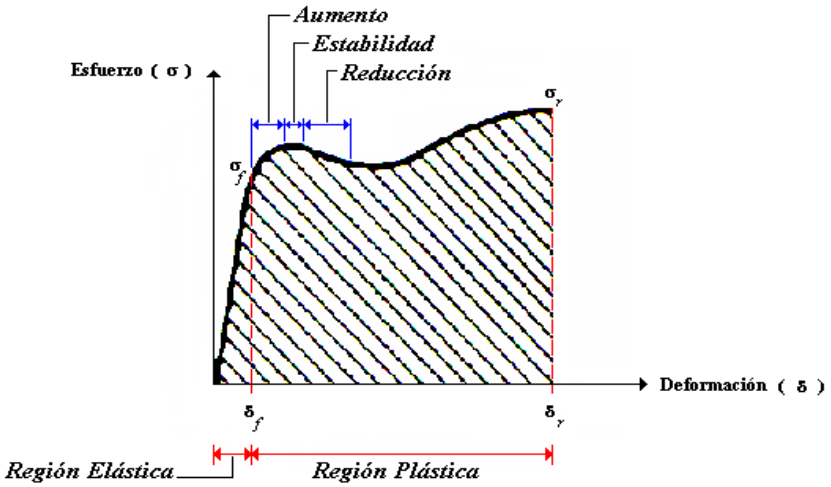
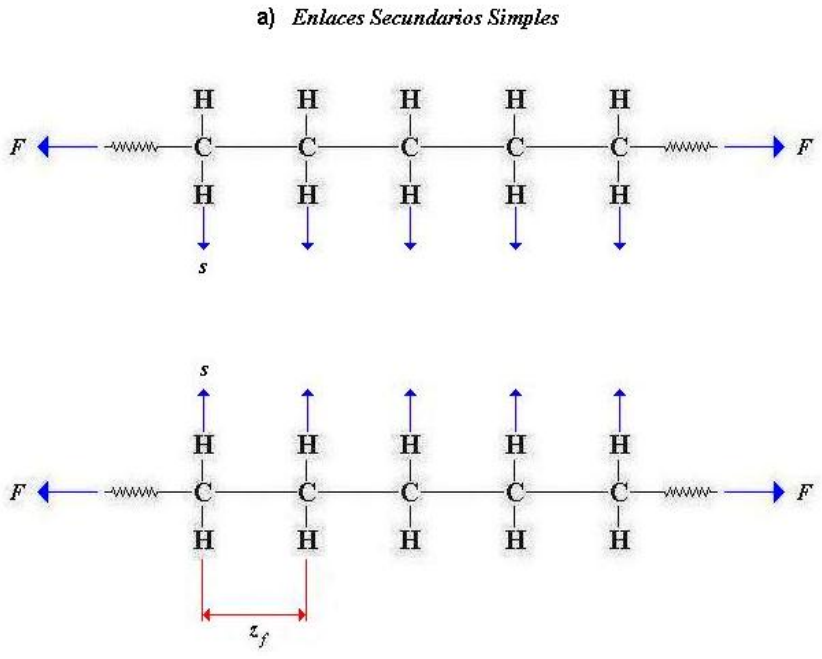


FIGURA 2.66 ETAPAS DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

En la etapa ***Aumento***, se eleva de manera gradual el esfuerzo de tensión, a medida que crece la deformación o elongación de

la película. En la Figura 2.63, (parte a), se observa el límite elástico de la curva de esfuerzo – deformación, o sea, el inicio de la región plástica.

Como en el límite elástico se llega a la máxima extensión de los enlaces principales, sin haber algún desplazamiento entre macromoléculas; al haber la máxima extensión de los enlaces principales, éstos han llegado a su capacidad máxima de absorción de energía, volviéndose más fuertes que los enlaces secundarios.



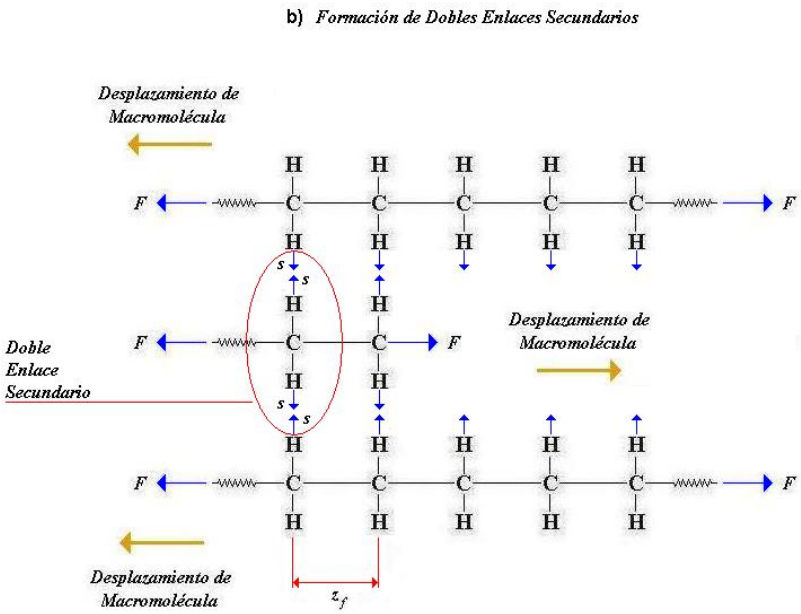


FIGURA 2.67 ETAPA DE AUMENTO

Si se quiere seguir estirando la película, habrá que aumentar la carga de tensión, lo cual causará que se rompan los enlaces secundarios sencillos que existe entre macromoléculas, ya que estos enlaces se vuelven débiles en comparación con los enlaces principales, una vez que se llega al límite elástico; la ruptura de los enlaces secundarios, causará a su vez un desplazamiento entre macromoléculas, permitiendo así que la película sufra elongación.

Al desplazarse las macromoléculas entre sí, se cruzarán con otras macromoléculas, formando nuevos enlaces secundarios

entre ellas, la parte b) de la Figura 2.63 es una muestra de aquello.

En la etapa de aumento, se puede notar que el cruce entre macromoléculas, se da de tal manera que los enlaces sencillos se empiezan a convertir en enlaces dobles, lo cual fortalece al enlace secundario y así se obliga a aumentar la carga de tensión para que la película siga sufriendo elongación.

Mientras la película sigue sufriendo elongación, se forman nuevos enlaces dobles, como lo muestra la parte b) de la Figura 2.66, esto obliga a seguir aumentando la carga de tensión para que la película siga sufriendo elongación; el proceso de aumentar la carga de tensión para que la película siga sufriendo elongación, continúa mientras se forman nuevos enlaces dobles, lo que conduce a la curva en la etapa de aumento.

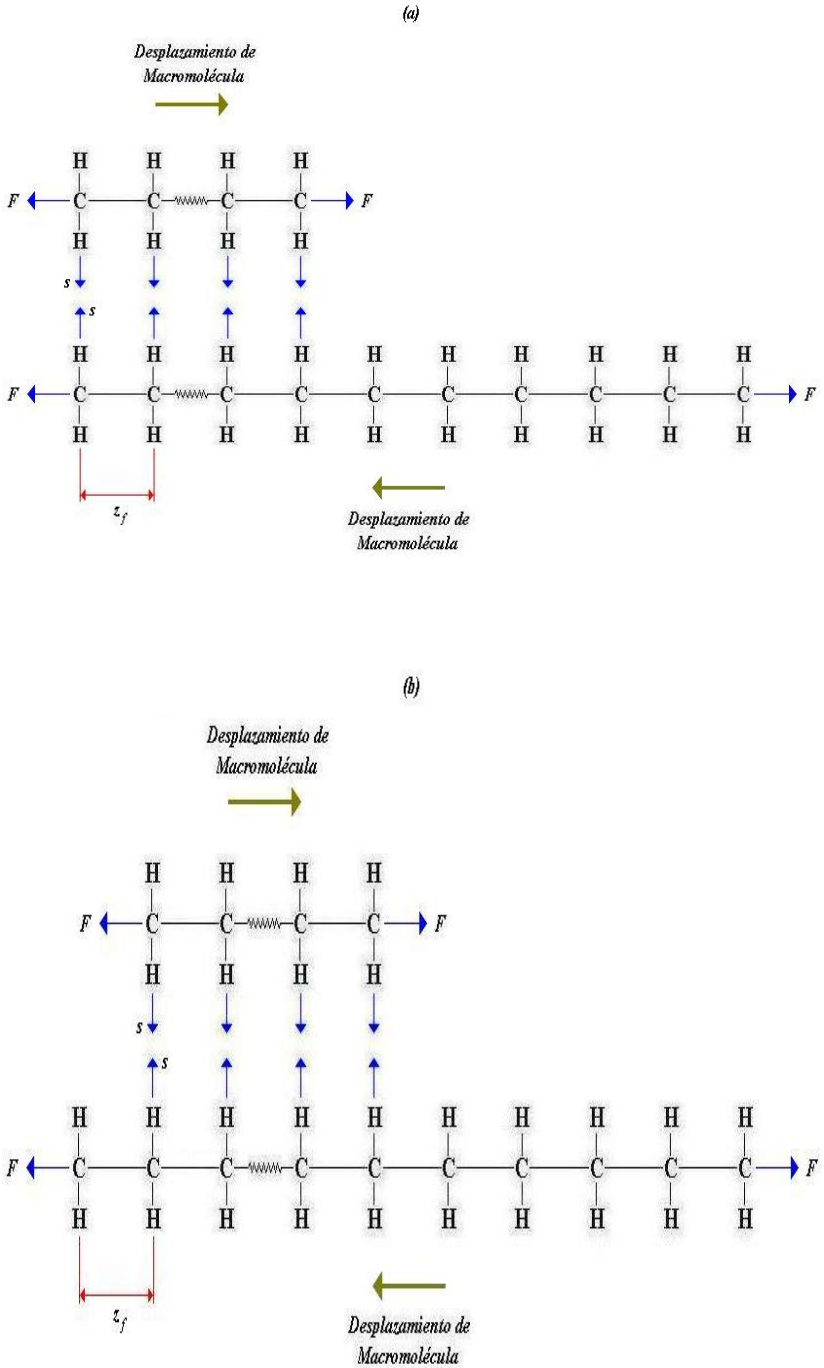
También es necesario acotar que los enlaces dobles que se forman, no sólo son más fuertes que los enlaces sencillos por el hecho de ser 2 enlaces, también lo son por el hecho de que los átomos de Hidrógeno se encuentran más cercanos, lo cual fortalece a cada uno de los enlaces secundarios que forman el enlace doble.

En la parte b) de la Figura 2.66, se puede observar la diferencia que existe entre los enlaces secundarios dobles y los enlaces secundarios simples, esta parte de la figura confirma que la diferencia no sólo está en el número de enlaces secundarios que existe entre cada par de átomos de Hidrógeno que se forman entre las macromoléculas que se desplazan hacia la izquierda, la diferencia también está por la cercanía que existe entre los átomos de Hidrógeno, éstos se muestran más cercanos en los enlaces dobles.

Luego de la etapa de aumento, viene la etapa de ***Estabilidad***, la cual se caracteriza por la deformación o elongación que sufre la película, sin que la carga de tensión varíe. La razón por la cual la película sufre elongación por la acción de un esfuerzo constante, radica en lo que sucede en la estructura molecular, en el proceso de tensión –deformación de la película; la Figura 2.67 muestra lo que sucede en la estructura molecular al llevarse a cabo el proceso de tensión – deformación en la etapa de estabilidad.

La Figura 2.67 se observa el desplazamiento entre dos macromoléculas de diferente tamaño y la macromolécula

pequeña conserva la misma cantidad de enlaces secundarios a medida que se desplaza sobre la macromolécula más grande.



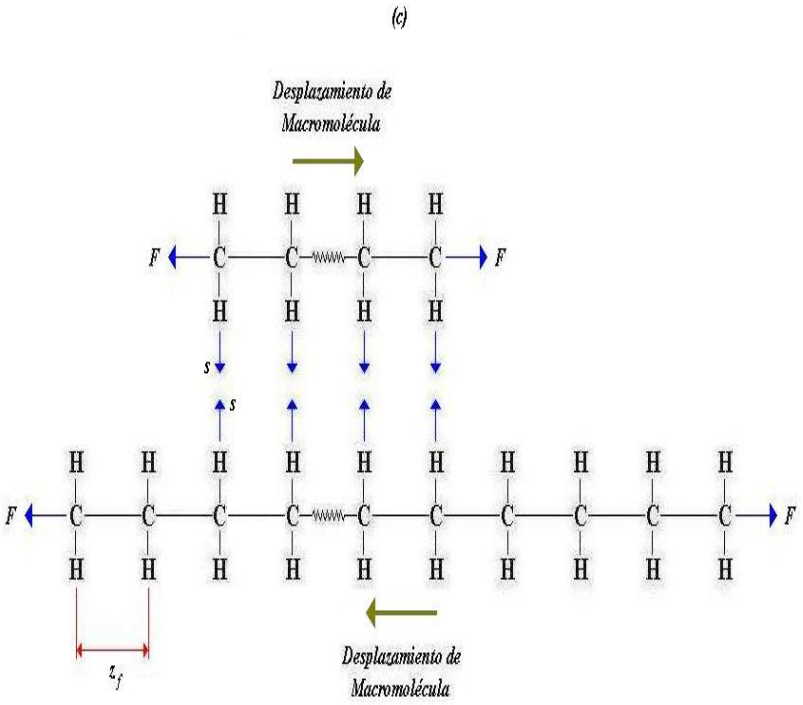
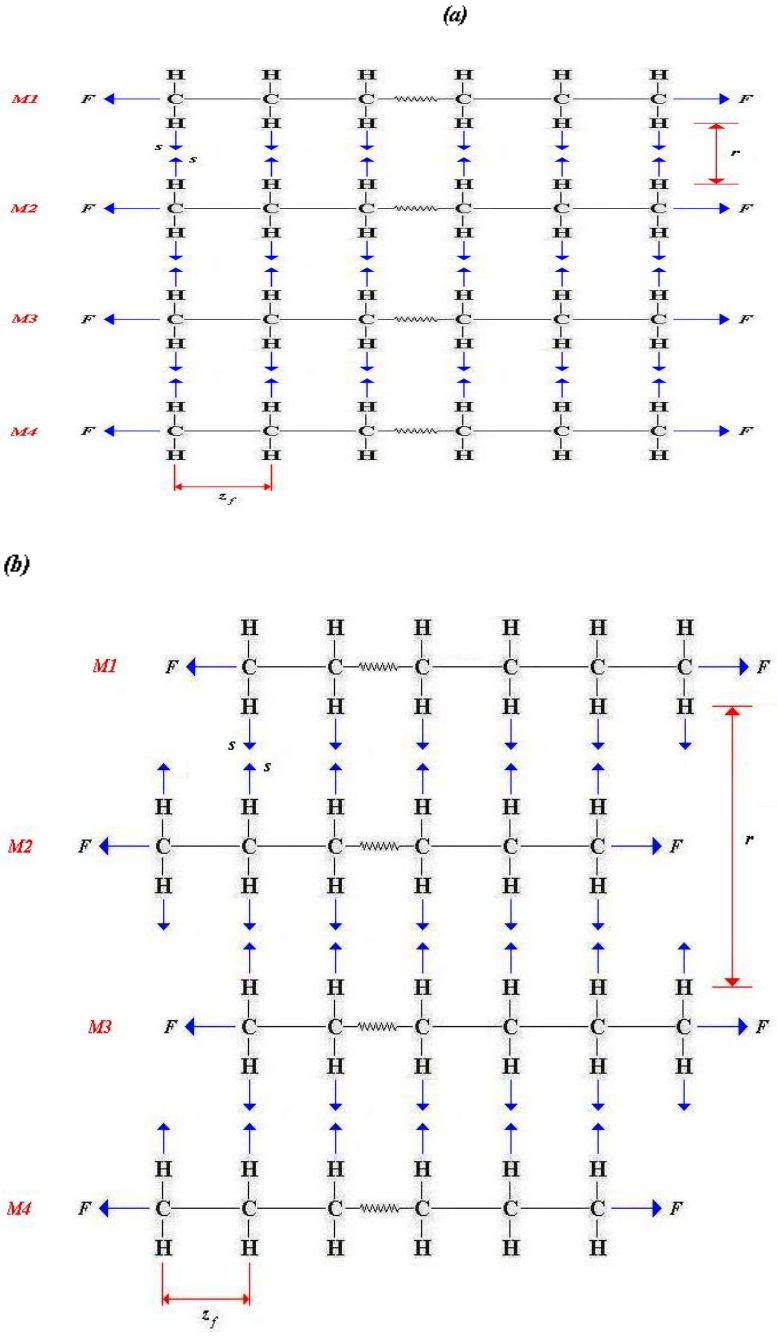


FIGURA 2.68 ETAPA DE ESTABILIDAD

El hecho de que se mantenga la misma cantidad de enlaces secundarios a medida que ocurre desplazamiento entre las macromoléculas, significa que se ejerce la misma fuerza o esfuerzo de tensión sobre la película, para que sus macromoléculas se desplacen entre sí y así la película sufra elongación.

Al terminar la ***etapa de estabilidad***, se entra en la ***Etapa de Reducción***, la cual se caracteriza por la disminución del esfuerzo de tensión a medida que la película sufre elongación.

Así mismo, como en las demás etapas características, la razón por la cual existe la etapa de reducción está en la estructura molecular, dicha razón se muestra en la siguiente figura:



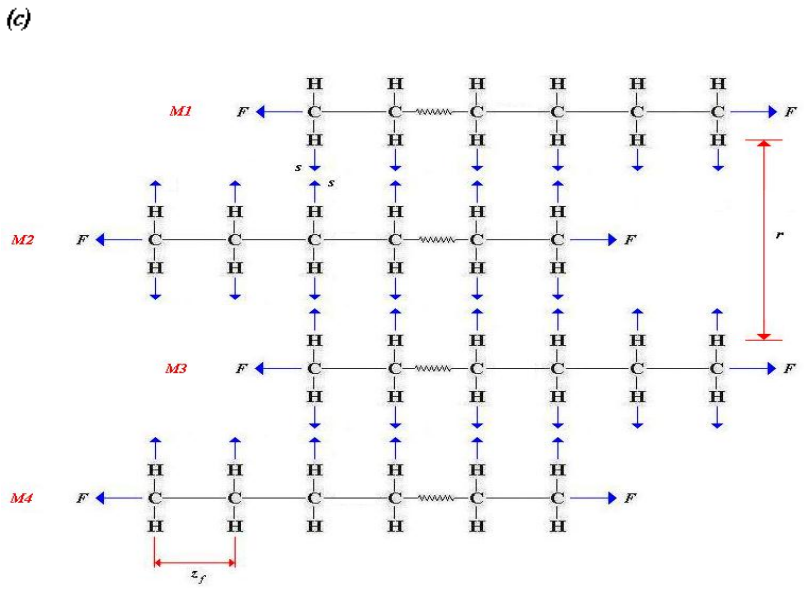


FIGURA 2.69 ETAPA DE REDUCCIÓN

La Figura 2.68 muestra gradualmente el desplazamiento entre macromoléculas que se da en la etapa de reducción, este desplazamiento se caracteriza por reemplazar los enlaces secundarios rotos con enlaces secundarios débiles. La figura muestra 4 moléculas, ***M1***, ***M2***, ***M3*** y ***M4***, las cuatro moléculas tienen enlaces secundarios sencillos entre ellas y están sometidas a una carga de tensión F en el literal ***(a)***; al seguir actuando la carga de tensión, las macromoléculas se desplazarán entre sí, una con respecto a otra, y empezarán a romperse los enlaces secundarios que hay entre ellas, como se observa en el literal ***(b)*** de la figura.

Al empezar a romperse los enlaces secundarios, se forman nuevos enlaces, los cuales son más débiles que los que se rompieron, ya que los nuevos enlaces se forman entre átomos de Hidrógeno que se encuentran más distantes; esta es la razón por la cual existe la etapa de reducción, *la* ***formación de enlaces secundarios más débiles***.

Los enlaces secundarios que se muestran en el literal *(a)* de la Figura 2.68, se dan entre átomos de Hidrógeno que se encuentran a una distancia ***r***; al desplazarse la macromolécula *M1* con respecto a la macromolécula *M2*, hay ruptura del enlace secundario que había en el extremo izquierdo entre estas dos macromoléculas.

Una vez que hay ruptura de este enlace que se encontraba en el extremo izquierdo entre estas dos macromoléculas, el átomo de Hidrógeno que se encuentra en el extremo derecho de la macromolécula *M1*, forma un nuevo enlace secundario con el átomo de Hidrógeno en el extremo derecho de la macromolécula *M3*, el cual es débil con respecto al enlace secundario que se rompió entre *M1* y *M2* en el extremo izquierdo, ya que la distancia entre los átomos de Hidrógeno del

enlace que se rompió, es menor que la distancia entre los átomos de Hidrógeno del nuevo enlace.

Se puede observar que la distancia r entre átomos de Hidrógeno es mayor en los nuevos enlaces que en los enlaces que se rompen, de acuerdo a lo explicado en los dos párrafos anteriores, se nota que mientras mayor sea r, menor es la fuerza s del enlace secundario. Mientras menor es la fuerza del enlace secundario, más débil es el enlace secundario, por lo que se necesitará una menor carga de tensión para romper los enlaces secundarios, de esta manera se produce desplazamiento entre macromoléculas y así existe la elongación en la película.

Ahora que ya se han explicado las características de la curva de esfuerzo – deformación de una película, tanto en la región elástica como en la región plástica, se ha logrado ahondar en la estructura molecular del polietileno de alta densidad y en su comportamiento cuando es sometido a una carga de tensión.

Mediante las curvas de esfuerzo – deformación de las películas, no sólo se puede obtener información importante acerca de las condiciones de procesamiento y de la propiedad de tensión de las películas, sino también información importante acerca de

otras propiedades, como la barrera contra el vapor de agua y la resistencia al impacto; las curvas de esfuerzo – deformación que puede llevar a tener una idea cualitativa acerca de la barrera contra el vapor de agua y la resistencia al impacto que tienen las películas, comparando las curvas entre sí.

Con respecto a la transmisión de vapor de agua, se puede decir que las curvas características con mayor dureza representan a las películas con la mayor resistencia a la transmisión de vapor de agua, como es el caso de las curvas **b)** y **d)**. La razón por la cual se llega a esta conclusión, radica en la cristalinidad de la película, ya que la alta resistencia a la tracción de una película está dada por la alta intensidad de halado a sus macromoléculas, lo cual origina un buen orden en su estructura molecular, que es lo que aparte de darle una buena resistencia a la tracción, le da una buena resistencia a la transmisión de vapor de agua.

Con respecto a la resistencia al impacto, se puede notar que la película con la curva de mayor tenacidad (**d)**), es la que tiene mayor resistencia al impacto, ya que al tener mayor área bajo su curva, la película tiene mayor capacidad de deformarse o de absorber la energía que trae consigo la carga de impacto.

La carga de impacto es también una carga mecánica, ya que es una fuerza que produce elongación en la película, porque al producirse el choque entre la carga de impacto y la película, ésta empieza a deformarse por la fuerza que transmite la carga.

La fuerza de impacto que se transmite a la película, se transmite a la estructura molecular de la misma, por lo cual, la fuerza de impacto realiza trabajo sobre la estructura molecular, extendiendo los enlaces principales mientras no se ha llegado al límite elástico, y desplazando las cadenas luego del límite elástico de la película.

Para establecer el valor numérico de la energía que puede absorber una película hasta el punto de ruptura de la misma, se establecerá el valor numérico de la tenacidad, el cual es igual al área bajo la curva de esfuerzo - deformación:

$$Tenacidad = \frac{\sigma_f \delta_f}{2} + \int_{\delta_f}^{\delta_r} \sigma \partial \delta \qquad \textbf{Ecuación 2.7}$$

La Ecuación 2.7 confirma que la tenacidad es el área bajo la curva de esfuerzo – deformación, curva que consta de dos áreas bajo ella: ***área elástica*** **y** ***área plástica****.*

El ***área elástica*** se encuentra dentro de la región elástica de la película, dicha área tiene forma de un triángulo, razón por la cual el primer término de la Ecuación 2.7 tiene esa denotación:

$$\frac{\sigma_f \delta_f}{2}$$

El ***área plástica*** se encuentra dentro de la región plástica de la película, región que es irregular, razón por la cual el segundo término de la Ecuación 2.7 se ha denotado con una integral:

$$\int_{\delta_f}^{\delta_r} \sigma \partial \delta$$

Como es obvio, el área bajo la curva de esfuerzo – deformación es la suma del área elástica y el área plástica, las cuales se ha identificado en los párrafos anteriores. Esto quiere decir que la tenacidad de una película está ponderada por la suma de estas dos áreas, elástica y plástica.

La energía que puede absorber un pedazo de prueba de una película, hasta su punto de ruptura, se la va a señalar mediante la siguiente notación: ***Energía*** la cual es igual al trabajo que la carga mecánica realiza sobre este pedazo de prueba de la película, hasta su punto de ruptura. El trabajo del cual se está hablando se lo denota de la siguiente manera: ***Trabajo*** y consiste en la extensión de los enlaces principales y el

desplazamiento entre moléculas por la acción de la carga mecánica hasta el punto de ruptura de la película.

El trabajo que la carga mecánica realiza sobre la tira de la película que se somete a tensión, para cada instante, es igual al producto entre la fuerza de tensión y la elongación que sufre la tira en cada instante. La máquina de ensayo de tracción y elongación sirve para establecer el trabajo que la carga de tensión realiza sobre la tira de la película, dicho trabajo es igual a la energía que la tira absorbe de la carga de tensión que actúa sobre ella.

Para calcular el trabajo que la carga de tensión realiza sobre la tira hasta su punto de ruptura, se debe multiplicar el área transversal de la tira por la tenacidad de la película, la siguiente ecuación demuestra lo explicado:

$$Trabajo_{rt} = A \times Tenacidad \quad \textbf{Ecuación 2.8}$$

Donde:

- ✓ ***Trabajo***$_{:}$ es el que realiza la carga de tensión hasta el punto de ruptura de la tira;
- ✓ A es el área transversal de la tira.

El trabajo que muestra la Ecuación 2.8 es igual a la energía que absorbe la tira de la película al ser tensionada hasta su punto de ruptura, o sea, es igual a ***Energía***.

Como se verá más adelante, el esfuerzo de tensión que se forma en la película es igual a la fuerza de tensión que actúa sobre la tira, dividida para el área transversal de la tira, área cuya denotación, según la Ecuación 2.8, es A. Este esfuerzo de tensión que se forma en la película, es el mismo en cada unidad de área transversal de la película, independientemente de las dimensiones de la tira de prueba.

Como se observa en la Ecuación 2.7, la ***Tenacidad*** se calcula mediante el esfuerzo, no mediante la fuerza, razón por la cual la tenacidad permite tener una idea global acerca de la resistencia mecánica de la película, ya que esta propiedad intrínseca de la película se mide por unidad de área, o sea, la tenacidad que se obtiene de la curva de esfuerzo – deformación, es la misma en cada unidad de área transversal de la película, independientemente de las dimensiones de la tira de prueba.

Al despejar la ***Tenacidad*** en la Ecuación 2.8, esta propiedad intrínseca de la película es igual al trabajo por unidad de área transversal de la película, que la carga de tensión realiza sobre

la misma; así mismo se puede ver que la tenacidad es igual a la energía por unidad de área transversal de la película, que la estructura molecular de la misma absorbe al ser tensionada. Es decir, este trabajo o energía por unidad de área, es el mismo en cada unidad de área transversal de la película, independientemente de las dimensiones de la tira de prueba.

No se pudiera tener una idea global acerca de la resistencia a la tensión de la película, si sólo se utilizara la fuerza para identificar dicha resistencia, ya que la fuerza actúa sobre un área específica de la película, la que puede cambiar y con ello cambiaría la fuerza con la cual rompe la película, lo cual no daría un valor cierto de la resistencia de la película.

En cambio, el esfuerzo de tensión se origina en cada unidad de área de la película, es decir, el esfuerzo de tensión con el cual rompe la tira es el mismo esfuerzo de tensión con el cual rompe la película en toda su extensión.

Como no se puede establecer cálculos seguros de resistencia de la película mediante la fuerza de tensión, tampoco se establece los cálculos seguros del trabajo que se debe realizar en la película hasta su punto de ruptura, por acción de dicha fuerza; por esta misma razón tampoco se tendría un valor cierto

acerca de la energía que absorbe la película hasta su punto de ruptura.

Esto conduce a establecer valores de resistencia a la tensión, trabajo y energía, en términos de unidad de área, o sea, la resistencia sería igual a la fuerza por unidad de área de la película y, el trabajo y la energía serían igual a la tenacidad de la película. Las siguientes ecuaciones muestran lo explicado:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A} \qquad \textbf{Ecuación 2.9}$$

Donde:

- ✓ F_r es la fuerza con la cual rompe la tira de prueba de la película;
- ✓ A es el área de acción de la fuerza.

$$Tenacidad = trabajo_{rt} = energía_{rt} \qquad \textbf{Ec. 2.10}$$

Donde:

- ✓ ***Trabajo***: es el trabajo por unidad de área transversal de la película, que la carga de tensión realiza sobre la misma hasta su punto de ruptura;
- ✓ ***Energía***: es la energía por unidad de área transversal de la película, que la misma absorbe hasta su punto de ruptura.

Una vez que se ha estudiado las curvas de esfuerzo–deformación, se puede notar la cantidad de información que se puede obtener de ellas, no sólo acerca de las propiedades mecánicas de la película, sino que también con respecto a las condiciones de procesamiento con las cuales se ha fabricado la película.

Ahora se establecerá el procedimiento a seguir para la realización del ensayo de tracción y elongación, apoyándose en la norma ASTM D-882.

Los requerimientos, para poder realizar el ensayo según la norma ASTM D-882, son los siguientes:

- ✓ Las condiciones ambientales del ensayo deben ser de 23 ºC y 50% de humedad relativa.

- ✓ Las muestras consisten en tiras uniformes, de al menos 50 mm más largas que la distancia entre mordazas, para esto es necesario saber que el largo de la tira tenga un máximo de 250 mm, aproximadamente.

- ✓ Las tiras que se someten al ensayo, tienen que ser obtenidas de ambas direcciones de la película, es decir, se cortarán a

lo largo de MD y de DT y necesitan ser cortadas con sumo cuidado, no poseer mordeduras o bordes rasgados. Se necesita que el corte sea uniforme, para esto se puede dejar hasta un 5% de error de paralelismo.

- ✓ Las tiras que se someten a ensayo, no deben tener imperfecciones a lo largo de su superficie, ya sean éstas: arrugas pronunciadas, rasgaduras o puntos donde haya concentración de esfuerzos. Si se desea obtener una comparación entre la resistencia a la tensión de una tira sin imperfecciones, con la resistencia a la tensión de una tira con imperfecciones. Es válida la prueba de tensión con una tira que tenga imperfecciones.

- ✓ El ancho de la tira está entre 5 mm y 25,4 mm, una tira más ancha minimiza el error de paralelismo que puede existir entre los bordes.

Nota: el paralelismo es importante para obtener datos fidedignos del ensayo de tracción y elongación. Mientras menos paralelismo haya entre los bordes de las tiras, menos fidedignos van a ser los datos, ya que es posible que se tome un área donde no actúan esfuerzos al someter la tira en

tensión. El siguiente esquema muestra de manera gráfica lo que se quiere explicar:

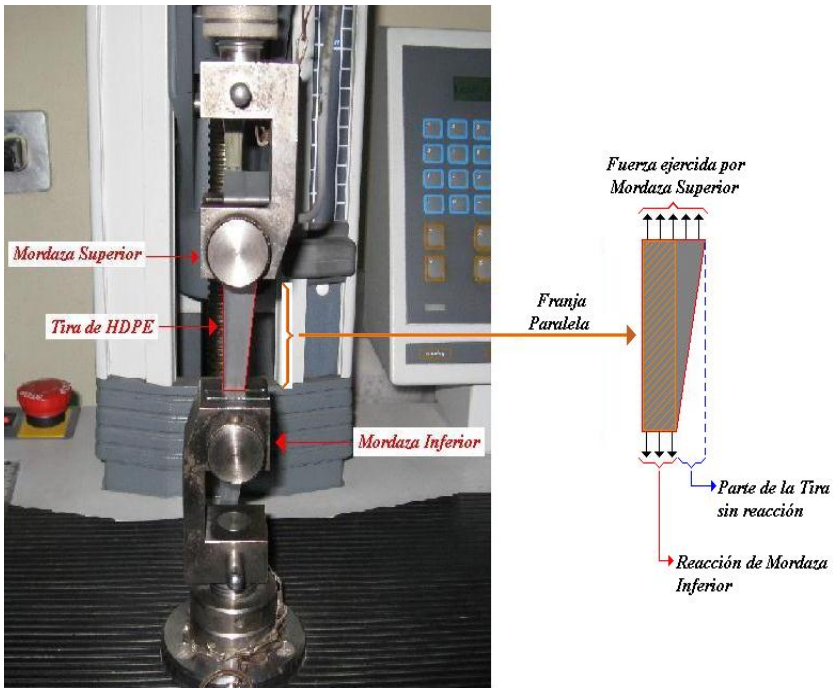


FIGURA 2.70 FALTA DE PARALELISMO

Se puede observar una franja paralela entre las mordazas, la cual se somete a tensión por medio de dichas mordazas. La parte de la tira que se encuentra fuera de la franja paralela, no se someterá a tensión, ya que para esta parte, no hay fuerza que reaccione a la acción del desplazamiento de la mordaza superior. En la franja que es sometida a tensión, se origina un esfuerzo, el cual actúa en el área transversal de dicha franja; el

esfuerzo que se origina en la franja paralela, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$ **Ecuación 2.11**

Donde:

- ✓ σ es el esfuerzo que se origina en la franja paralela;
- ✓ F es la fuerza con que las mordazas someten a tensión a la tira;
- ✓ A es el área transversal de la franja paralela, donde actúa el esfuerzo.

A continuación se realizará un corte a la tira de la Figura 2.70, para poder observar las dimensiones características del área transversal de la tira y la vista frontal del corte A-A´, las dimensiones características del área transversal promedio de la tira, donde:

- ✓ b_{T_p} es el ancho promedio de la tira;
- ✓ e es el espesor de la tira.

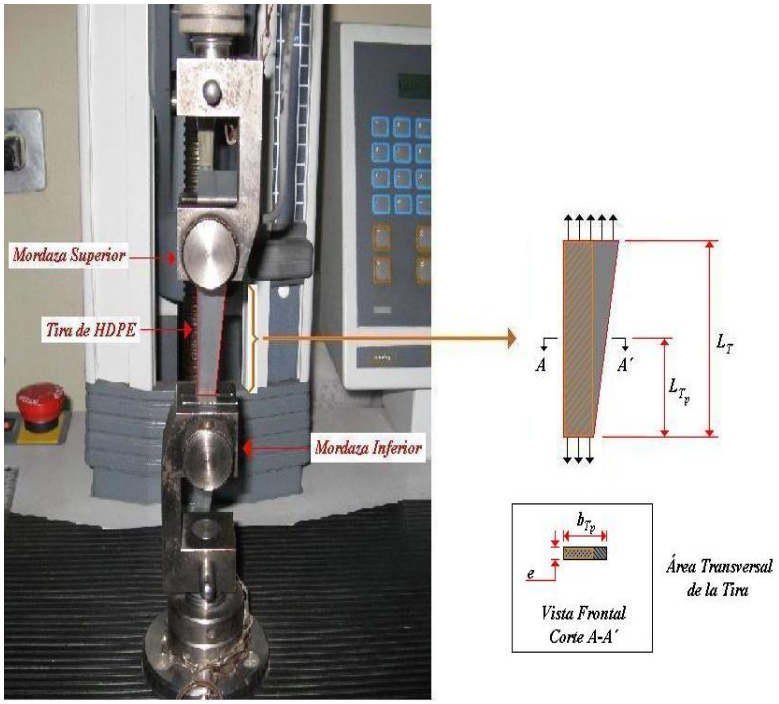


FIGURA 2.71 ÁREA TRANSVERSAL DE LA TIRA

Se dice que el área transversal observado en la Figura 2.70, es el área transversal promedio, porque se encuentra en la mitad del largo de la tira (L_{T_p}), por la misma razón, b_{T_p} es el ancho promedio de la tira. Si se toma el área transversal promedio, para fines de cálculo del esfuerzo, se va a obtener un dato no real del esfuerzo de tensión que actúa en la tira, ya que las fuerzas de tracción de las mordazas, no someten a tensión a la parte de la tira que se encuentra fuera de la franja paralela.

Para que el cálculo del esfuerzo de tensión que actúa en la tira, se debe ser exacto, para lo cual se necesita tomar el área donde actúa la fuerza de tracción de las mordazas, la que es el área transversal de la franja paralela. Las dimensiones características del área transversal de la franja paralela, se encuentran en la siguiente figura:

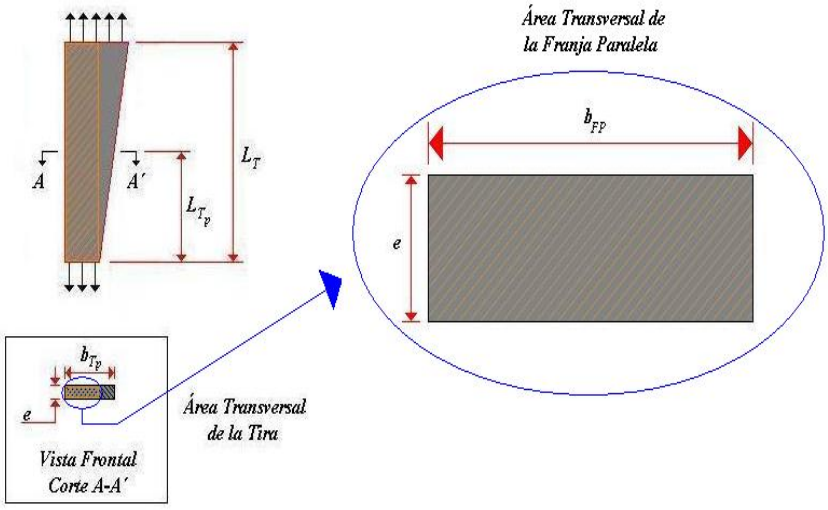


FIGURA 2.72 ÁREA TRANSVERSAL DE LA FRANJA PARALELA

Donde:

- ✓ b_{FP} es el ancho de la franja paralela;
- ✓ e es el espesor de la tira.

El espesor de la tira, e, es el espesor de la película, lo cual indica que el espesor juega un papel importante en la resistencia a la tensión de la película.

Por último, como nota, la fuerza de tracción con que las mordazas someten a tensión a la tira, aparece en la pantalla digital de la máquina de ensayo, valor que irá cambiando hasta que la tira se rompa. En este punto el valor de la fuerza se estabiliza, mostrando la pantalla de la máquina el valor de la fuerza de tensión con que la película falla, que es el que se utiliza para calcular el esfuerzo o la resistencia de tensión a la ruptura. Las variables del esfuerzo de tensión a la ruptura, se denotan mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A} \qquad \textbf{Ecuación 2.12}$$

Donde:

- ✓ σ_r es el esfuerzo de tensión a la ruptura;
- ✓ F_r es la fuerza de tensión con que las mordazas rompen la tira en cuestión;
- ✓ A es el área transversal de la franja paralela.

El error de paralelismo debe ser hasta de un 5%, para que los datos sean fidedignos. Puesto que es difícil hacer un corte paralelo y observar el 5% de error de paralelismo, se buscará reducir el error de paralelismo, cortando las tiras lo más ancho posible y, mientras más corta la tira, mejor, ya que mientras

más ancha y corta es la tira, mayor es el área transversal de la franja paralela, lo cual lleva a datos más fidedignos por la reducción del error de paralelismo.

Una vez que se han determinado los requerimientos para la realización del ensayo de tracción, se establece la parte operativa del mismo. La parte operativa del ensayo de tracción, según la norma ASTM D-882, consta de los siguientes pasos:

- ✓ Establecer las medidas del área transversal de la tira, espesor y ancho de la tira.

- ✓ Para colocar la separación inicial entre mordazas, escogemos una distancia entre mordazas de 50 – 100 mm, y una velocidad de elongación de 500 mm/min. Es importante calibrar la máquina de ensayo según los valores indicados, ya que estos valores son apropiados para elongaciones de más de 100%, como es el caso de las muestras en cuestión.

- ✓ Seleccionar el rango de la carga a utilizarse. En este caso, de 0 – 3 Kg_f.

- ✓ Alinear las mordazas y colocar la tira, sujetando sus extremos con sumo cuidado a las mordazas, las cuales

deben de presionar dichos extremos, de tal forma que nunca resbalen.

- ✓ Se tara la máquina de ensayo, se la deja en “0 Kg_f” y en “0%” de elongación.

- ✓ Se empieza el ensayo, dándole a la máquina la orden de empezar a estirar la tira.

- ✓ Se realizarán 10 ensayos de tracción para cada película, es decir, se tomarán 10 valores de fuerza y elongación a la ruptura para cada película, 5 valores para ensayos de tracción en DM y 5 valores para ensayos de tracción en DT. Por lo mencionado, se cortarán 10 tiras de la película en cuestión, 5 se cortarán en DM y 5 se cortarán en DT. De los cinco valores de fuerza y elongación que se obtienen para cada dirección, se escogen los tres más concurrentes, ya que por mayoría son los que se acercan muy bien a la resistencia a la tensión de la película, en la dirección que se esté analizando.

- ✓ Con los tres valores concurrentes, se obtiene un valor promedio de fuerza y elongación, que servirá para los

cálculos y análisis de la resistencia a la tensión, y de la elongación de la película en la dirección dada.

2.6.2 Ensayo de Resistencia al Impacto (ASTM D–1709)

La ***resistencia al impacto*** es la capacidad que tiene la película de absorber la energía que lleva consigo una carga de impacto, hasta el punto de ruptura. Mediante este concepto, se puede decir que la resistencia al impacto es un indicio de la capacidad de elongación que tiene el material hasta llegar a la ruptura.

La energía que lleva una carga de impacto, generalmente cinética, es absorbida por la estructura molecular de la película, al impactar la carga sobre la película; mientras mayor sea la energía absorbida por la película, mayor será la resistencia que ésta tenga al impacto de una carga. La resistencia al impacto, depende de la elasticidad y plasticidad de la película, a parte de la dureza de la misma; esto quiere decir que mientras más tenaz sea la película, mayor será la resistencia al impacto, ya que tendrá mayor capacidad de elongación en la región elástica y en la región plástica, por la acción de una carga de impacto considerable.

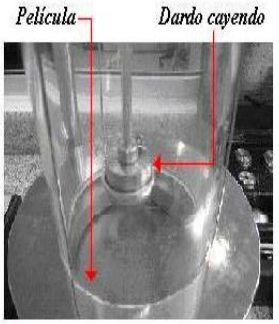
La película sufre elongación cuando se somete a una carga, ya sea esta de tracción ó de impacto, la diferencia está en la ***velocidad de deformación***, generalmente una carga de impacto de forma más rápido el material que una carga de tracción, esto implica que la película falla con mayor rapidez al ser sometida a una carga de impacto que supere o que iguale su resistencia; vale la pena mencionar que al haber mayor rapidez de deformación en la película, será muy difícil que haya formación de nuevos enlaces secundarios, esta dificultad de formar nuevos enlaces es lo que ayuda a la película a fallar con mayor rapidez cuando es sometida a una carga de impacto.

La estructura molecular necesita energía para estirarse y deformarse, ya que esto implica extensión de los enlaces principales y movimiento de macromoléculas, sobre las cuales se debe realizar un trabajo para que se extiendan y se muevan y éste debe ser realizado por una carga mecánica, la cual transmitirá su energía a la estructura macromolecular por medio de dicho trabajo, ya sea sometiéndola a tensión o impactando sobre ella. La energía que se transmite por medio del trabajo, es la que extiende los enlaces principales y desplaza a las macromoléculas entre sí, las cuales van perdiendo enlaces secundarios al sufrir movimientos entre ellas, es decir, van a

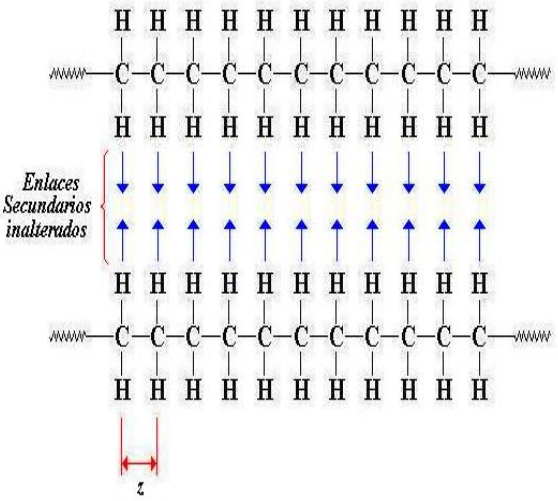
estar más vulnerables a separarse, y por ende, la película estará más vulnerable a fallar.

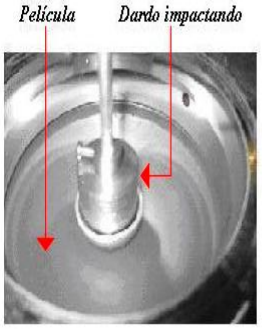
A continuación se observa una figura donde se aprecia, en secuencia, la extensión de los enlaces principales y el desplazamiento entre moléculas, que se da cuando la película es sometida a una carga de impacto:

(1) Preparación de la Máquina de Impacto

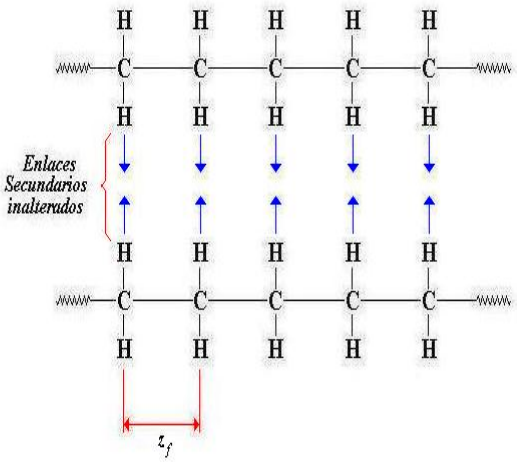


(2) Longitud del enlace principal (z), antes del impacto

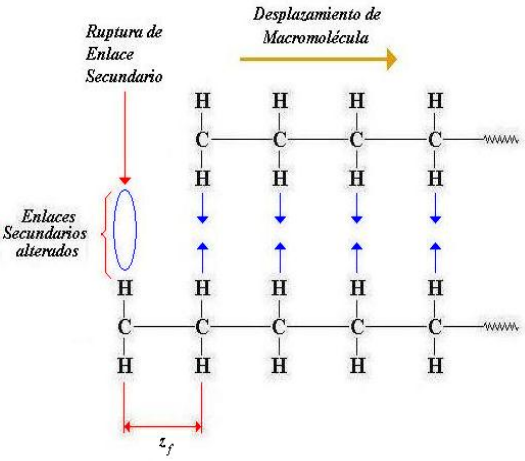




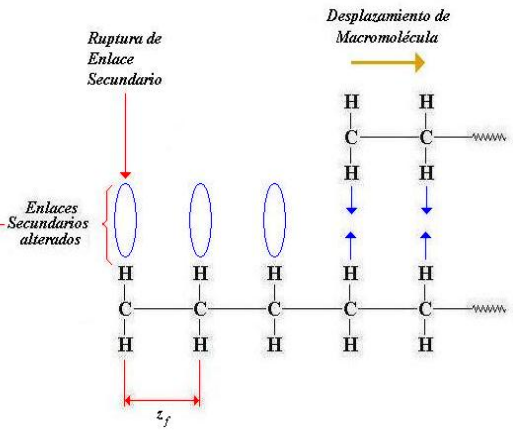
(3) Extensión del enlace principal hasta el límite de fluencia (z_f), al instante del impacto



4) Inicio de Deformación Plástica



5) Propagación de Deformación Plástica



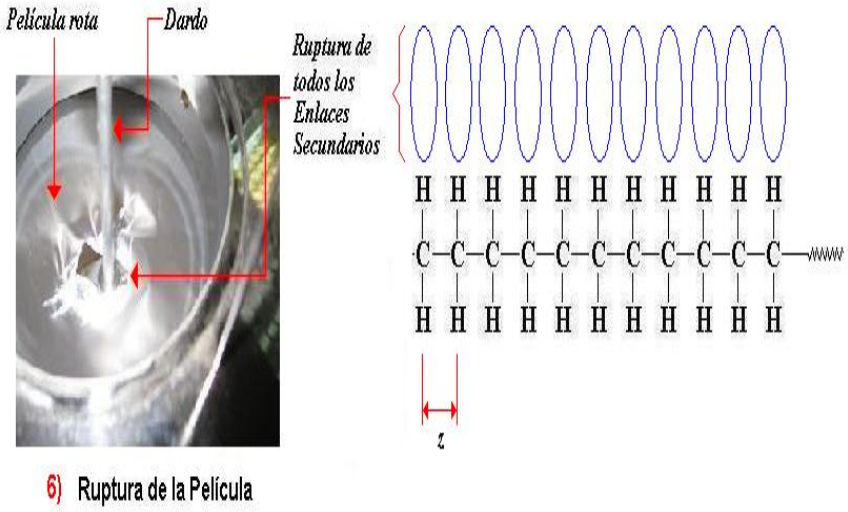


FIGURA 2.73 DEFORMACIÓN ELÁSTICA Y PLÁSTICA POR ACCIÓN DE CARGA DE IMPACTO

La Figura 2.69 ilustra de manera gráfica, en secuencia, lo que sucede a nivel molecular cuando una carga de impacto actúa sobre la película, cuándo ésta que se encuentra en la mordaza superior, se deja caer, transforma toda su energía potencial en energía cinética, la cual llega a su máxima intensidad justo antes de que la carga impacte la película.

Una vez que la carga impacte la película, la carga transmitirá toda su energía a la estructura molecular de la película, extendiendo sus enlaces principales, desde z, que es la longitud original del enlace principal, hasta z_f, que es la longitud máxima que el enlace principal puede alcanzar hasta el límite de elasticidad de la película.

Se puede observar que los enlaces secundarios no son alterados hasta que la película llega a su límite de fluencia o de elasticidad, luego de este límite, el dardo empieza a penetrar la película, entrando en la región de plasticidad de la película.

En la región de plasticidad, los enlaces secundarios se empiezan a romper a medida que el dardo va penetrando la película. En la región plástica, la longitud de los enlaces principales se mantiene en z_f, hasta que se llega al punto de ruptura de la película y en el que el enlace principal vuelve a su longitud original, z, una vez que la carga mecánica deja de actuar.

A medida que el dardo va penetrando la película, ésta va perdiendo enlaces secundarios entre macromoléculas, por el estiramiento de la película desde el punto donde impacta la carga, estiramiento que es posible por la resistencia que ofrece la mordaza inferior, que es donde se encuentra amordazada la película; por dicha resistencia, el dardo estira la película hasta su límite elástico o punto de fluencia, para luego, dependiendo del peso de la carga y de las condiciones de procesamiento de la película, empezar a deformar plásticamente a la película. La deformación plástica de la película consiste en la ruptura de sus

enlaces secundarios, por el desplazamiento entre moléculas que se da por la acción del estiramiento de la película, que ofrece la carga mecánica, en este caso, la carga de impacto en conjunto con la resistencia de la mordaza inferior.

La energía cinética del dardo es la que se invertirá, por la fuerza del impacto, en deformar elásticamente, y dependiendo de la fuerza del impacto (masa del dardo), en deformar plásticamente la película hasta que se haya invertido toda la energía cinética que trae consigo la carga, rompiendo enlaces secundarios entre ellas y así pudiendo llegar a romper la película. Al final de la Figura 2.69, se muestra una sola macromolécula, indicando que en ese instante el dardo rompió todos los enlaces secundarios entre dos o más cadenas, es decir, el dardo invirtió toda su energía cinética en extender elásticamente los enlaces principales y en desplazar a las cadenas entre sí hasta su punto de ruptura.

Con esta explicación acerca del fenómeno que ocurre en la estructura molecular de la película, al ser sometida ésta a una carga de impacto, se puede tener claro la manera en que las curvas de esfuerzo–deformación del ensayo de tracción, pueden ayudar a obtener información, por lo menos

comparativa, acerca de qué material es más resistente al impacto y qué material es menos resistente, ya que la curva que tiene mayor área debajo de ella, representa a la película que tiene mayor tenacidad, o sea, mayor capacidad de elongación en la región elástica y en la región plástica, bajo la acción de una carga de impacto considerablemente fuerte.

La película que tiene mayor tenacidad es aquella cuya estructura molecular necesita mayor trabajo sobre sus macromoléculas para que éstas se extiendan y se desplacen entre sí, y así se pueda deformar la película hasta el punto de ruptura. Mencionar que la estructura molecular necesita mayor trabajo sobre ella para que ocurra la elongación o deformación hasta el punto de ruptura, quiere decir que necesita mayor energía para que sus macromoléculas sufran la extensión de sus enlaces principales y los movimientos entre ellas hasta anular todos los enlaces secundarios entre dos o más macromoléculas, o entre dos o más regiones de macromoléculas.

La Figura 2.69 consta de 4 pasos, desde que se inicia el impacto hasta que falla o se rompe la película; hay películas que necesitan menos pasos para que se rompan, éstas son

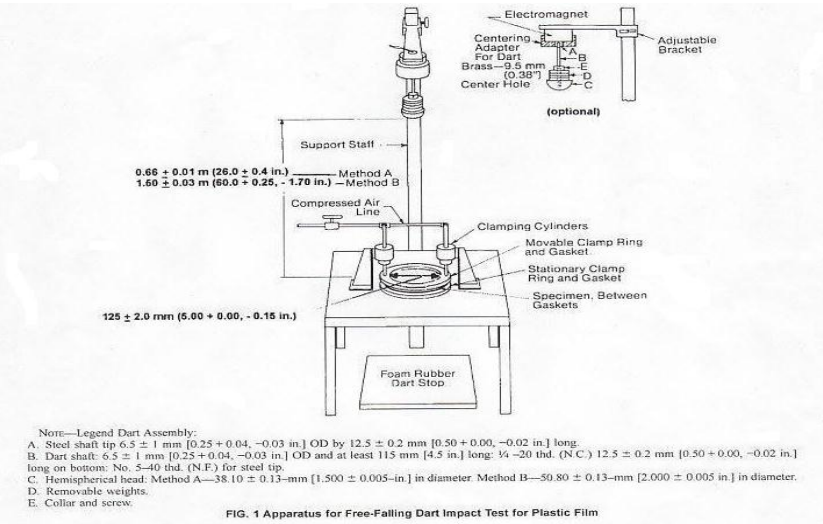
menos tenaces en relación a la que muestra la Figura 2.69, ya que absorben menos energía hasta su punto de ruptura.

El hecho de que una película pueda absorber más energía en el momento de actuar una carga mecánica sobre ella, significa que su elongación o deformación podrá ser mayor, es decir, sus macromoléculas se podrán extender y desplazar más entre sí hasta llegar al punto de ruptura de la película. Mientras más enlaces secundarios fuertes haya entre macromoléculas, mayor capacidad de elongación tendrá la película, o sea, la película tendrá mayor capacidad de absorber energía de la carga mecánica en la región elástica y plástica.

Ahora que se tiene claro lo que significa la resistencia al impacto de una película, la información que nos pueden dar las curvas de esfuerzo – deformación acerca de dicha resistencia y lo que pasa a nivel molecular en la película cuando es sometida a una carga de impacto, podemos establecer el método ASTM D-1709, el cual se utiliza para ponderar la resistencia al impacto de una película.

El método ASTM D-1709 se utiliza para establecer la energía que la película puede absorber hasta su punto de ruptura, cuando una carga de impacto actúa sobre ella, expresando

esta energía en unidad de masa. El desarrollo del método en cuestión, necesita de la siguiente máquina:



NOTE—Legend Dart Assembly:
A. Steel shaft tip 6.5 ± 1 mm [0.25 + 0.04, −0.03 in.] OD by 12.5 ± 0.2 mm [0.50 + 0.00, −0.02 in.] long.
B. Dart shaft: 6.5 ± 1 mm [0.25 + 0.04, −0.03 in.] OD and at least 115 mm [4.5 in.] long: ¼ –20 thd. (N.C.) 12.5 ± 0.2 mm [0.50 + 0.00, −0.02 in.] long on bottom: No. 5–40 thd. (N.F.) for steel tip.
C. Hemispherical head: Method A—38.10 ± 0.13–mm [1.500 ± 0.005–in.] in diameter. Method B—50.80 ± 0.13–mm [2.000 ± 0.005 in.] in diameter.
D. Removable weights.
E. Collar and screw.

FIG. 1 Apparatus for Free-Falling Dart Impact Test for Plastic Film

FIGURA 2.74 MÁQUINA DE ENSAYO DE IMPACTO

En la Figura 2.72, se puede observar que la máquina de impacto consta de un peso que actúa como dardo para impactar a la película, la cual se encuentra sobre la mesa de la máquina, desplegada y sujetada en su periferia por una mordaza circunferencial.

La máquina de impacto funciona mediante un sistema neumático, el cual se encarga de realizar los movimientos de la mordaza superior e inferior; la mordaza inferior, como ya se lo mencionó, es la que sujeta a la película en su periferia, permitiendo que la película se encuentre desplegada y

aprisionada por dicha mordaza, lo que le permite a la película reaccionar a la fuerza de impacto que actúa sobre ella.

La mordaza superior es la que sujeta al dardo de impacto, el cual se encuentra a una altura determinada con respecto a la película; por medio del sistema neumático, la mordaza superior realiza un movimiento que deja libre al dardo, para que éste caiga por acción de la gravedad y se desplace verticalmente hacia abajo, hasta impactar a la película que se encuentra en la parte inferior de la máquina de ensayo.

En el momento del impacto, pueden haber algunos sucesos, los cuales dependen de la carga de impacto (peso de prueba), de la altura desde la cual se suelte el dardo del material de la película (en este caso de HDPE) y del proceso de extrusión de la película.

Dependiendo del tipo de película a probar, la máquina de impacto tiene un rango de pesos para añadir al dardo, los cuales, en este caso, van desde los 2 g hasta los 60 g. El dardo de impacto, al cual se le añaden los pesos mencionados, consta de las siguientes partes:

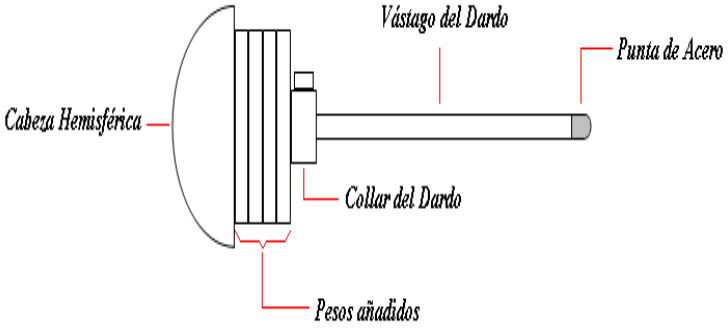


FIGURA 2.75 DARDO DE IMPACTO

En la Figura 2.71 se observan claramente los componentes del dardo de impacto, componentes que posteriormente se mostrarán con detalles.

El método ASTM D-1709, se clasifica en dos métodos de prueba de resistencia al impacto:

- ✓ Método A
- ✓ Método B

El método que se aplica a las muestras de películas de HDPE en cuestión, es el Método A, el cual tiene las siguientes consideraciones:

- ✓ La distancia entre la punta del dardo que se encuentra en la mordaza superior, hasta la película que se encuentra

desplegada y aprisionada por la mordaza inferior, es de 0.66 ± 0.01 m.

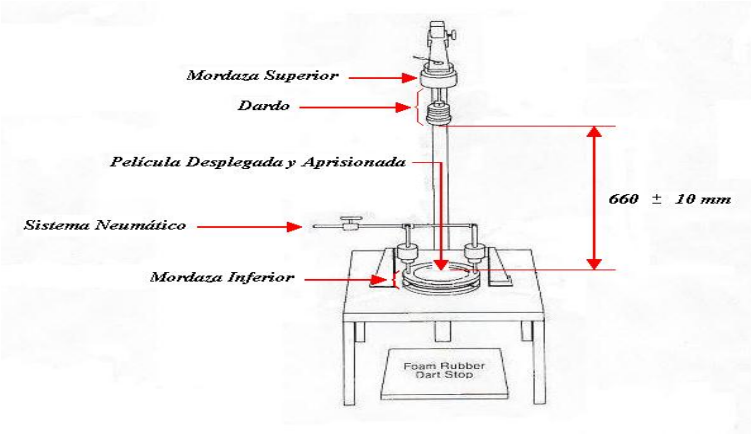


FIGURA 2.76 DISTANCIA DE IMPACTO

- ✓ La cabeza hemisférica del dardo de impacto debe tener un diámetro de 38.1 ± 0.13 mm y debe estar construido de Aluminio pulido, es decir, la cabeza hemisférica no debe tener ninguna irregularidad en su superficie.

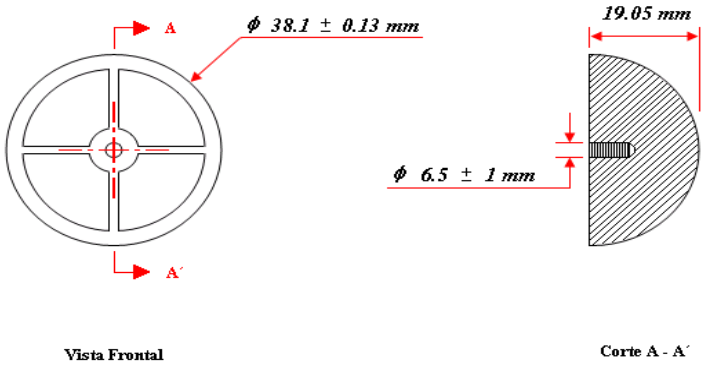


FIGURA 2.77 CABEZA HEMISFÉRICA

- ✓ Los pesos a añadir al dardo, deben ser de acero inoxidable ó de latón, y deben ser de forma cilíndrica, con un orificio central de 6.6 + 1 mm de diámetro.

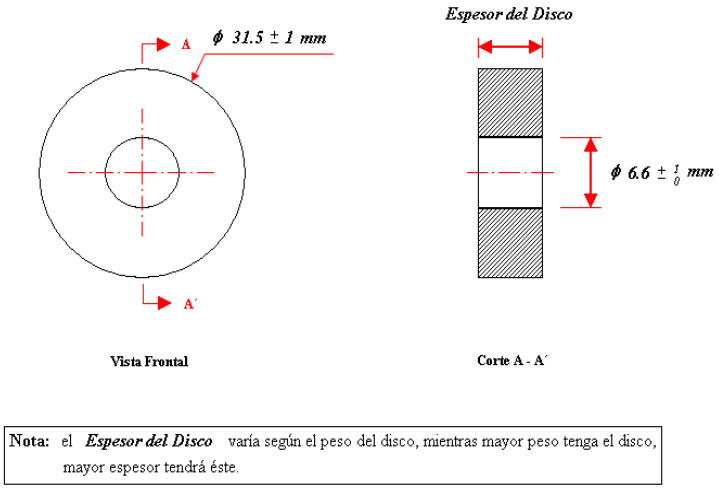


FIGURA 2.78 PESO A AÑADIR AL DARDO

- ✓ El diámetro de los pesos a añadir, no debe exceder el diámetro de la cabeza hemisférica del dardo.

- ✓ El máximo peso de prueba (dardo + peso añadido), que se puede llegar a utilizar, es de 2 Kg.

- ✓ El número de discos a añadir al dardo, según su peso, que deben estar disponibles en el ensayo, deben ser los que muestra la siguiente tabla:

TABLA 4

NÚMERO DE DISCOS SEGÚN SU PESO

# DE DISCOS	PESO (G)
2 ó más	5
8	15
8	30
8	60

- ✓ El vástago del dardo debe medir 6.5 ± 1 mm de diámetro y al menos debe tener una longitud de 115 mm. El material de construcción debe ser Aluminio y no debe tener imperfecciones o irregularidades en su superficie.

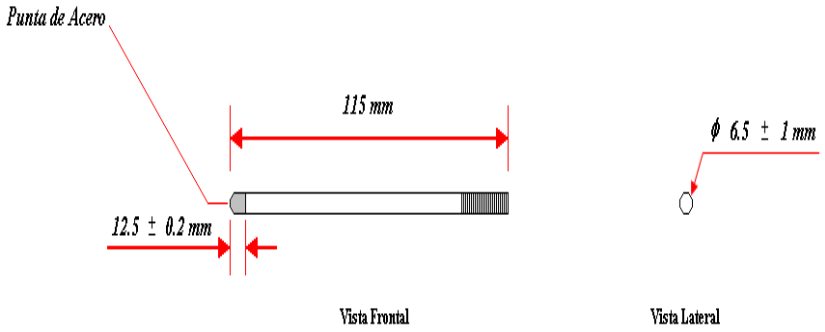


FIGURA 2.79 VÁSTAGO DEL DARDO

- ✓ El collar debe tener un diámetro interno de 7 mm y debe poseer un tornillo que sirva como seguro para que los pesos

a añadir queden ajustados al dardo. El collar debe ser de Aluminio.

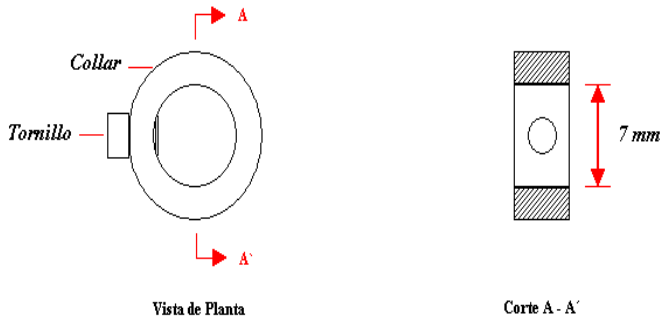


FIGURA 2.80 COLLAR DEL DARDO

- ✓ Debajo de la mordaza inferior, debe haber un caucho de 150 ± 3 mm de diámetro, el cual sirve para amortiguar la caída del dardo una vez que éste rompe y traspasa la película.

- ✓ El área expuesta al impacto, de la película en cuestión, no debe tener imperfecciones, ya sean éstas: arrugas pronunciadas, rasgaduras o puntos donde se concentren los esfuerzos. Si se desea realizar una prueba de impacto sobre estas imperfecciones en el área expuesta, para obtener una comparación entre la resistencia al impacto de un área sin imperfecciones con la resistencia al impacto de un área con imperfecciones, es válida la prueba al impacto.

- ✓ El ambiente donde se lleva a cabo el ensayo, debe estar a una temperatura de 23 ± 2ºC y tener una humedad relativa de 50 ± 5%.

Ahora que ya se tiene claro los requisitos del Método A, se puede establecer el desarrollo de dicho método para obtener la resistencia al impacto de las muestras en cuestión:

- ✓ Realizamos el corte de las muestras en cuestión, de cada muestra se cortará una tira de 165 mm de ancho, con un largo de al menos 1320 mm.

- ✓ El diámetro del área expuesta de la película en la máquina de ensayo, es de 125 ± 2 mm, razón por la cual se necesita cortar una tira de 165 mm de ancho, para que la mordaza inferior pueda aprisionar la periferia del área expuesta y así ésta tenga capacidad de reacción en el instante del impacto.

- ✓ De cada tira se realizarán por lo menos, según el largo de la tira, 8 pruebas de impacto, en las cuales se irá aumentado y reduciendo el peso de prueba según la reacción de la muestra al impacto.

- ✓ La tira tiene la capacidad, por lo menos, de exponer 8 áreas de 125 ± 2 mm de diámetro, una a la vez, en la mordaza

inferior, lo que llevará a realizar la prueba de impacto para cada área e ir anotando el valor de la carga de impacto para cada prueba.

- ✓ Se establece el espesor de cada área expuesta, por medio de un micrómetro.

- ✓ La resistencia al impacto es el peso de prueba que ha roto la película en el 50% de las pruebas que se realizaron con dicho peso.

2.6.3 Ensayo de Transmisión de Vapor de Agua "WVTR" (ASTM E-96)

El WVTR es un indicador de la permeabilidad de la película, a tal punto que al saber la transmisión de vapor a través de una película, uno puede tener una idea cercana de la permeabilidad de la película.

WVTR es el conjunto de siglas de ***Water Vapor Transmission***, que traducido al español significa: ***Transmisión de Vapor de Agua*****.** La película tendrá una transmisión de vapor de agua a través de ella, por la permeabilidad que tiene ella con respecto al vapor de agua, permeabilidad que se mide a través de la

cantidad de agua que atraviesa la película en forma de vapor, o sea a través del WVTR.

La siguiente figura muestra el fenómeno de la transmisión de vapor de agua a través de la película, en el cual se presentan los agentes que permiten dicha transmisión:

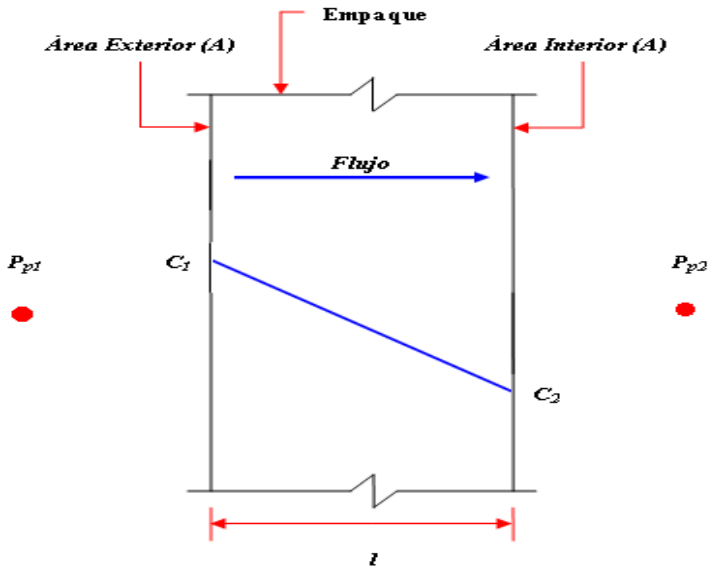


FIGURA 2.81 TRANSMISIÓN DE VAPOR DE AGUA A TRAVÉS DE LA PELÍCULA

Como se puede observar en la Figura 2.77, la transmisión del vapor de agua se da desde el lado de mayor concentración (C_1), hasta el lado de menor concentración (C_2). El lado de mayor concentración de vapor de agua es el lado donde se encuentra el aire del ambiente que rodea a la película fuera de

ella, es decir, es el ambiente en el que se encuentra la película. El lado de menor concentración de vapor de agua es el lado del interior de la película, o sea que es el ambiente que la película encierra.

Las películas pueden ser utilizadas, bajo ciertas normas, para empacar alimentos, para los cuales se necesita controlar la transmisión de vapor a través de la película. Por lo general, el WVTR es de interés en una película cuando ésta es utilizada para empacar alimentos, para otras aplicaciones de la película, por lo general, no es de interés el WVTR, por lo menos en nuestro medio, Ecuador.

Cuando las películas son utilizadas para empacar alimentos, éstas se sellan al vacío para controlar la atmósfera que contiene el empaque y así el alimento se pueda conservar según las condiciones que se requieren para el consumo humano.

Hay gases o vapores, a parte del vapor de agua, que se encuentran en el aire y que pueden deteriorar el alimento al interior del empaque, tales como el Oxígeno (O_2), pero que no evaluaremos su flujo a través de la película, por falta de instrumentación para hacerlo. Como se mencionó

anteriormente, en cuanto a gases y vapores, sólo se evaluará el WVTR, o sea, la Transmisión del Vapor de Agua a través de la película o empaque, basándonos en el sistema que muestra la Figura 2.77.

El sistema de la Figura 2.77 señala el fenómeno de la transmisión de cualquier fluido a través del empaque, en este caso es el fluido es vapor de agua. El empaque está formado por una película, a través de la cual hay una difusión de un fluido que es el vapor de agua, a través de la película del empaque, atravesando la película desde el lado de mayor concentración hasta el lado de menor concentración, se llama ***Permeación***.

La permeación de vapor de agua que la película puede tener a través de ella, es un dato importante para el diseño de la película o del empaque en donde va a ser almacenado el producto. La permeación de vapor de agua ó de cualquier otro fluido, se establece tomando en cuenta las siguientes variables:

- ✓ Cantidad del Fluido (q)
- ✓ Área de Flujo (A)
- ✓ Tiempo de Transmisión (t)
- ✓ Espesor de la Película (l)

- ✓ Diferencia de Presiones Parciales (Δp_p)

Estas variables se relacionan con la permeación, la cual se identifica mediante el ***Coeficiente de Permeabilidad*** (P), de la siguiente manera:

$$P = \frac{ql}{At\Delta p_p} \qquad \textbf{Ecuación 2.13}$$

La Ecuación 2.13 muestra la manera en que se relacionan las variables que hay que tomar en cuenta para establecer la permeación o coeficiente de permeabilidad. La Ecuación 2.13 también se puede escribir de la siguiente manera:

$$P = WVTR\ \frac{l}{\Delta p_p} \qquad \textbf{Ecuación 2.14}$$

Mediante la ecuación 2.14 apreciar que la permeación depende del WVTR, el cual, a su vez, depende de la cantidad del fluido (q), del área de flujo (A) y del tiempo de transmisión (t).

Las variables de las cuales depende la permeación, se explicarán con mayor detalle a continuación:

La ***Cantidad del Fluido*** (q), es la masa o volumen de fluido que atraviesa el espesor de la película. En esta tesis, se utilizará el Kg como unidad de masa para ponderar q.

El *Área de Flujo* (A), es la superficie de la película por donde fluye el fluido, ya sea éste gas ó vapor de agua. La superficie A, es perpendicular a la dirección del flujo que experimenta el fluido, a través de la película; la película tiene dos superficies, a través de las cuales fluye el fluido, dichas superficies son: superficie externa y superficie interna. La superficie externa es la que se encuentra del lado externo de la película ó empaque, o sea, es la superficie que se encuentra en contacto con la intemperie ó con la mayor concentración de aire. La superficie interna es la que se encuentra del lado interno de la película ó empaque, o sea, es la superficie que se encuentra en contacto con el producto alimenticio ó con la menor concentración de aire. La Figura 2.77 puede mostrar claramente la ubicación de las superficies en mención.

El ***Tiempo de Transmisión*** **(*t*)**, es el tiempo de exposición que tiene el empaque al fluido de transmisión. El empaque tiene un tiempo de exposición a un fluido, en nuestro caso vapor de agua, el cual fluye a través de la película o empaque; dicho tiempo de exposición es llamado tiempo de transmisión.

El ***Espesor de la Película*** (l), es la distancia que tiene que atravesar el fluido a través de la película, fluyendo desde la

superficie de mayor concentración hasta la superficie de menor concentración. Si se trata de aire, la superficie externa es la de mayor concentración, si se trata de otro gas o vapor, habría que analizar cuál de las dos superficies, externa o interna, del empaque, se encuentra en contacto con la mayor concentración del gas o del vapor que se encuentre en estudio su transmisión a través del empaque.

La ***Diferencia de Presiones Parciales*** (ΔP_p), es la resta entre las presiones parciales que existen en ambos lados del empaque, es decir, es la resta o diferencia entre la presión parcial del lado de alta concentración y la presión parcial del lado de baja concentración, ya sea esta concentración, de aire, de otro gas o de vapor. Si hablamos de aire, la presión parcial del lado de alta concentración, va a ser la que el aire ejerce sobre la superficie externa del empaque; lógicamente, la presión parcial del lado de baja concentración, va a ser la que existe al interior del empaque, la cual, si el empaque es sellado al vacío, se considera cero. La presión parcial del lado de alta concentración va a ser mayor que la presión parcial del lado de baja concentración; siempre se resta la menor presión de la mayor presión o se obtiene el valor absoluto de la diferencia de las presiones en mención.

Estas variables se pueden establecer mediante el ensayo ASTM E-96, en el cual se calcula la transmisión de vapor de agua a través de la película; dicha transmisión nos servirá para establecer la permeación o la permeabilidad a través de la película.

La permeabilidad puede variar a medida que varía la temperatura del ambiente en donde se encuentra el empaque que contiene el producto alimenticio, es decir, la permeabilidad del empaque cambia a medida que varía la temperatura de la atmósfera que rodea exteriormente al empaque.

Matemáticamente, se ha llegado a una relación entre la permeabilidad y la temperatura, por medio de la ecuación de *Arrhenius*, esta relación se escribe de la siguiente manera:

$$P = P_o e^{-\frac{E_p}{RT}} \qquad \textbf{Ecuación 2.15}$$

Donde:

- ✓ P es la permeabilidad que se desea estimar;
- ✓ P_o es la permeabilidad pre-exponencial;
- ✓ E_p es la energía de activación;
- ✓ R es la constante de los gases;

- ✓ T es la temperatura en la cual se desea estimar la permeabilidad.

De esta manera, para cada temperatura se puede establecer una permeabilidad, por ejemplo, para una temperatura T_1 se puede establecer una permeabilidad P_1 y para una temperatura T_2 una permeabilidad P_2. A continuación se muestran las ecuaciones respectivas:

$$P_1 = P_o e^{-\frac{E_p}{RT_1}} \qquad \textbf{Ecuación 2.16}$$

$$P_2 = P_o e^{-\frac{E_p}{RT_2}} \qquad \textbf{Ecuación 2.17}$$

Se puede desarrollar una relación entre dos permeabilidades, entre P_1 y P_2, y así poder obviar el término pre-exponencial P_o. Esta relación se desarrolla a través de la división entre P_1 y P_2, en la cual se simplifica el término P_o; a continuación se muestra el desarrollo de esta relación:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_o e^{-\frac{E_p}{RT_2}}}{P_o e^{-\frac{E_p}{RT_1}}} \qquad \textbf{Ecuación 2.18}$$

De la Ecuación 2.18, se simplifica el término P_o, como se mostrará a continuación, obteniendo así una ecuación simplificada que relacione a P_1 y P_2:

$$P_2 = P_1 e^{\frac{E_p}{R}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)}$$ **Ecuación 2.19**

Mediante la Ecuación 2.19, se establece el valor de E_p, ya que al obtener P_1 y P_2 a través del ensayo ASTM E-96, se puede despejar E_p para establecer su valor. Una vez que se obtiene el valor de E_p, se establecen diferentes valores de P_2 para diferentes valores de T_2, y así se puede desarrollar una gráfica de ***Permeabilidad Vs. Temperatura***.

Para llevar a cabo el ensayo ASTM E-96, habrá que cumplir con los siguientes requisitos:

- ✓ Ambiente de trabajo:
  - Temperatura: 20 – 22 ºC
  - HR: 50 – 52 %

- ✓ Incubadora:
  - Rango: 0 – 70 ºC
  - Escala mínima: 0.1 ºC

- ✓ Olla
- ✓ Hidrómetro:
  - Rango: 0 – 98% HR
- ✓ Termómetro:
  - Rango: 0 – 50 ºC
- ✓ Regla metálica milimétrica
- ✓ Estilete
- ✓ Selladora de empaques plásticos
- ✓ Desecante
- ✓ Balanza digital:
  - Rango: 0 – 610 g
  - Escala mínima: 0.01 g
- ✓ Guantes de látex

Una vez que se han mencionado los requisitos a cumplir, se establecerá el procedimiento para llevar a cabo el ensayo ASTM E-96. Antes de empezar a relatar este procedimiento, es necesario mencionar que el desecante absorbe humedad, por lo cual primero hay que leer el procedimiento con atención y así observar que el desecante debe permanecer el menor tiempo posible fuera de la atmósfera controlada; si el desecante llega a permanecer mucho tiempo fuera de la atmósfera controlada, es

probable que los datos de permeabilidad se alteren. Ahora sí estableceremos el procedimiento a seguir:

- ✓ Ponerse los guantes de látex.
- ✓ Se deben establecer las condiciones atmosféricas a las cuales se requiere medir la permeabilidad del empaque, es decir, temperatura y humedad relativa de la atmósfera.
- ✓ Se vierte agua en la olla, la cual se introduce en la incubadora para que en el interior de ésta se pueda llegar a la humedad relativa establecida. La temperatura se regula a través de los controles de la incubadora y así poder llegar al valor de temperatura establecido.
- ✓ Mediante el hidrómetro y termómetro se controla la atmósfera al interior de la incubadora. Si falta humedad relativa al interior de la incubadora, se agrega agua a la olla; si hay exceso de humedad relativa, se merma la cantidad de agua que hay en la olla. Si la temperatura de la incubadora cambia del valor establecido, se puede volver al mismo a través de los controles de la incubadora.
- ✓ Los empaques, los cuales ingresarán en la atmósfera desarrollada en la incubadora, serán llamados “Pouches”, cada Pouch tendrá una denotación que indicará la aplicación de la película que está siendo probada.

- ✓ Cada Pouch será de 10 cm x 10 cm, aproximadamente, para lo cual se necesita cortar un pedazo de película de 22 cm x 12 cm, ya que de esta manera se podrá sellar el empaque en tres de sus lados.
- ✓ El sellado se realiza a dos lados paralelos del empaque, primero, para que haya una abertura y así poder llenar el empaque de 25 g desecante.
- ✓ Antes de llenar el empaque de desecante, tarar la balanza en el peso del empaque.
- ✓ Una vez que se han alcanzado los 25 g de desecante, se sella el tercer lado del empaque.
- ✓ Se quita la tara de la balanza y se pesa el empaque lleno de desecante, el cual tiene que ingresar de inmediato en la atmósfera de la incubadora, una vez que se ha pesado. Este peso se llama ***Peso Inicial***, peso que debe ser anotado para cada Pouch.
- ✓ Se desarrollan 3 empaques o Pouches para cada muestra, los cuales son ingresados en la atmósfera controlada de la incubadora. Los Pouches de una misma muestra tendrán un número diferente para poder diferenciarlos.
- ✓ Los Pouches se extraen de la incubadora en el mismo orden que ingresaron, uno por uno, cada 2 ó 3 días. Al extraer un

Pouch, se deja cerrada la incubadora, se pesa el Pouch extraído y se vuelve a ingresar el Pouch en la incubadora; el peso del Pouch extraído es anotado. Este proceso se lo aplica a cada Pouch que está dentro de la incubadora, y se lo realiza lo más rápido posible para que prácticamente no actúe con la atmósfera del exterior de la incubadora.

- ✓ El tiempo máximo que puede estar un Pouch fuera de la atmósfera controlada, es igual al 1% del tiempo entre sucesivos procesos de pesar un mismo Pouch.
- ✓ Después de pesar el Pouch, se debe agitar suavemente el Pouch para que el desecante que no ha estado en contacto con la superficie interna del empaque o que no ha tenido tanto contacto con la humedad, pueda tenerlo y así se pueda mantener el máximo WVTR posible a través del empaque, lo cual permitirá acercarnos bien a la máxima permeabilidad que el empaque puede tener en condiciones de humedad “extremas”.
- ✓ En cada proceso de pesar el Pouch, se apunta el peso del Pouch en gramos y el tiempo, en horas, que ha transcurrido desde el peso inicial hasta el nuevo peso. De esta manera se va realizando una gráfica de Peso versus Tiempo para cada Pouch, con cada peso apuntado y con el tiempo transcurrido.

- ✓ Obtener por lo menos 6 puntos en la gráfica, incluido el punto del tiempo igual a cero, que es el punto del peso inicial.
- ✓ De los 6 puntos que se obtienen para cada Pouch, se grafica la curva Peso versus Tiempo, la cual se convierte en una curva lineal para obtener la pendiente de ella y así, por medio del área del empaque (dos veces 10 cm x 10 cm), calcular el WVTR del empaque, como indican las ecuaciones 2.13 y 2.14:

$$WVTR = \frac{q}{At} \qquad \textbf{Ecuación 2.20}$$

- ✓ Terminar el ensayo ó cambiar de desecante, cuando el peso ganado por el desecante exceda el 10% de su peso original (25 g).

Una vez que se ha concluido el ensayo ASTM E-96, con el cual se ha obtenido el WVTR para cada muestra, se procede a reemplazar este valor en la Ecuación 2.14, para poder establecer el valor de la permeabilidad. Además del WVTR, se necesita reemplazar en la Ecuación 2.14 el valor del espesor de la muestra y la diferencia de presiones parciales, en esta diferencia de presiones parciales intervienen la presión parcial

de vapor de agua al interior del empaque y la presión parcial de vapor de agua al exterior del empaque.

La presión parcial al interior del empaque se asume que es igual a “cero”, por la presencia del desecante, el cual absorbe la humedad presente al interior del empaque. La presión parcial al exterior del empaque se establece a través de las tablas de vapor; conociendo la temperatura del exterior del empaque, se ingresa en las tablas de vapor para obtener el valor de la presión de saturación del agua a dicha temperatura, el cual se lo multiplica por la humedad relativa al exterior del empaque y se divide para 100, de esta manera obtenemos el valor de la presión parcial de vapor de agua al exterior del empaque.

Mediante el coeficiente de permeabilidad, se puede establecer el tiempo de percha, o sea el tiempo máximo en el que un producto alimenticio empacado que se encuentre en la percha de una tienda ó supermercado, pueda conservarse apto para el consumo humano.

Este tiempo se lo encuentra mediante la Ecuación 2.13 y mediante las Isotermas de Adsorción, dichas Isotermas no constituyen el tema de tesis que se está tratando, ya que en el

estudio de las propiedades de la película, lo que interesa es la manera de ponderarlas y, la relación que éstas tienen con la materia prima y con las condiciones de procesamiento que se utilizaron para la fabricación de la película.

CAPÍTULO 3

3. DATOS DE LAS MUESTRAS

En este capítulo se mostrarán los datos de las muestras que se utilizaron para demostrar de qué manera influye la materia prima y las condiciones de procesamiento, en las propiedades mecánicas de la película.

Se empezará mostrando los datos de la materia prima utilizada en cada una de las muestras, luego se presentarán los datos de las condiciones de procesamiento para la producción de cada película,

Por último se observarán las propiedades mecánicas que cada película obtuvo en su proceso de extrusión.

Cabe mencionar que de todas las muestras que se obtuvieron, presentan cambios en la materia prima (MI_1, MI_2, ρ_1 y ρ_2), y fueron obtenidas de una producción que se llevó a cabo, exclusivamente, para esta tesis; en dicha producción se iba cambiando la materia prima según la muestra que se quería obtener. Las demás muestras, las que presentan cambios en las condiciones de procesamiento, se obtuvieron de una producción que se llevó a cabo para un cliente de la empresa donde se obtuvieron dichas muestras. En dicha producción se iban cambiando las condiciones de procesamiento según la muestra que se quería obtener.

También es necesario acotar que en las extrusoras de las cuales se obtuvieron las muestras, había un único sistema de enfriamiento externo.

En este capítulo se podrá observar que no hay muestras para las cuales se presente una influencia en las propiedades mecánicas, por un cambio en el ***Die Gap***. No se presentaron dichas muestras porque no se logró conseguir una extrusora para obtener dos muestras, la primera muestra con un cabezal (**Die Gap_1**) y la otra muestra con un cabezal diferente (**Die Gap_2**); tampoco se pudo conseguir dos

extrusoras en las cuales sólo cambiara el cabezal, es decir, una extrusora para obtener la primera muestra con un cabezal (**Die Gap$_1$**) y otra extrusora de iguales características, pero con un cabezal diferente (Die Gap$_2$), de la cual se obtuviera la segunda muestra.

En el Capítulo 2 se utilizaron los datos de una muestra que no entró en el análisis, ya que no se consiguió otra de iguales características, pero con un **Die Gap** diferente. Los datos de esta muestra se utilizaron para observar mediante la teoría de la mecánica de fluidos, los cambios en las presiones y los esfuerzos de corte en el fundido que fluye a través del cabezal, al cambiar el Die Gap, lo cual puede dar una idea de lo que pasaría en la práctica. En el Apéndice se encuentran los datos de la muestra que se utilizaron en el Capítulo 2, y los datos de otras muestras que tampoco entraron en el análisis.

3.1 Datos de Materia Prima

La materia prima utilizada en cada una de las muestras, se visualizará en la Tabla 5, la cual consta el nombre de la película, la materia prima que la compone, la marca, el tipo, el índice de fluidez (MI), la densidad (ρ) y la proporción de cada componente. En la tabla también se observa que cada película es una mezcla de componentes, cuyos datos servirán para establecer el MI y la ρ de la mezcla.

TABLA 5

MATERIA PRIMA UTILIZADA EN LAS MUESTRAS

	MATERIA PRIMA					
PELÍCULA	**Composición**	**Marca**	**Tipo**	**MI (g/10 min, 2,16 Kgf)**	**ρ (g/cm³)**	**Proporción (%)**
MI_1	HDPE	SABIC	F00952	0,050	0,952	67
	LLDPE	BRASKEM	FLEXUS 9211	1,000	0,917	33
MI_2	HDPE	IPIRANGA	GM 9450 F	0,076	0,952	67
	LLDPE	BRASKEM	LL-218/21	2,000	0,917	33
ρ_1	HDPE	ENTEC	HFB950	0,055	0,949	67
	LLDPE	SABIC	118	1,000	0,918	33
ρ_2	HDPE	SABIC	F00952	0,050	0,952	67
	LLDPE	BRASKEM	FLEXUS 9211	1,000	0,917	33
$FLUJO_1$	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20
$FLUJO_2$	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20
FH_1	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20
FH_2	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20
DDR_1	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20
DDR_2	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20
BUR_1	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20
BUR_2	HDPE	ALATHON	L 5005	0,057	0,949	80
	LLDPE	WESTLAKE	LF 1020	1,100	0,918	20

Como se observa en la Tabla 5 las muestras no son 100% HDPE, sino que son una mezcla de HDPE y LLDPE, teniendo al componente HDPE en mayor proporción.

Las primeras cuatro muestras (MI_1, MI_2, ρ_1 y ρ_2) tienen componentes diferentes y por lo tanto Índices de Fluidez y Densidades diferentes entre componentes de una y otra muestra, sin embargo, las muestras conservan la misma proporción en sus componentes (67% HDPE y 33% LLDPE), los cuales son diferentes porque en estas películas se trató de obtener Índices de Fluidez y Densidades diferentes entre las

muestras, para poder observar la manera en que MI y ρ influyen en las propiedades mecánicas de las películas.

Las muestras que se encuentran debajo de las cuatro primeras, tienen los mismos componentes, los cuales también se encuentran en la misma proporción (80% HDPE y 20% LLDPE) para cada una de estas muestras. En estas películas no se trataba de observa la influencia de MI y ρ en las propiedades mecánicas, las películas sirvieron para observar la manera en que influyen las condiciones de procesamiento (FLUJO, FH, DDR y BUR) en las propiedades mecánicas, razón por la cual se tuvo que mantener constante la materia prima.

Para obtener el Índice de Fluidez y la Densidad de cada muestra, se utilizaron las siguientes herramientas:

- ✓ Tabla para predecir el Índice de Fluidez de una mezcla de dos componentes.
- ✓ Fórmula para predecir la Densidad de una mezcla de dos componentes.

La tabla para predecir el Índice de Fluidez de una mezcla de dos componentes, se muestra en la Figura 3.1, en la cual se observan los componentes **X** y **Y**. Cada componente tiene su propio MI, con el cual

colabora cada uno de ellos en el MI de la mezcla, según el porcentaje de peso de cada uno de ellos.

Para encontrar el MI de la mezcla en la Figura 3.1, habrá que seguir el siguiente procedimiento:

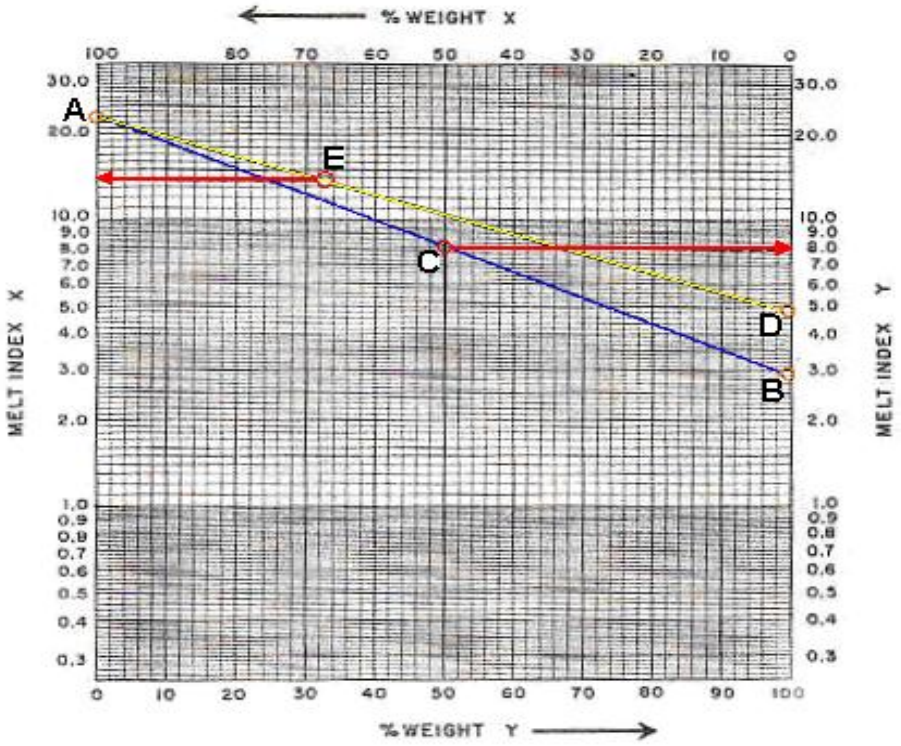


FIGURA 3.1 PREDICCIÓN DEL ÍNDICE DE FLUIDEZ DE UNA MEZCLA DE DOS COMPONENTES

1. Se marca un punto en el MI del componente **X**.
2. Se marca un punto en el MI del componente **Y**.
3. Se traza una línea desde el MI del componente **X** hasta el MI del componente **Y** o viceversa.

4. Se traza una línea vertical desde el porcentaje de peso que tiene el componente **X** en la mezcla, hasta el porcentaje de peso que tiene el componente **Y** en la mezcla o viceversa.
5. Se traza una línea horizontal desde el punto de intersección entre las líneas de MI y de porcentajes de peso, hasta el eje de MI más cercano.
6. La intersección entre la línea horizontal y el eje de MI más cercano, es el MI de la mezcla.

En la Figura 3.1, se muestran dos ejemplos de predicción del MI en mezclas. La primera mezcla se encuentra entre los puntos **A** y **B**, que marcan el MI del componente **X** (22 g/10 min) y el MI del componente **Y** (3 g/10 min), respectivamente. El punto **C** de esta mezcla, es la intersección entre la línea de MI (A – B) y la línea de porcentajes de peso que si se observa, se notará que indica que la mezcla consta de 50% en peso del componente **X** y 50% en peso del componente **Y**. La línea horizontal está trazada desde el punto **C** hasta el eje de MI del componente **Y**, señalando así la intersección entre la línea horizontal y el eje de MI del componente **Y**, intersección que indica el MI de la mezcla (8 g/10 min).

Los MI de los componentes, deben haber sido obtenidos bajo las mismas condiciones de fuerza, para poder predecir el MI de la mezcla;

de esta manera el MI de la mezcla que se obtendría, estaría bajo las mismas condiciones de fuerza que tienen los MI de los componentes. En nuestro caso, se ha trabajado con Índices de Fluidez obtenidos bajo la acción de una fuerza de 2.16 Kg.

La segunda mezcla que muestra la tabla de la Figura 3.1, se encuentra entre los puntos **A** y **D**, puntos que marcan el MI del componente **X** (22 g/10 min) y el MI del componente **Y** (5 g/10 min), respectivamente. El punto **E** de esta mezcla, es la intersección entre la línea de MI (A – D) y la línea de porcentajes de peso; si observamos, nos damos cuenta que la línea de porcentajes de peso, nos indica que la mezcla consta de 67% en peso del componente **X** y 33% en peso del componente **Y**. La línea horizontal está trazada desde el punto **E** hasta el eje de MI del componente **X**, señalando así la intersección entre la línea horizontal y el eje de MI del componente **X**, intersección que indica el MI de la mezcla (13.5 g/10 min).

La ***Fórmula para predecir la Densidad*** *de* ***una mezcla de dos componentes*****,** se muestra a continuación en la Ecuación 3.1:

$$\rho_{muestra} = \frac{masa_{resina1} + masa_{resina2}}{volumen_{resina1} + volumen_{resina2}}$$

$$\rho_{muestra} = \frac{m_{resina1} + m_{resina2}}{\left(\frac{m_{resina1}}{\rho_{resina1}}\right) + \left(\frac{m_{resina2}}{\rho_{resina2}}\right)} \qquad \textbf{Ecuación 3.1}$$

Donde:

- ✓ $\boldsymbol{m_{resina1}}$ es la masa de la resina #1 ó del componente #1 que interviene en la mezcla para la elaboración de la película;
- ✓ $\boldsymbol{m_{resina2}}$ es la masa de la resina #2 ó del componente #2 que interviene en la mezcla para la elaboración de la película;
- ✓ $\boldsymbol{\rho_{resina1}}$ es la densidad de la resina #1 ó del componente #1 que interviene en la mezcla para la elaboración de la película;
- ✓ $\boldsymbol{\rho_{resina2}}$ es la densidad de la resina #2 ó del componente #2 que interviene en la mezcla para la elaboración de la película;
- ✓ $\boldsymbol{\rho_{muestra}}$ es la densidad de la mezcla de los dos componentes que intervienen en la elaboración de la película.

En la Ecuación 3.1 se puede observar que la densidad de la película es igual al cociente entre la suma de las masas de los componentes omateria prima que se mezcla para la elaboración de la película, y la suma de sus volúmenes. Para la obtención del volumen de cada componente, se divide la masa del componente para su densidad. De esta manera se llega a predecir la densidad que la película obtendrá al estar formada por dos componentes de diferente densidad.

En el caso de no tener la masa de cada componente, se puede establecer la Ecuación 3.1 en términos de porcentajes ó fracciones:

$$\rho_{muestra} = \frac{1}{\left(\frac{\left(\frac{\%_{resina1}}{\rho_{resina1}} \right) + \left(\frac{\%_{resina2}}{\rho_{resina2}} \right)}{100} \right)} \quad \textbf{Ec. 3.2}$$

Donde:

- ✓ $\%_{resina1}$ es el porcentaje en masa de la resina #1 en la mezcla;
- ✓ $\%_{resina2}$ es el porcentaje en masa de la resina #2 en la mezcla.

Una vez que se conoce los procedimientos para llegar a obtener el Índice de Fluidez y la Densidad de una mezcla de dos componentes, se estableció la Tabla 3.2, en la cual constan MI y ρ para cada una de las muestras que se utilizaron en la tesis.

En la Tabla 6, a parte de los Índices de Fluidez y de las Densidades de las muestras, se muestran los nombres de las muestras, la composición, MI, ρ y proporción de cada componente.

TABLA 6

ÍNDICE DE FLUIDEZ Y SENSIDAD DE CADA MUESTRA

	MATERIA PRIMA					
PELÍCULA	Composición	MI (g/10 min, 2,16 Kg_f)	ρ (g/cm^3)	Proporción (%)	$MI_{muestra}$ (g/10 min, 2,16 Kg_f)	$\rho_{muestra}$ (g/cm^3)
MI_1	HDPE	0,050	0,952	67	0,142	0,940
	LLDPE	1,000	0,917	33		
MI_2	HDPE	0,076	0,952	67	0,232	0,940
	LLDPE	2,000	0,917	33		
ρ_1	HDPE	0,055	0,949	67	0,142	0,938
	LLDPE	1,000	0,918	33		
ρ_2	HDPE	0,050	0,952	67	0,142	0,940
	LLDPE	1,000	0,917	33		
$FLUJO_1$	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		
$FLUJO_2$	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		
FH_1	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		
FH_2	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		
DDR_1	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		
DDR_2	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		
BUR_1	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		
BUR_2	HDPE	0,057	0,949	80	0,110	0,943
	LLDPE	1,100	0,918	20		

3.2 Datos de condiciones de procesamiento

Como se mencionó al inicio del Capítulo 3, luego de mostrar los datos de materia prima para cada película, se mostrarán los datos de las condiciones de procesamiento para la elaboración de cada película. En la siguiente tabla constarán los datos de las condiciones de procesamiento:

TABLA 7

CONDICIONES DE PROCESAMIENTO

PELÍCULA	CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
	Die Gap (mm)	FLUJO (g/s)	FH (cm)	DDR (V_L/V_O)	BUR ($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)
MI_1	2	17,40	70	6,78	3,80
MI_2	2	17,40	70	6,78	3,80
ρ_1	2	17,40	70	6,78	3,80
ρ_2	2	17,40	70	6,78	3,80
$FLUJO_1$	1	32,71	97	5,25	4,20
$FLUJO_2$	1	30,32	79	5,66	4,00
FH_1	1	32,71	80	5,25	3,87
FH_2	1	32,71	97	5,25	4,20
DDR_1	1	32,71	97	5,25	4,20
DDR_2	1	33,02	100	10,61	4,40
BUR_1	1	44,14	47	1,83	1,47
BUR_2	1	44,14	65	1,83	1,73

En la Tabla 7, al igual que en las anteriores tablas del Capítulo 3, se muestran dos películas para cada parámetro de materia prima y de condición de procesamiento, habiéndose obtenido dos películas para cada parámetro, con el fin de observar la influencia de la materia prima y de las condiciones de procesamiento en las propiedades mecánicas de las películas.

3.3 Datos de propiedades mecánicas

Para observar la influencia de la materia prima y de las condiciones de procesamiento, se empezará a mostrar los datos

de las propiedades mecánicas para cada película, a través de los ensayos prescritos en el Capítulo 2. Una vez que se muestren todos los datos de las propiedades mecánicas, se establecerá una tabla que integrará los datos de materia prima, condiciones de procesamiento y propiedades mecánicas, para ir definiendo la influencia de cada parámetro sobre cada muestra.

3.3.1 Resistencia a la Tensión y Elongación

La obtención de los datos de resistencia a la tensión y elongación se la obtuvo mediante el ensayo ASTM D-882, el cual se describió en el Capítulo 2. A continuación se narrará el desarrollo del ensayo para la obtención de los valores de resistencia a la tensión y elongación, para las muestras que se estudian en esta tesis:

1. Se traspuso la muestra bajo la luminaria y al observarla, se descubrió las cadenas moleculares en DM. Una vez que se supo la orientación de las cadenas en la muestra, con un marcador se señaló en una esquina la dirección de las cadenas en DM. Al marcar DM se dedujo que las cadenas moleculares en DT se encontraban en dirección transversal.

FIGURA 3.2 SEÑALIZACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE LAS CADENAS MOLECULARES

2. Se cortó un pedazo de muestra de 50 cm x 25 cm, aproximadamente, para cada dirección molecular. Cada uno de estos pedazos se lo extendió y estiró moderadamente en la mesa de trabajo, sujetándolo con adhesivos a la mesa. Esto se realizó para relajar la muestra y desconcentrar esfuerzos por las arrugas y doblez; la relajación de la muestra facilitaría el corte de las tiras de la muestra, de tal manera que se obtuvieron tiras sin mordeduras o sin bordes rasgados.

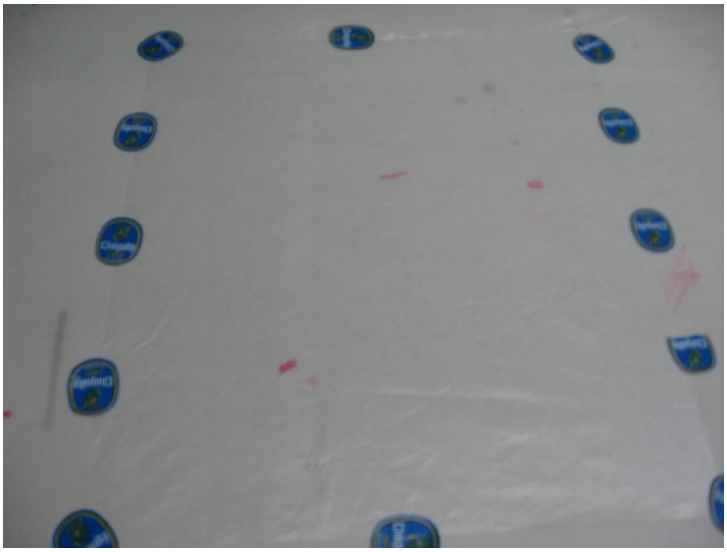


FIGURA 3.3 PELÍCULA EXTENDIDA

3. Una vez extendida y sujetada la película a la mesa, se estableció el ancho de cada tira, el cual, dependiendo de la muestra y de la dirección molecular, fluctuó entre 9 y 25 mm. Se marcó el ancho de cada tira en la muestra, el cual fue medido a una escuadra para evitar errores de paralelismo; así mismo, se cortó a escuadra cada tira, con un largo, que dependiendo de la muestra y de la dirección molecular, fluctuó entre 100 y 150 mm. Este proceso de corte se realizó en DM y en DT.

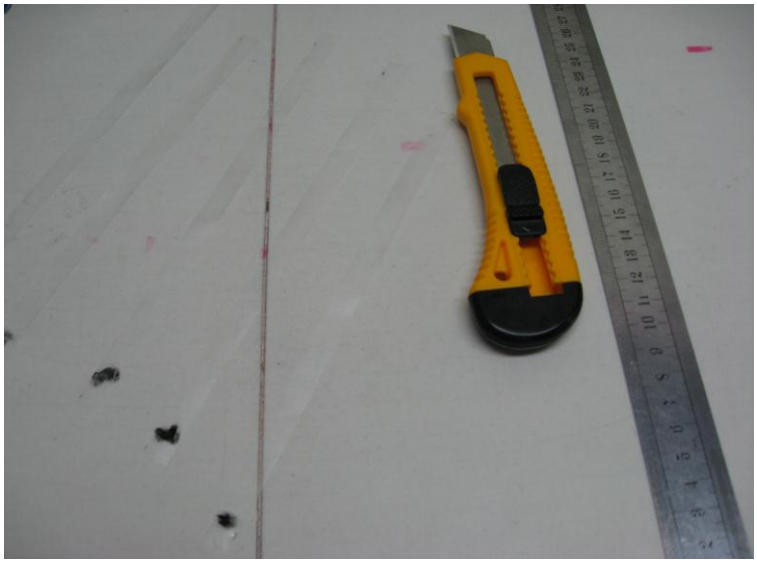


FIGURA 3.4 CORTE DE TIRAS

4. Se procedió a medir el espesor de cada tira, en un micrómetro de precisión, como se muestra en la siguiente figura:

FIGURA 3.5 MEDICIÓN DE ESPESORES

Se identificó cada tira con un número o una letra, y se anota el espesor en un papel para cada una de las tiras identificadas.

5. Se procedió a probar cada tira en la máquina de tracción y elongación, para esto se ubicó la tira con sumo cuidado entre las mordazas, tratando en lo posible, de que el eje longitudinal de la tira quede alineado con el centro de cada una de las mordazas; además de la alineación, debe coincidir la dirección molecular con la dirección de halado de las mordazas. Luego de la ubicación de la tira, se sujeta con cuidado, para que no ocurra ninguna imperfección en la misma. Estos cuidados generarán datos fidedignos de tensión y elongación.

(a) Tira entre mordazas

(b) Sujeción de tira

(c) Tira en dirección de halado

FIGURA 3.6 UBICACIÓN DE LA TIRA EN LA MÁQUINA DE ENSAYO DE TRACCIÓN Y ELONGACIÓN

6. Se inició el proceso de estiramiento de la tira, en el cual se llegó a la tensión y elongación máxima que puede resistir y tener la tira.

(a)

(b)

(c)

d)

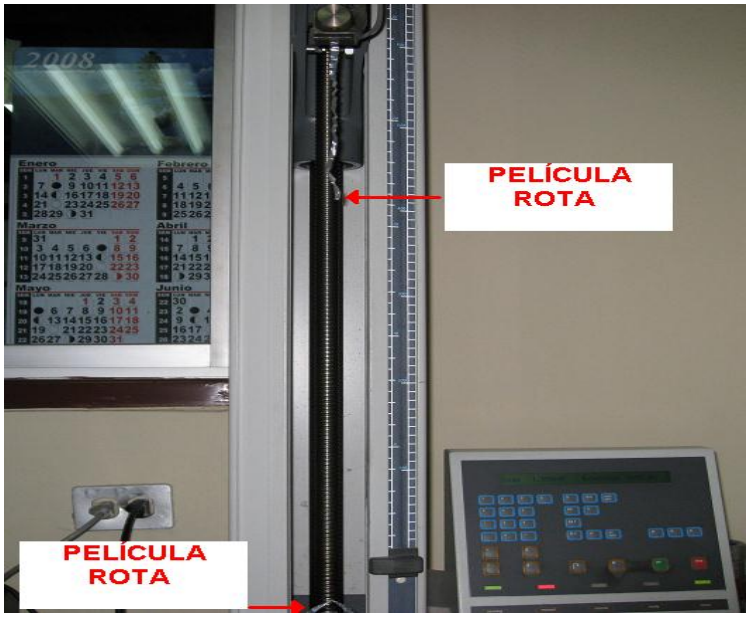


FIGURA 3.7 ESTIRAMIENTO DE TIRA

Como se observa en la Figura 3.7, la tira se estiró hasta romperse, en el instante que se rompa la máquina dejará de estirar y las mordazas regresarán a su posición inicial, registrándose en la pantalla digital de la máquina el valor de la fuerza de tensión con que se rompió la tira, además de la elongación que tuvo la tira hasta su ruptura.

El valor de la fuerza estará dado en Kg_f y la elongación se registrará en *%*; la representación porcentual de la elongación significa la proporción en la cual se estira la tira respecto a su longitud original.

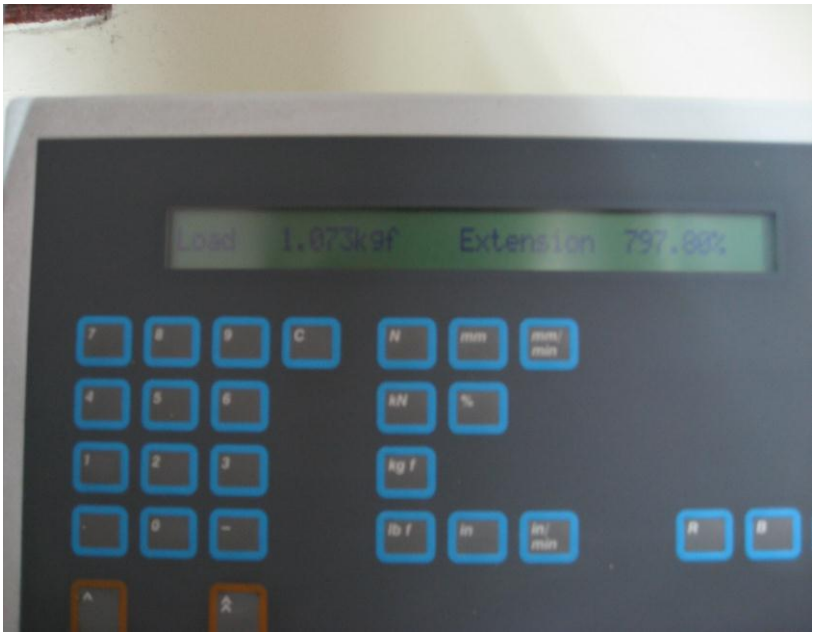


FIGURA 3.8 REGISTRO DE FUERZA Y ELONGACIÓN EN LA RUPTURA DE LA TIRA

7. Para cada tira de la muestra se anotan los valores de fuerza de tensión y elongación con los cuales falló o se rompió la tira. Para cada dirección molecular, se escogieron los tres valores más concurrentes, con los cuales se obtuvo un promedio de fuerza de tensión y elongación; con el promedio de la fuerza de tensión y del área transversal de las tiras, se procedió a realizar el cálculo de resistencia a la tensión de la película para cada dirección molecular, mediante la Ecuación 2.12:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A}$$

Como ya se conoce, σ_r es el esfuerzo de tensión con el cual se rompe la tira. Para cada muestra y en cada dirección molecular, al reemplazar la fuerza de tensión promedio con la cual fallan las tiras (F_r) y el área transversal promedio de las mismas (A), en la Ecuación 2.12, se obtuvo la resistencia a la tensión de la película (σ_r). Este valor de resistencia a la tensión de la película se lo anota junto con el valor de elongación promedio, para la dirección de cada muestra.

Ahora que se ha narrado este ensayo, se procede a mostrar la tabla de resultados del mismo, en la cual consta la resistencia a la tensión y elongación de la película, para cada dirección y muestra. Estos resultados servirán para establecer relaciones entre la materia prima, condiciones de procesamiento y propiedades mecánicas, objetivo que se busca para saber de qué manera influye la materia prima y las condiciones de procesamiento en las propiedades mecánicas de las películas, por lo menos en las de HDPE. A continuación se muestra la tabla:

TABLA 8

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN Y ELONGACIÓN PARA LAS DIFERENTES MUESTRAS

MUESTRAS	RESISTENCIA TENSIÓN		ELONGACIÓN	
	DM (Kg_f/cm^2)	DT (Kg_f/cm^2)	DM (%)	DT (%)
MI_1	294,17	245,26	586,10	1071,50
MI_2	316,73	279,10	797,80	737,80
ρ_1	332,96	294,72	691,20	804,50
ρ_2	294,17	245,26	586,10	1071,50
$FLUJO_1$	542,10	342,29	296,10	565,17
$FLUJO_2$	567,82	435,93	272,80	522,80
FH_1	337,50	221,86	260,46	474,14
FH_2	542,10	342,29	296,10	565,17
DDR_1	542,10	342,29	296,10	565,17
DDR_2	659,33	220,49	323,67	500,73
BUR_1	384,79	175,79	383,59	645,66
BUR_2	593,26	241,05	462,80	755,09

3.3.2 Resistencia al Impacto

La obtención de los datos de resistencia al impacto se los obtuvo mediante el ensayo ASTM D-1709 y se describió en el Capítulo 2. A continuación se narra el desarrollo del ensayo para la obtención de los valores de resistencia al impacto, para las muestras que se estudian en esta tesis:

1. Se debe calibrar la altura de la máquina de ensayo, es decir, dejar una altura entre la mordaza inferior y la mordaza superior, para que al conectar el dardo en la mordaza superior, haya la altura de 660 $\pm$ 10 mm entre la punta de la semiesfera del dardo hasta el nivel donde se encontrará la película en la mordaza inferior.

2. Se revisa que el sistema neumático de la máquina de ensayo esté funcionando adecuadamente, es decir, que la mordaza superior sostenga el dardo y lo deje caer cuando se le ordene, así también con la mordaza inferior, que sostenga y deje libre la película cuando se le ordene.

3. Realizar el corte de las tiras para las diferentes muestras. Tiras de 165 mm de ancho con un largo de al menos 1320 mm.

FIGURA 3.9 CORTE DE TIRAS DE LAS MUESTRAS

4. Se separa cada sección de prueba en la tira, con un marcador se traza una línea en dirección transversal a la longitudinal, cada 165 mm de longitud de la tira. Además de la separación, se anota con un marcador el número de la sección de prueba.

FIGURA 3.10 SEPARACIÓN DE SECCIONES DE PRUEBA

5. Se mide el espesor de cada sección de prueba, mediante el micrómetro de precisión. El espesor de cada sección debe irse anotando en un papel para cada muestra.

FIGURA 3.11 MEDICIÓN DE ESPESORES EN SECCIONES DE PRUEBA

6. Para ubicar la sección de prueba en la mordaza inferior, hay que extenderla bien para que al ser sujetada por dicha mordaza, pueda esta sección obtener la mayor reacción al impacto. Hay que extender la sección de prueba con las manos fuera de la mordaza.

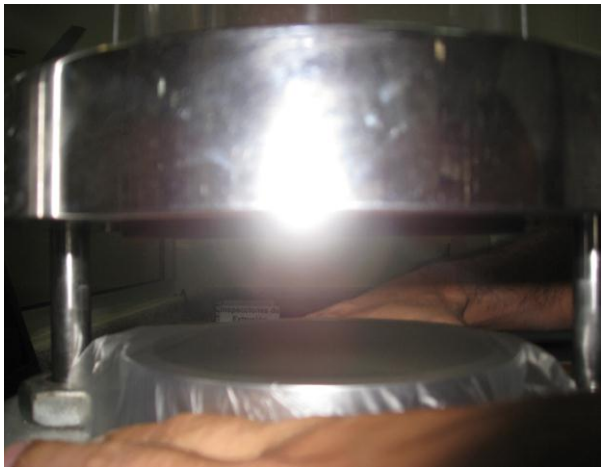


FIGURA 3.12 UBICACIÓN DE LA SECCIÓN DE PRUEBA EN LA MORDAZA INFERIOR

7. Se obtiene el peso de la cabeza hemisférica, del anillo y del vástago del dardo. Se anota el peso de estos tres componentes para obtener una referencia con respecto al peso que se añadirá.

FIGURA 3.13 PESAJE DE LA CABEZA HEMISFÉRICA DEL ANILLO Y DEL VÁSTAGO DEL DARDO

8. Se añaden los pesos cilíndricos para armar el dardo y así obtener el peso de prueba, el cual puede ser cualquiera en primera instancia,; por lo tanto, la cantidad de pesos cilíndricos que se añaden queda a criterio de la persona que realiza el ensayo.

FIGURA 3.14 PESAJE DEL DARDO

9. Se coloca el peso de prueba en la mordaza superior, la cual lo sujeta hasta que se de la orden de soltarlo para que caiga libremente sobre la sección de película que se está probando. Sería prudente, que antes de ubicar el dardo en la mordaza superior, se vuelva a probar el sistema neumático de la misma, para estar seguros de que la mordaza superior soltará el dardo cuando se le ordene.

FIGURA 3.15 UBICACIÓN DEL DARDO EN LA MORDAZA SUPERIOR

10. Una vez que se da la orden de soltar el dardo, éste cae libremente sobre la sección de película que se está probando. En un papel se anota si la sección de prueba se rompe o no al recibir el impacto del dardo. A continuación se muestra un formato de la tabla que debe utilizarse para el registro de los resultados.

TABLA 9

APUNTES DE RESULTADOS DE PRUEBA DE IMPACTO

DDR_2		
Peso (g)	**Espesor (μ)**	**Rompió**
15,3	10,16	No
22,7	10,16	No
32,7	7,62	No
37,7	7,62	No
52,6	7,62	Sí
47,6	10,16	Sí
42,6	7,62	Sí
37,6	7,62	No
42,6	7,62	No
42,6	7,62	No
42,6	7,62	Sí

En la Tabla 9 se observa que para cada muestra se apunta el peso de prueba que se utiliza en cada sección, el espesor de la misma y como resultado se anota si la sección “Sí” rompió ó “No” rompió al ser sometida a la prueba de impacto.

También se observa que el peso de prueba va cambiando según la reacción de cada sección; este proceso de cambio en el peso de prueba se va realizando hasta obtener el peso con el cual la película rompe en el 50% de las pruebas que se realizan con dicho peso, el cual sería la resistencia al impacto de la película o de la muestra. En el caso de la muestra “DDR_2”, que muestra la Tabla 3.5, la resistencia al impacto de la muestra en mención sería el peso de prueba de ***42.6 g***.

Ahora que se ha narrado este ensayo, se procede a mostrar la tabla de resultados del mismo, en la cual consta la resistencia al impacto de cada muestra. Estos resultados servirán para establecer relaciones entre materia prima, condiciones de procesamiento y propiedades mecánicas, objetivo que se busca para saber de qué manera influye la materia prima y las condiciones de procesamiento en las propiedades mecánicas de las películas, por lo menos en las de HDPE. A continuación se muestra la tabla:

TABLA 10

RESULTADOS DE RESISTENCIA AL IMPACTO PARA LAS DIFERENTES MUESTRAS

MUESTRAS	RESISTENCIA IMPACTO (g)
MI_1	142,60
MI_2	87,50
ρ_1	82,40
ρ_2	142,60
$FLUJO_1$	67,70
$FLUJO_2$	83,00
FH_1	57,50
FH_2	67,70
DDR_1	67,70
DDR_2	42,60
BUR_1	27,70
BUR_2	37,00

3.3.3 Transmisión de Vapor de Agua "WVTR"

Es de nuestro conocimiento que la obtención de los datos de WVTR los obtuvimos mediante el ensayo ASTM E-96, el cual se describió en el Capítulo 2. A continuación se narrará el desarrollo del ensayo para la obtención de los valores de WVTR, con los cuales se estableció la permeabilidad para cada una de las muestras que se estudiaron en esta tesis:

1. Para no transmitir humedad a las películas, al manipularlas con las manos, se utilizó guantes de látex.

2. En la incubadora, se desarrolló la atmósfera a la cual estarían sometidos los pouches, al ir introduciendo agua líquida en un recipiente que se encontraba en el interior de la incubadora y al ir manipulando el control de temperatura de la incubadora. De esta manera se llegó las condiciones de humedad relativa y de temperatura requeridas:

    - Guayaquil: 70% HR, 32ºC
    - Quito: 50% HR, 23ºC

Cada ambiente se desarrolló en una incubadora diferente, para poder medir el WVTR de las muestras en diferentes atmósferas, y así observar la influencia de la humedad y la temperatura en la permeabilidad.

Cuando se introducía agua, se lo hacía en el menor tiempo posible, para que la incubadora no permanezca abierta por mucho tiempo y así no se alteren los resultados de WVTR. De la misma manera se procedía con el hidrómetro, el cual servía para controlar la humedad de la atmósfera desarrollada en la incubadora.

A continuación se muestran fotos de una de las incubadoras y del hidrómetro, herramientas que se utilizaron para la realización del ensayo de WVTR:

(a) Incubadora

(b) Hidrómetro

FIGURA 3.16 INCUBADORA E HIDRÓMETRO EN LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE WVTR

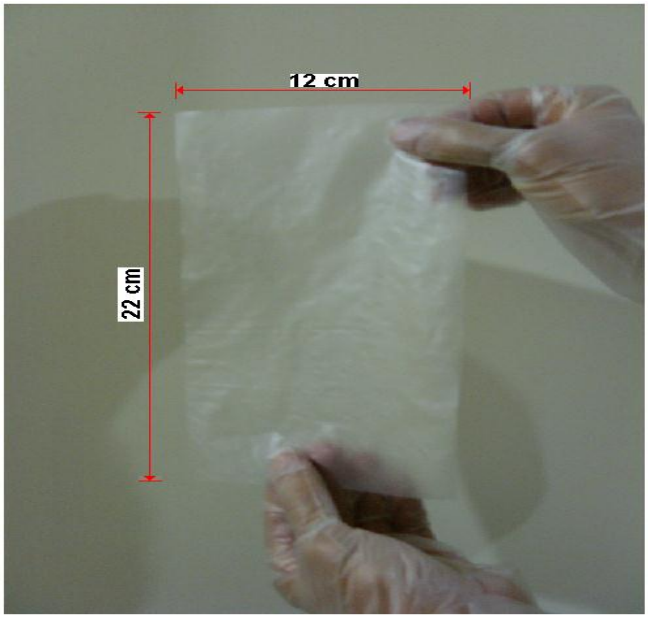
En la Figura 3.16, se muestra al hidrómetro midiendo la humedad relativa y la temperatura del laboratorio donde se encontraban los equipos y materiales para la realización del ensayo de WVTR. Esta medición sirvió para controlar el ambiente del laboratorio, cuya humedad relativa debía estar en un rango de 50–52% y cuya temperatura en un rango de 20 – 22ºC.

3. Para la obtención de los pouches, se empezó cortando pedazos de muestras de 22 cm x 12 cm. Se cortaron 6 pedazos por cada muestra, para lograr manufacturar 6 pouches de cada muestra:

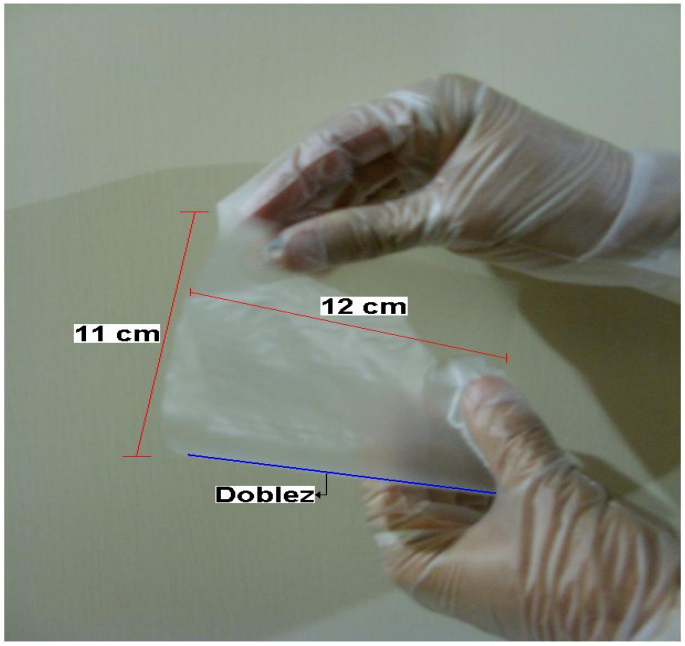
- 3 pouches se someterían a la atmósfera de Guayaquil;
- los 3 pouches restantes se someterían a la atmósfera de Quito.

Cada pedazo de muestra se doblaba por la mitad del lado más largo, o sea, por el lado que medía 22 cm. Al pedazo doblado se lo sellaba térmicamente en los dos lados donde se realizó el doblez; estos lados sellados térmicamente, medían 11 cm cada uno, cada lado se sellaba a 1 cm de su borde. A continuación se observan las fotos que detallarán lo explicado en este párrafo:

(a) Pedazo de muestra



(b) Pedazo de muestra doblado



(c) Sellado térmico en los lados del doblez

FIGURA 3.17 CORTE, DOBLEZ Y SELLADO DE PEDAZO DE MUESTRA

Luego de haber sellado térmicamente los dos lados de 11 cm, se precedió a ubicar con un marcador suave, una denotación en el pouch, la cual señalaba la muestra de la cual se obtuvo, la atmósfera a la cual se sometería, y el

número de pouch (1, 2 ó 3). La Figura 3.18 mostrará cómo se ubicó la denotación en un pouch:

FIGURA 3.18 DENOTACIÓN EN EL POUCH

4. Se taró la balanza en "**0 g**", con lo cual se procedió a llenar cada pouch de **25 g** de desecante, en el menor tiempo posible. El peso del pouch fue prácticamente despreciable, por lo cual se taró la balanza en "0 g" y se procedió a medir el peso del desecante envasado en el pouch, junto con el mismo envase. A continuación se muestran dos fotos, una de las cuales muestra la balanza

en el instante de tararla y la otra foto muestra al desecante.

(a) La tara del Pouch en la Balanza

(b) Desecante

FIGURA 3.19 BALANZA Y DESECANTE

En el primer pouch, cada vez que se envasaba un poquito de desecante, se pesaba, hasta que se llegó a los 25g de desecante dentro del pouch, con lo cual se observó que los 25 g de desecante ocupaban la ¼ parte del pouch; esto ayudó a que el envasado de los 25 g de desecante, en los demás pouches, sea más rápido.

Para cada pouch, una vez que se llenaba de 25g de desecante, inmediatamente se sellaba el lado superior horizontal del pouch, o sea, el lado que mide 12 cm y que se encontraba abierto para poder envasar el desecante en el pouch; justo antes de sellar el lado superior, se expulsaba prácticamente todo el aire que se encontraba en el interior del pouch, ya que luego se asumiría **cero "0"** la presión parcial de vapor de agua en el interior del pouch.

Luego de haber sellado el lado superior horizontal, inmediatamente se introducía el pouch en la atmósfera controlada. En las siguientes fotos se observa el pesaje del desecante, la selladora térmica y el pouch sellado completamente en el instante de introducirlo a la atmósfera controlada de la incubadora:

(a) Pesaje del desecante

(b) Selladora térmica

(c) Introducción del Pouch en la Incubadora

FIGURA 3.20 PESAJE, SELLADO TÉRMICO E INTRODUCCIÓN DEL POUCH EN LA INCUBADORA

5. Para cada pouch, luego de haberse introducido por primera vez en la atmósfera controlada, se anota en un papel la fecha y la hora en que se introdujo, lo cual sirve de referencia para las futuras extracciones de los pouches. Se estableció una frecuencia de extracción, la cual fue de **1 día**, es decir, cada día se extraían los pouches de la incubadora, uno por uno, para el pesaje de cada uno de ellos, el cual se anotaba en un papel. Luego de la determinación del peso de cada pouch, se introducían inmediatamente en la incubadora.

La maniobra diaria de extracción e introducción de cada pouch, se la realizó por un lapso de **5 días**, al cabo de los cuales se terminó de desarrollar una tabla con el peso de cada día para cada pouch. La tabla en mención se utilizó para el cálculo del WVTR, el cual es igual al cociente entre el flujo másico y el área de flujo; luego de calcular el WVTR, se procedió a calcular la permeabilidad, con las fórmulas y métodos del ensayo ASTM E-96, que se establecieron en el Capítulo 2.

A continuación se muestra un ejemplo en el cual se observa la manera de aplicar las fórmulas y los métodos del ensayo ASTM

E-96, que se establecieron en el Capítulo 2 para el cálculo del WVTR y la permeabilidad:

- **Muestra:** DDR_2

De esta muestra se obtuvo 6 pouches, los cuales se sometieron a diferentes atmósferas, 3 de ellos se sometieron a la atmósfera de Guayaquil y los 3 restantes se sometieron a la atmósfera de Quito. A continuación se muestra una tabla, en la cual se han apuntado los pesos de los pouches en mención para cada día:

TABLA 11

PESO GANADO POR LOS POUCHES DE LA MUESTRA DDR_2

	DÍAS					
	0	1	2	3	4	5
Pouch	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)	Peso 4 (g)	Peso 5 (g)	Peso 6 (g)
DDR_2 - QUITO - #3	20,71	20,89	21,07	21,26	21,46	21,67
DDR_2 - QUITO - #2	21,23	21,38	21,54	21,72	21,9	22,09
DDR_2 - QUITO - #1	21	21,16	21,36	21,56	21,77	22
PROMEDIO	20,98	21,14	21,32	21,51	21,71	21,92
DDR_2 - GUAYAQUIL - #3	20,69	21,17	21,68	22,2	22,75	23,27
DDR_2 - GUAYAQUIL - #2	20,63	21,11	21,59	22,08	22,62	23,14
DDR_2 - GUAYAQUIL - #1	20,78	21,41	22,01	22,54	23,11	23,77
PROMEDIO	20,70	21,23	21,76	22,27	22,83	23,39

En la Tabla 11 se observa la manera de procesar los valores de los pesos que se obtenían cada día para cada pouch. Se procedió a calcular el promedio de los pesos para los 3

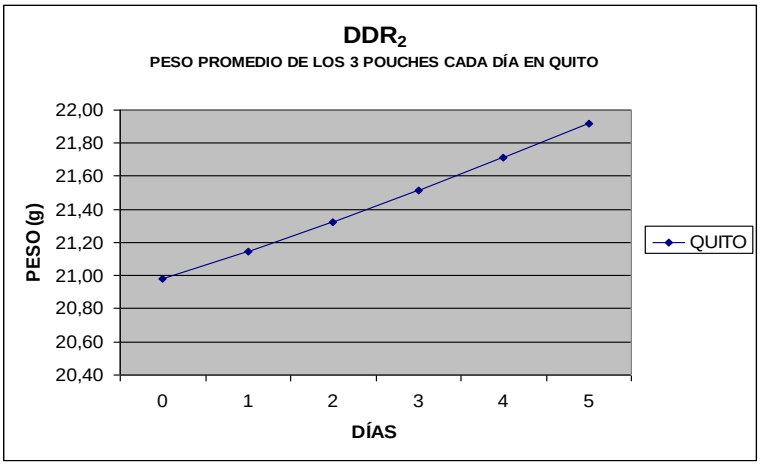
pouches de Quito y para los 3 pouches de Guayaquil, cada día; dichos promedios sirvieron para obtener el flujo másico promedio de vapor de agua que ingresó a los pouches, tanto de Guayaquil como de Quito, durante los 5 días de permanencia en su respectiva incubadora.

Para la obtención del flujo másico promedio de vapor de agua de la muestra DDR_2, para cada atmósfera, se desarrollaron dos gráficas para cada ambiente, a partir de los promedios obtenidos. A continuación se explicará, para la atmósfera de Quito, el desarrollo de las gráficas en mención:

- ***Quito***

  Mediante los promedios que muestra la Tabla 11, respecto a los pouches de la muestra DDR_2 que se sometieron a la atmósfera de Quito, se desarrollaron dos gráficas. La primera gráfica mostraría el promedio de los pesajes de cada día; la segunda gráfica sería una tendencia lineal de la primera gráfica, tendencia que indicaría el flujo másico promedio de vapor de agua en Quito. Las dos gráficas que se desarrollaron para los pouches de la muestra DDR_2 que se sometieron al ambiente de Quito, son las que se muestran en la Figura 3.21, a continuación:

(a) peso promedio de los 3 pouches de la muestra ddr_2, cada día en la atmósfera de quito



(b) Flujo másico promedio de vapor de agua para los pouches de la muestra ddr_2 que se sometieron a la atmósfera de quito

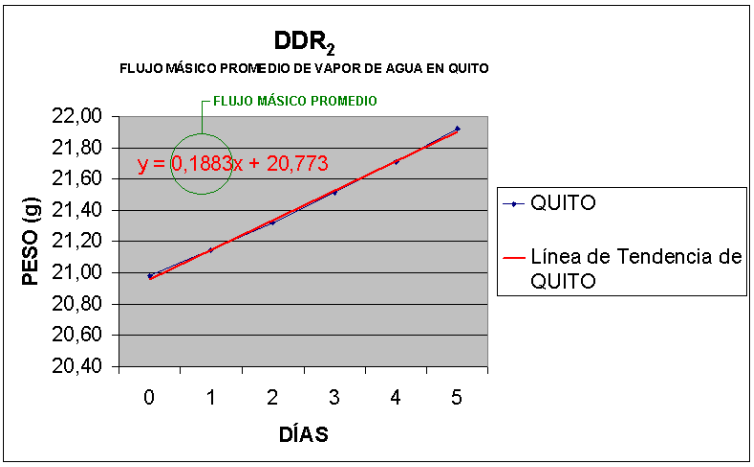


FIGURA 3.21 GRÁFICAS DE LOS POUCHES DE LA MUESTRA DDR_2 EN QUITO

Como se mencionó, la primera gráfica es una curva que representa el promedio de los pesajes de los 3 pouches DDR_2 para cada día. En dicha curva se observa, que el promedio de los pesajes va aumentando en el transcurso de los días, lo cual indica que los pouches ganaron vapor de agua en la atmósfera de Quito, a lo largo de los 5 días. El peso total promedio ganado de vapor de agua, sería igual al pesaje promedio al quinto día menos el pesaje promedio de los pouches justamente antes de introducirse a la incubadora por primera vez.

La pendiente de la primera gráfica sería igual al flujo másico de vapor de agua que ha ingresado a cada pouch DDR_2, ya que dicha pendiente es igual al cociente entre el peso promedio de vapor de agua, en gramos, que ha ganado cada pouch y el tiempo, en días, que ha transcurrido para ganar dicho peso.

La pendiente de la primera gráfica no permanece igual durante los 5 días en que los pouches se encuentran en la incubadora, lo cual nos indica que el flujo másico de vapor de agua tampoco permanece constante durante el mismo lapso de tiempo.

El hecho de que la pendiente de la primera gráfica o que el flujo másico de vapor de agua, no permanezca igual durante los 5

días en que los pouches están en la incubadora, impide que se defina un flujo másico único para cada uno de los pouches DDR_2, a través de la primera gráfica.

Para obtener un flujo másico único para cada uno de los pouches DDR_2 en Quito, se debe desarrollar una curva que sea completamente lineal, ya que la característica principal de una curva completamente lineal, es una pendiente constante. Por esta razón se procedió a desarrollar una curva completamente lineal que se acercara lo más que se pueda a la primera gráfica, con lo cual se obtuvo la segunda gráfica que se muestra en la Figura 3.21.

La segunda gráfica es una curva completamente lineal de color rojo que, como se puede observar, prácticamente cubre la totalidad de la primera gráfica, o sea, los pesajes de la segunda gráfica se acercan muy bien a los pesajes de la primera gráfica.

Cabe mencionar que la segunda gráfica es una tendencia lineal de la primera, razón por la cual se la denominó **"*Línea de Tendencia de QUITO*".**

La Línea de Tendencia de QUITO tiene una pendiente constante, lo que significa que, a través de dicha gráfica, se

obtendrá un flujo másico único para cada uno de los pouches DDR_2 en Quito.

La pendiente de la segunda gráfica se encuentra encerrada en una circunferencia verde, que indica que esta pendiente es igual al flujo másico único para cada uno de los pouches DDR_2 en Quito. Dicho flujo másico único es el flujo másico promedio de vapor de agua que ha ingresado en los pouches de la muestra DDR_2 en Quito, el cual es igual a **0.1883 g/día**, según nos indica la segunda gráfica.

Una vez que se obtuvo el flujo másico promedio de vapor de agua que ha ingresado en los pouches de la muestra DDR_2 en Quito, se procedió a realizar los cálculos para la obtención del WVTR y la permeabilidad de los pouches en mención.

Para el cálculo del WVTR se procedió a aplicar la Ecuación 2.20, la cual se mostró en el Capítulo 2:

$$WVTR = \frac{q}{At}$$

Esta ecuación indica que la Transmisión de Vapor de Agua ($WVTR$), es el cociente entre el flujo másico ($\frac{q}{t}$) y el área de flujo (A).

El flujo másico ya se obtuvo mediante el desarrollo de las gráficas de la Figura 3.21, flujo que resultó igual a *0.1883 g/día*; el área de flujo, luego de haber sellado todos los lados del pouch, es igual a 2 veces 10 cm x 10 cm, o sea, 200 cm^2.

Los valores de flujo másico y de área de flujo para los pouches DDR_2 en Quito, se reemplazaron en la Ecuación 2.20 y se obtuvo el siguiente valor de Transmisión de Vapor de Agua:

$$WVTR = 0.00094 \frac{g}{día \cdot cm^2}$$

Para el cálculo de la permeabilidad se utilizó la Ecuación 2.14, la cual se mostró en el Capítulo 2:

$$P = WVTR \frac{l}{\Delta p_p}$$

Se observa en la Ecuación 2.14, que la permeabilidad (P) depende de tres variables:

- ✓ La transmisión de vapor de agua ($WVTR$);
- ✓ El espesor del pouch (l);
- ✓ La diferencia de las presiones parciales que existe entre el interior y el exterior del pouch (Δp_p).

La transmisión de vapor de agua para cada uno de los pouches DDR_2 en Quito, ya se calculó, obteniendo un valor de $0.00094\frac{g}{día \cdot cm^2}$.

El espesor de cada uno de los pouches DDR_2, es igual al espesor de la película DDR_2. y tiene el siguiente valor:

$$l = 9.93\mu$$

El valor del espesor para cada uno de los pouches DDR_2, tiene como unidad la *micra* (μ), unidad que es equivalente a la ***milésima de milímetro***.

La diferencia de las presiones parciales para cada uno de los pouches DDR_2, en Quito, se obtuvo de la siguiente manera:

La presión parcial de vapor de agua al interior del pouch se asumió igual a ***cero*** "**0**", ya que el desecante absorbía la humedad en el interior del empaque.

La presión parcial de vapor de agua al exterior del empaque, se calculó a través de las tablas de vapor, ingresando en ellas con la temperatura del ambiente en el exterior del empaque, en este caso, se ingresó a las tablas con la temperatura de la atmósfera controlada de Quito (23 ºC), temperatura que indicó en la tabla una presión de saturación para el vapor de agua de **0.02810 bar**, cuya unidad se convirtió en *mm Hg*, con lo cual la presión de saturación para el vapor de agua a la temperatura de la atmósfera controlada de Quito, resultó **21.08 mm Hg**.

A continuación se muestra una tabla de la cual se obtuvo la presión de saturación para el vapor de agua, a la temperatura de Quito. La tabla contiene únicamente datos de la región de saturación para el agua; las dos columnas del lado izquierdo contienen los valores de temperatura (ºC) y de presión (bar). En la primera columna se ingresó con el valor de 23 ºC, para obtener su respectiva presión de saturación:

TABLA 12

AGUA SATURADA

TABLA A-2* Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas.

H_2O

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m^3/kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		Temp. °C
		Líquido sat. $v_f \times 10^3$	Vapor sat. v_g	Líquido sat. u_f	Vapor sat. u_g	Líquido sat. h_f	Vaporización h_{fg}	Vapor sat. h_g	Líquido sat. s_f	Vapor sat. s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45

Como se mencionó, en la Tabla 11 se ingresó con la temperatura de Quito (23 ºC), la cual indicó su presión de saturación para el vapor de agua (0.02810 bar). Estos datos de temperatura y presión de saturación para el vapor de agua, resaltan dentro de un rectángulo rojo en la Tabla 11.

La presión de saturación que se muestra en la Tabla 11, tiene su equivalencia en *mm Hg*, la cual es *21.08 mm Hg*, como ya se indicó. Se realizó esta conversión de unidades porque en la permeabilidad interviene el *mm Hg* como unidad de presión.

La presión de saturación de vapor de agua, que se obtuvo en la Tabla 11, no es la presión parcial de vapor de agua al exterior del empaque, ya que las presiones de agua saturada que presenta la Tabla 11, se han registrado en un ambiente o sistema 100% húmedo, lo cual no es el caso de la atmósfera controlada de Quito, atmósfera que contenía 50% de humedad.

Para el cálculo de la presión parcial de vapor de agua al exterior del empaque, se utilizó la siguiente ecuación:

$$p_{p\,H_2O_o} = p_{H_2O} \times \frac{HR}{100\%} \quad \textbf{Ec. 3.3}$$

Donde:

- ✓ $p_{pH_2O_o}$ es la presión parcial de vapor de agua saturada en la atmósfera controlada;
- ✓ p_{H_2O} es la presión de vapor de agua saturada en un ambiente 100% húmedo;
- ✓ HR es la humedad relativa ó el porcentaje de humedad que contiene la atmósfera controlada.

En este caso, $p_{pH_2O_o}$ es la presión parcial de vapor de agua saturada en la atmósfera controlada de Quito; dicha presión tendrá como unidad el *mm Hg*. p_{H_2O} que es la presión de vapor de agua saturada, en *mm Hg*, que se obtuvo en la Tabla 3.8 (21.08 mm Hg). HR es la humedad relativa de la atmósfera controlada de Quito (50%). Se reemplazan las variables conocidas en la Ecuación 3.3, con lo cual se obtiene el valor de la presión parcial de saturación para el vapor de agua en el exterior del empaque:

$$p_{pH_2O_o} = p_{H_2O} \times \frac{HR}{100\%} = 21.08 mmHg \times \frac{50\%}{100\%}$$

$$p_{pH_2O_o} = 10.54 mmHg$$

Una vez que se obtuvo la presión parcial de vapor de agua saturada en el exterior del empaque, se procedió a calcular la diferencia de las presiones parciales de vapor de agua saturada, que existe entre el interior y el exterior del pouch, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta p_p = p_{p\,H_2O_o} - p_{p\,H_2O_i} \qquad \textbf{Ec. 3.4}$$

Donde:

- ✓ Δp_p es la diferencia de las presiones parciales de vapor de agua saturada, que existe entre el interior y el exterior del pouch;
- ✓ $p_{p\,H_2O_o}$ es la presión parcial de vapor de agua saturada en el exterior del pouch;
- ✓ $p_{p\,H_2O_i}$ es la presión parcial de vapor de agua saturada en el interior del pouch.

Como es de conocimiento, $p_{p\,H_2O_i}$ se consideró igual a ***cero*** "**0**" por la presencia del desecante en el interior del pouch. $p_{p\,H_2O_o}$ se calculó mediante la Ecuación 3.3, obteniéndose un valor de

10.54 mm Hg. Se reemplazan las variables conocidas en la Ecuación 3.4, con lo cual se obtendría el valor de Δp_p:

$$\Delta p_p = p_{p\,H_2O_o} - p_{p\,H_2O_i} = 10.54mmHg - 0mmHg$$

$$\Delta p_p = 10.54mmHg$$

Luego de conocer las variables de la Ecuación 2.14, se procedió al reemplazo de las mismas para obtener el valor de la permeabilidad para los pouches DDR_2 en Quito:

$$P = WVTR\frac{l}{\Delta p_p} = 0.00094\frac{g}{día \cdot cm^2} \times \frac{9.93\mu}{10.54mmHg}$$

$$P = 0.000885\frac{g \cdot \mu}{día \cdot cm^2 \cdot mmHg}$$

Mediante los pouches de la muestra DDR_2 que se sometieron en la atmósfera controlada de Quito, se demostró la manera de proceder para el cálculo del WVTR y de la permeabilidad, para cada una de las muestras en diferentes ambientes o atmósferas, según las fórmulas y los métodos del ensayo ASTM E-96 que se establecieron en el Capítulo 2.

Ahora que se ha narrado el desarrollo del ensayo ASTM E-96, se procede a mostrar la tabla de resultados del mismo, en la cual consta la permeabilidad de cada muestra. Estos resultados

servirán para establecer relaciones entre materia prima, condiciones de procesamiento y propiedades mecánicas, objetivo que se busca para saber de qué manera influye la materia prima y las condiciones de procesamiento en las propiedades mecánicas de las películas, por lo menos en las de HDPE. A continuación se muestra la tabla.

TABLA 13

RESULTADOS DE PERMEABILIDAD PARA LAS DIFERENTES MUESTRAS

MUESTRAS	PERMEABILIDAD	
	Guayaquil (70% HR, 32 °C)	Quito (50% HR, 23 °C)
	(g·µ/día·cm^2·mm Hg)	(g·µ/día·cm^2·mm Hg)
MI_1	388,11E-05	740,27E-05
MI_2	373,99E-05	671,93E-05
ρ_1	333,49E-05	729,47E-05
ρ_2	388,11E-05	740,27E-05
$FLUJO_1$	114,82E-05	97,53E-05
$FLUJO_2$	88,37E-05	76,25E-05
FH_1	172,34E-05	113,39E-05
FH_2	114,82E-05	97,53E-05
DDR_1	114,82E-05	97,53E-05
DDR_2	99,71E-05	81,00E-05
BUR_1	242,92E-05	373,86E-05
BUR_2	205,12E-05	330,34E-05

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En este capítulo mostraremos el análisis de los datos y resultados de las muestras, con los que se logrará un acercamiento al tipo de relación que existe entre la materia prima, las condiciones de procesamiento y propiedades mecánicas, para las películas de HDPE que han sido fabricadas mediante la extrusión de película soplada.

Para efectos de orden, se mostrará los análisis, según el orden que llevan las muestras que presenta la Tabla 12, en la cual constan los datos de materia prima, de condiciones de procesamiento y de propiedades mecánicas de cada una de las muestras. Para cada

parámetro de materia prima y de condición de procesamiento, habrá dos muestras que han sido procesadas de manera similar, y en las que sólo se ha cambiado directamente el parámetro de materia prima o la condición de procesamiento. A continuación se mencionan las muestras según los parámetros de materia prima y de condición de procesamiento que se tomaron en cuenta para analizar la influencia de los mismos sobre las propiedades mecánicas:

- **Materia Prima**

  - **Parámetro:** Melt Index (MI)

    Para el parámetro MI, tenemos las siguientes muestras:

    - ✓ MI_1
    - ✓ MI_2

  - **Parámetro:** Densidad (ρ)

    Para el parámetro ρ, tenemos las siguientes muestras:

    - ✓ ρ_1
    - ✓ ρ_2

- **Condiciones de Procesamiento**

  - **Parámetro:** FLUJO

    Para el parámetro FLUJO, tenemos las siguientes muestras:

    - ✓ $FLUJO_1$
    - ✓ $FLUJO_2$

- **Parámetro:** Altura de Enfriamiento (FH)

  Para el parámetro FH, tenemos las siguientes muestras:

  ✓ FH_1

  ✓ FH_2

- **Parámetro:** Relación de Halado (DDR)

  Para el parámetro DDR, tenemos las siguientes muestras:

  ✓ DDR_1

  ✓ DDR_2

- **Parámetro:** Relación de Soplado (BUR)

  Para el parámetro BUR, tenemos las siguientes muestras:

  ✓ BUR_1

  ✓ BUR_2

TABLA 14

DATOS Y RESULTADOS DE LAS MUESTRAS

MUESTRAS	MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO					PROPIEDADES MECÁNICAS							
	MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR	ELONGACIÓN		RESISTENCIA TENSIÓN		RESISTENCIA IMPACTO	PERMEABILIDAD		ESPESOR
								DM	DT	DM	DT		Guayaquil (70% HR, 32°C)	Quito (60% HR, 23°C)	
	(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm³)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_O)	$(\phi_{burbuja}/\phi_{dado})$	(%)	(%)	(Kg/cm²)	(Kg/cm²)	(g)	(g-µ/día-cm²-mm Hg)	(g-µ/día-cm²-mm Hg)	(µ)
MI_1	0,142	0,940	2	17,40	70	6,78	3,80	586,10	1071,50	294,17	245,26	142,60	388,11E-05	740,27E-05	54,16333
MI_2	0,232	0,940	2	17,40	70	6,78	3,80	797,80	737,80	316,73	279,10	87,50	373,89E-06	671,93E-06	59,05000
ρ_1	0,142	0,936	2	17,40	70	6,78	3,80	691,20	804,50	332,95	284,72	82,40	333,49E-05	729,47E-05	53,76667
ρ_2	0,142	0,940	2	17,40	70	6,78	3,80	586,10	1071,50	294,17	245,26	142,60	388,11E-05	740,27E-05	54,16333
$FLUJO_1$	0,110	0,943	1	32,71	97	5,25	4,20	296,10	565,17	542,10	342,29	67,70	114,82E-05	97,53E-05	8,93889
$FLUJO_2$	0,110	0,943	1	30,32	79	5,66	4,00	272,80	522,80	567,82	435,93	83,00	88,37E-06	76,26E-06	7,51111
FH_1	0,110	0,943	1	32,71	80	5,25	3,87	260,46	474,14	337,50	221,66	57,50	172,34E-05	113,39E-05	10,76667
FH_2	0,110	0,943	1	32,71	97	5,25	4,20	296,10	565,17	542,10	342,29	67,70	114,82E-05	97,53E-05	8,93889
DDR_1	0,110	0,943	1	32,71	97	5,25	4,20	296,10	565,17	542,10	342,29	67,70	114,82E-05	97,53E-05	8,93889
DDR_2	0,110	0,943	1	33,02	100	10,61	4,40	323,67	500,73	669,33	220,49	42,60	98,71E-05	81,00E-05	9,93778
BUR_1	0,110	0,943	1	44,14	47	1,83	1,47	393,59	645,66	384,79	175,79	27,70	242,92E-05	373,86E-05	35,50000
BUR_2	0,110	0,943	1	44,14	65	1,83	1,73	462,80	755,03	593,26	241,05	37,00	205,12E-05	330,34E-05	32,23889

4.1 Análisis de influencia del Melt Index (MI) sobre las propiedades mecánicas de las muestras MI_1 y MI_2

Las muestras que se fabricaron para analizar el tipo de influencia del Melt Index (MI) sobre las Propiedades Mecánicas de las películas de HDPE, fueron MI_1 y MI_2.

A continuación se muestra una tabla que indica la materia prima, las condiciones de procesamiento y las propiedades mecánicas de las muestras en su proceso de fabricación.

TABLA 15

INFLUENCIA DEL MELT INDEX (MI) SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

MUESTRAS	MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO					PROPIEDADES MECÁNICAS							
	MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR	ELONGACIÓN		RESISTENCIA TENSIÓN		RESISTENCIA IMPACTO	PERMEABILIDAD		ESPESOR
								DM	DT	DM	DT		Guayaquil (70% HR, 32°C)	Quito (50% HR, 23°C)	
	(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm³)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_1/V_2)	($\phi_{burbuja}$/$\phi_{rodillo}$)	(%)	(%)	(Kg/cm²)	(Kg/cm²)	(g)	(g-μ/día-cm²-mm Hg)	(g-μ/día-cm²-mm Hg)	(μ)
MI_1	0,142	0,940	2	17,40	70	6,78	3,80	586,10	1071,50	284,17	245,25	142,80	388,11E-05	740,27E-05	54,16333
MI_2	0,232	0,940	2	17,40	70	6,78	3,80	797,80	737,60	316,73	279,10	67,50	373,99E-05	671,93E-05	59,06000

La Tabla 15 muestra una clara influencia del MI sobre las propiedades mecánicas de las muestras, ya que al aumentar el MI, desde 0.142 hasta 0.232, se observa un cambio en las propiedades mecánicas. Los demás parámetros de materia prima y de condiciones de

procesamiento, se han mantenido constantes en las dos muestras, lo cual indica que el cambio en las propiedades mecánicas sólo se debe al cambio en el MI.

En la Tabla 14 se desarrollan gráficas de Propiedades Mecánicas Vs. MI, para las muestras MI_1 y MI_2, con las cuales se logrará un acercamiento al tipo de influencia que tiene el MI sobre cada una de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE

4.1.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. MI

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene el MI sobre la Resistencia a la Tensión y la Elongación, en películas de HDPE:

- **Resistencia a la Tensión Vs. MI**

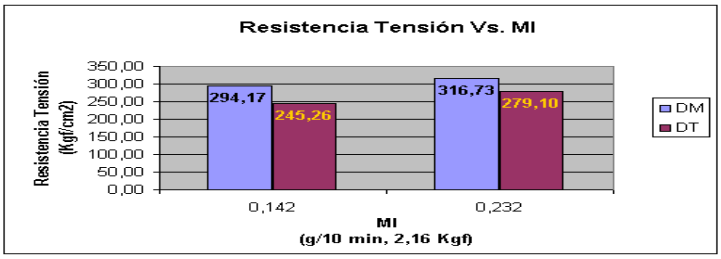


FIGURA 4.1 RESISTENCIA A LA TENSIÓN VS. MI

La Figura 4.1 muestra los valores de resistencia a la tensión en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de MI. Los valores de resistencia a la tensión en DM, están representados por las columnas de color **Azul**

Claro; los valores de resistencia a la tensión en DT, están representados por las columnas de color.

- **Dirección Máquina (DM)**

  En la Figura 4.1, se puede apreciar que en DM, la resistencia a la tensión de la muestra MI_2 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra MI_1. La diferencia que se observa en la resistencia a la tensión en DM, se debe a la diferencia en el tamaño de las moléculas de la materia prima; las moléculas más pequeñas o cortas, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia a la tensión en la misma.

  La diferencia en el tamaño de las moléculas se debe a la diferencia en el MI; mientras mayor sea el MI, más pequeñas o cortas serán las moléculas, lo que hará que éstas se estiren con mayor facilidad, mientras se enfrían en el espacio que limita FH.

  En el DM actúa la fuerza de la gravedad sobre la masa, en sentido contrario a la fuerza de estiramiento en DM, provocando que las moléculas más largas se estiren con

mayor dificultad, ya que la fuerza de gravedad actúa con mayor intensidad sobre cuerpos de mayor masa.

La fuerza de la gravedad es una de las razones por la cual las moléculas más cortas (MI mayor) se estiran con mayor facilidad que las moléculas más largas (MI menor), en DM.

También hay otra razón intrínseca, por la que las moléculas más cortas se estiren con mayor facilidad en DM. Las moléculas de la materia prima con mayor MI, se enrollarán menos en el proceso de compresión y homogeneización que se realiza en la extrusora, ya que al ser más cortas, las moléculas sufren menos rozamiento entre ellas al realizarse la compresión y homogeneización, lo cual causará que se enrollen menos. Al salir las moléculas del cabezal, menos enrolladas, se desenrollarán en menor tiempo y habrá mayor tiempo de estiramiento puro para ellas en DM. El enrollamiento que sufren las moléculas en el proceso de compresión y homogeneización que se realiza en la extrusora, es otra razón por la cual las moléculas más cortas (MI mayor) se estiran con mayor facilidad que las moléculas más largas (MI menor), en DM.

El MI de la muestra MI_2 es mayor que el MI de la muestra MI_1, lo cual indica que la muestra MI_2 tiene moléculas más cortas que la muestra MI_1, razón por la cual las moléculas de MI_2 se estiraron más en DM, produciéndose así un mayor acercamiento entre moléculas, es decir, enlaces secundarios más fuertes entre las mismas, obteniendo de esta manera, la muestra MI_2, una mayor resistencia a la tensión en DM.

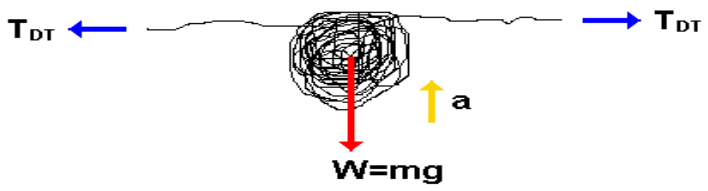
- **Dirección Transversal (DT)**

En la Figura 4.1, se puede apreciar que en DT, la resistencia a la tensión de la muestra MI_2 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra MI_1. La diferencia que se observa en la resistencia a la tensión en DT, se debe a la diferencia en el tamaño de las moléculas de la materia prima; las moléculas más cortas, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia a la tensión en la misma.

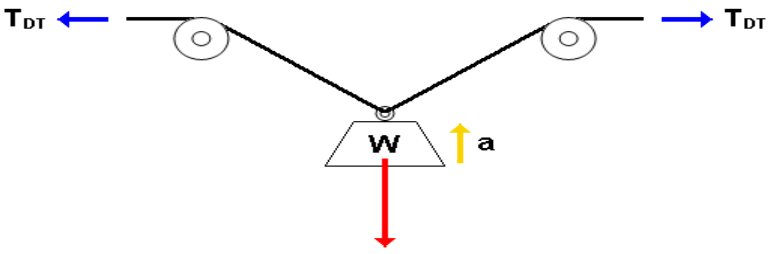
La diferencia en el tamaño de las moléculas se debe a la diferencia en el MI; mientras mayor sea el MI, más pequeñas serán las moléculas.

Al ser más cortas las moléculas, éstas se estirarán con mayor facilidad mientras se enfrían en el espacio que limita FH.

Aunque en DT no actúa la fuerza de la gravedad, ésta actúa perpendicularmente a la fuerza de estiramiento en DT; por ende, la fuerza de gravedad actúa perpendicularmente a las moléculas que se encuentran estirándose y orientándose en DT. La siguiente figura mostrará la acción de la fuerza de gravedad sobre las moléculas que se estiran y se orientan en la siguiente figura:



a) Diagrama de Cuerpo Libre de Molécula Enrollada, estirándose y orientándose en Dirección Transversal.



b) Analogía del Diagrama de Cuerpo Libre de Molécula Enrollada, estirándose y orientándose en Dirección Transversal.

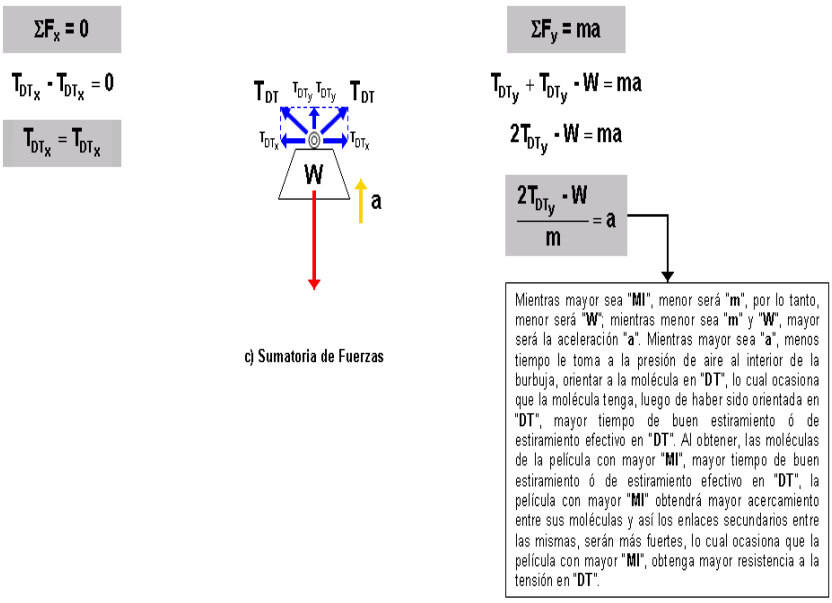


FIGURA 4.2 ACCIÓN DE LA FUERZA DE GRAVEDAD SOBRE LAS MOLÉCULAS QUE SE ESTIRAN Y SE ORIENTAN EN DT

Como se observa en la Figura 4.2, el estiramiento y orientación de las moléculas en DT es también afectado por la acción de la fuerza de gravedad. La parte enrollada de la molécula que se estira y se orienta en DT, tiene una masa que junto con la fuerza de gravedad generan un peso **W**, el cual actúa en contra de las componentes verticales de las fuerzas de tensión que se generan por la fuerza de estiramiento en DT.

Mientras más largas sean las moléculas que están siendo estiradas y orientadas en DT, mayor será el enrollamiento de las mismas, lo cual representa un mayor peso **W**, es decir,

una mayor fuerza en contra de las componentes verticales de las fuerzas de tensión que se generan por la fuerza de estiramiento en DT.

Mientras mayor es el peso **W**, es más difícil que las componentes horizontales de las fuerzas de tensión puedan estirar y orientar a las moléculas en DT, lo cual restará resistencia a la tensión, ya que las moléculas se estirarán menos, hecho que implica que las moléculas se acercarán menos, es decir, los enlaces secundarios serán más débiles.

La fuerza de la gravedad y el enrollamiento de las moléculas son las razones por las cuales las moléculas más cortas (MI mayor) se estiran con mayor facilidad que las moléculas más largas (MI menor), en DT.

El MI de la muestra MI_2 es mayor que el MI de la muestra MI_1, lo cual indica que la muestra MI_2 tiene moléculas más cortas que la muestra MI_1, razón por la cual las moléculas de MI_2 se estiraron más en DT, produciéndose así un mayor acercamiento entre moléculas, es decir, enlaces secundarios más fuertes entre las mismas, obteniendo de esta manera, la muestra MI_2, una mayor resistencia a la tensión en DT.

- **Elongación Vs. MI**

La Figura 4.3 muestra los valores de elongación en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de MI. Los valores de elongación en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los valores de elongación en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

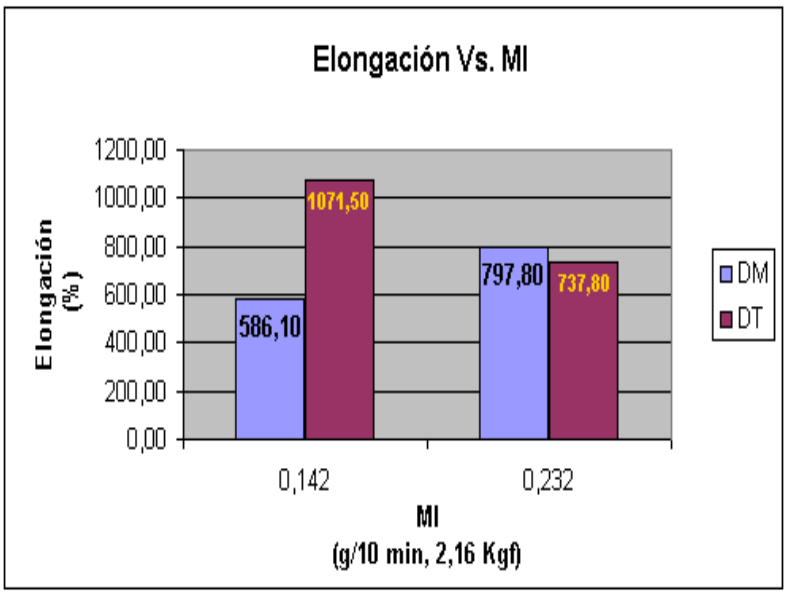


FIGURA 4.3 ELONGACIÓN VS. MI

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.3, se puede observar que en DM, la elongación de la muestra MI_2 es mayor que la elongación de la muestra MI_1. La diferencia que se observa en la

elongación en DM, se debe a la diferencia en el tamaño de las moléculas de la materia prima y al tiempo de estiramiento o relajación que hay en DM.

Las moléculas más cortas, se estiran con mayor facilidad que las moléculas más largas, lo cual, junto con el considerable tiempo de estiramiento que hay en DM, trae como consecuencia que las moléculas de la película con MI mayor, resulten más largas que las moléculas de la película con MI menor, luego del tiempo de relajación en DM.

El MI de la muestra MI_2 es mayor que el MI de la muestra MI_1, lo cual indica que la muestra MI_2 tiene moléculas más cortas que la muestra MI_1, razón por la cual las moléculas de MI_2 se estiraron más en DM, y junto con el considerable tiempo de relajación en DM, trae como consecuencia que las moléculas de MI_2 resulten más largas que las moléculas de MI_1, formando así más enlaces secundarios entre moléculas, que es la razón por la cual la muestra MI_2 tiene mayor elongación que la muestra MI_1, en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

  En la Figura 4.3, se puede observar que en DT, la elongación de la muestra MI_2 es menor que la elongación de la muestra MI_1.

  La diferencia que se observa en la elongación en DT, se debe a la diferencia en el tamaño de las moléculas de la materia prima y al tiempo de estiramiento ó relajación que hay en DT.

  Las moléculas más pequeñas o cortas, se estiran con mayor facilidad que las moléculas más largas, pero el tiempo de estiramiento que hay en DT es considerablemente corto en relación al tiempo de estiramiento en DM, que las moléculas de la película con mayor MI, no alcanzan a estirarse tanto como para lograr ser más largas que las moléculas de la película con MI menor, luego del tiempo de relajación en DT.

  El MI de la muestra MI_2 es mayor que el MI de la muestra MI_1, lo cual nos indica que la muestra MI_2 tiene moléculas más cortas que la muestra MI_1, razón por la cual las moléculas de MI_2 se estiraron más en DT, pero por el

considerablemente corto tiempo de relajación que hay en DT, en relación al tiempo de relajación en DM, las moléculas de MI_2 no logran ser más largas que las moléculas de MI_1, formando así menos enlaces secundarios entre moléculas, que es la razón por la cual la muestra MI_2 tiene menor elongación que la muestra MI_1, en DT.

4.1.2 Resistencia al Impacto Vs. MI

La siguiente gráfica ayudará a realizar un análisis de la influencia que tiene el MI sobre la Resistencia al Impacto, en películas de HDPE:

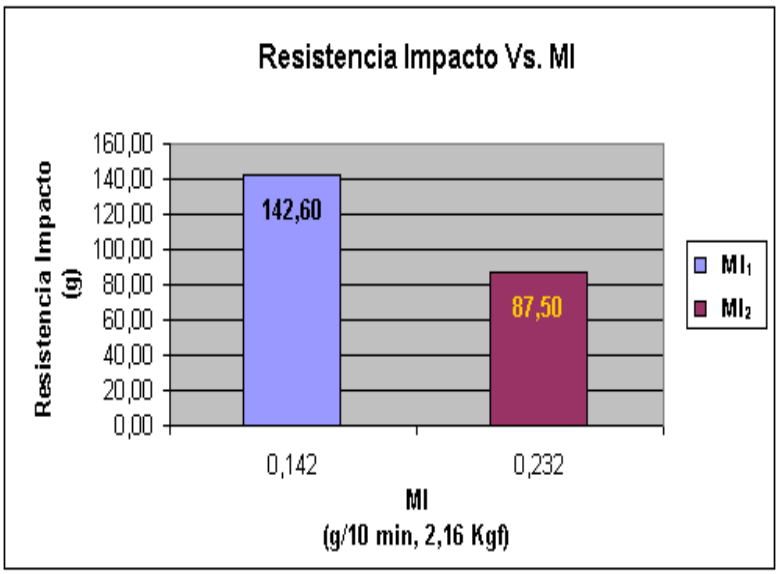


FIGURA 4.4 RESISTENCIA AL IMPACTO VS. MI

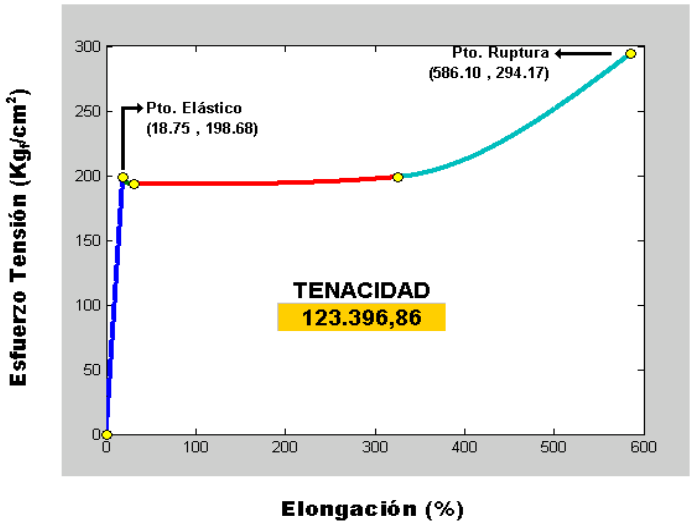
La Figura 4.4 muestra los valores de resistencia al impacto para diferentes valores de MI. El valor de resistencia al impacto para la muestra MI_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de resistencia al impacto para la muestra MI_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.4, se observa que la resistencia al impacto de la muestra MI_2 es menor que la resistencia al impacto de la muestra MI_1. La diferencia en la resistencia al impacto, se debe a la diferencia en la tenacidad de las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación que se obtuvieron para las muestras MI_1 y MI_2, en los ensayos de tensión a los cuales se sometieron dichas muestras.

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, indican la resistencia al impacto que tiene la película; dichas curvas se pueden obtener al someter la película al ensayo de tensión. Para cada película se pueden obtener dos curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, una en DM y otra en DT; entre las dos curvas, la que tiene mayor tenacidad indica la resistencia al impacto de la película.

A continuación se mostrarán las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras MI_1.y

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra MI_1.**



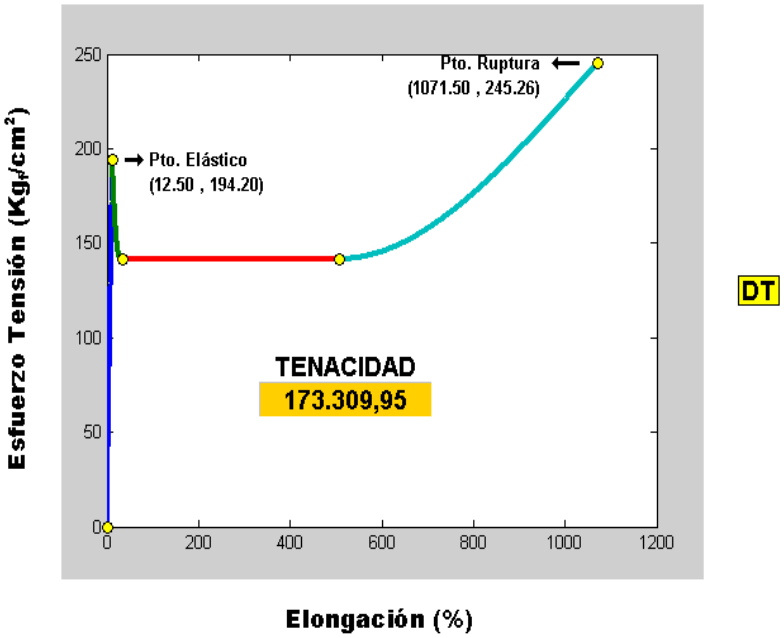
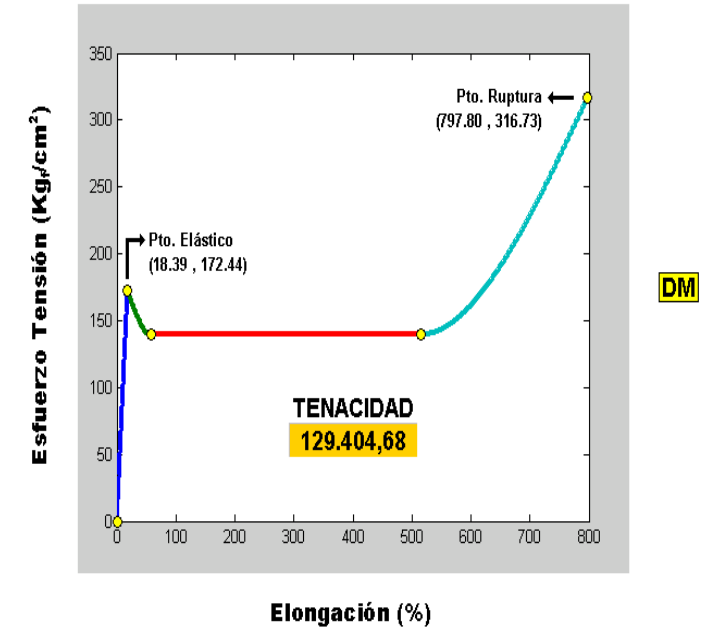


FIGURA 4.5 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA MI_1

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra MI_2**



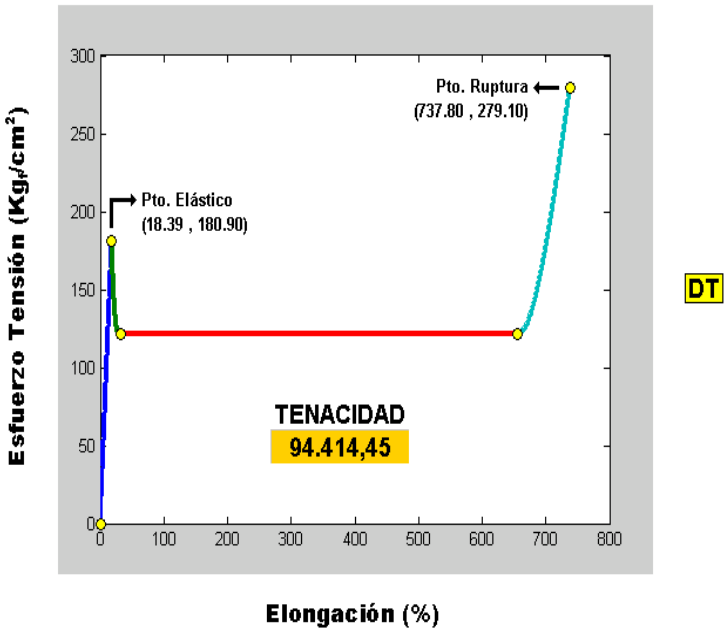


FIGURA 4.6 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA MI_2

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras MI_1 y MI_2, indican que la resistencia al impacto de la muestra MI_1 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra MI_2, ya que la muestra MI_1 alcanza una máxima tenacidad de **173.309,95** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, y la muestra MI_2 alcanza una máxima tenacidad de **129.404,68** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, con lo cual se observa que la tenacidad de la muestra MI_1 es mayor que la tenacidad de la muestra MI_2, es decir, la resistencia al impacto de la muestra MI_1 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra MI_2.

La muestra MI_1 es más tenaz que la muestra MI_2, por la longitud que alcanzaron las moléculas de MI_1 en DT. Las moléculas de MI_2 se estiraron más que las moléculas de MI_1, en DM y en DT, pero, en DT, por el corto tiempo de relajación que hay en esta dirección de halado, el estiramiento que sufrieron las moléculas de MI_2, no fue suficiente para superar la longitud de las moléculas de la muestra MI_1. Esta es la razón por la cual la elongación de la muestra MI_1 es mayor que la elongación de la muestra MI_2, lo cual le permite a la muestra MI_1 obtener mayor capacidad para absorber la energía de impacto, y así, la

resistencia al impacto de la muestra MI_1 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra MI_2, lo cual se observa en la Figura 4.4.

4.1.3 Permeabilidad Vs. MI

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene el MI sobre la Permeabilidad, en películas de HDPE:

- **Guayaquil (70% HR, 32ºC)**

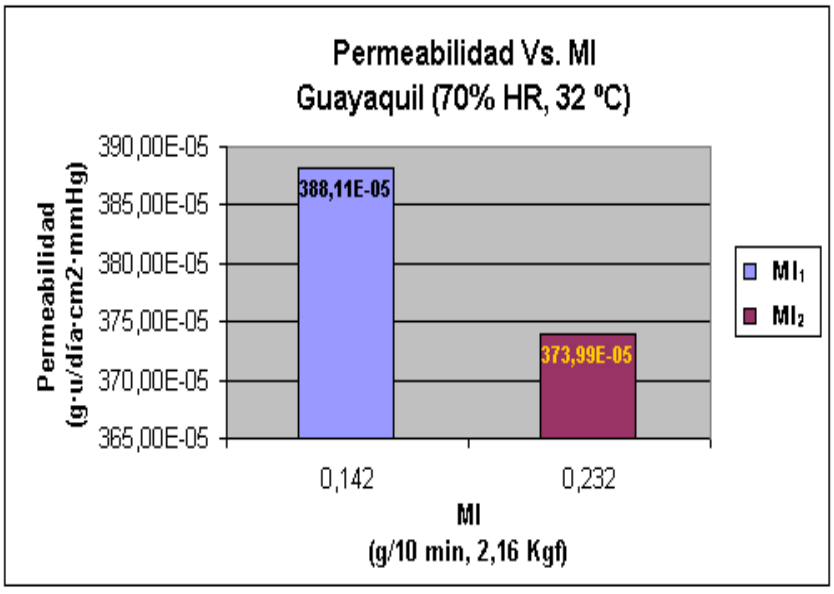


FIGURA 4.7 "PERMEABILIDAD VS. MI" EN GUAYAQUIL

La Figura 4.7 muestra los valores de permeabilidad en Guayaquil, para diferentes valores de MI. El valor de

permeabilidad para la muestra MI_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra MI_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.7, se puede observar que la permeabilidad de la muestra MI_2 es menor que la permeabilidad de la muestra MI_1, en Guayaquil.

La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en el tamaño de las moléculas de la materia prima; las moléculas más pequeñas o cortas, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Las moléculas más pequeñas se estiran con mayor facilidad en DM y en DT, y la materia prima con mayor MI, tiene moléculas más cortas. El MI de la muestra MI_2 es mayor que el MI de la muestra MI_1, lo cual indica que la muestra MI_2 ha sido mejor estirada que la muestra MI_1, es decir, la muestra MI_2 obtuvo mejor cristalinidad o mayor número de regiones cristalinas, que es la razón por la cual la muestra MI_2 tiene mayor resistencia o

barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

- **Quito (50% HR, 23ºC)**

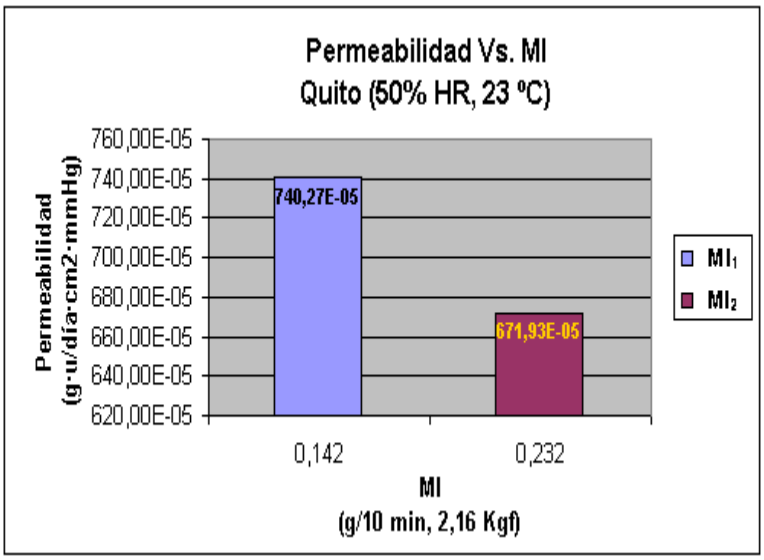


FIGURA 4.8 "PERMEABILIDAD VS. MI" EN QUITO

La Figura 4.8 muestra los valores de permeabilidad en Quito, para diferentes valores de MI. El valor de permeabilidad para la muestra MI_1, está representado por la columna de color **Azul Claro** y para la muestra MI_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.8, se puede observar que la permeabilidad de la muestra MI_2 es menor que la permeabilidad de la muestra MI_1, en Quito. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se

debe a la diferencia en el tamaño de las moléculas de la materia prima; las moléculas más cortas, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Como ya se conoce, las moléculas más pequeñas se estiran con mayor facilidad en DM y en DT, y que la materia prima con mayor MI, tiene moléculas más cortas. El MI de la muestra MI_2 es mayor que el MI de la muestra MI_1, lo cual indica que la muestra MI_2 ha sido mejor estirada que la muestra MI_1, es decir, la muestra MI_2 obtuvo mejor cristalinidad que es la razón por la cual la muestra MI_2 tiene mayor resistencia contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

4.2 Análisis de influencia de la Densidad (ρ) sobre las propiedades mecánicas de las muestras ρ_1 y ρ_2

Las muestras que se fabricaron para analizar el tipo de influencia de la Densidad (ρ) sobre las Propiedades Mecánicas de las películas de HDPE, fueron ρ_1 y ρ_2. A continuación se muestra una tabla que indica la materia prima y las condiciones de procesamiento con las que se fabricaron las muestras en mención; la tabla también indica las

propiedades mecánicas que obtuvieron las muestras en su proceso de fabricación:

TABLA 16

INFLUENCIA DE LA DENSIDAD (ρ) SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

MUESTRAS	MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO					PROPIEDADES MECÁNICAS							
	MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR	ELONGACIÓN		RESISTENCIA TENSIÓN		RESISTENCIA IMPACTO	PERMEABILIDAD		ESPESOR
								DM	DT	DM	DT		Guayaquil (70% HR, 32°C)	Quito (50% HR, 23°C)	
	(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_O)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)	(%)	(%)	(Kg/cm^2)	(Kg/cm^2)	(g)	(g·μ/día·cm^2·mm Hg)	(g·μ/día·cm^2·mm Hg)	(μ)
ρ_1	0,142	0,938	2	17,40	70	6,78	3,80	691,20	804,50	332,96	294,72	82,40	333,49E-05	729,47E-05	53,76667
ρ_2	0,142	0,940	2	17,40	70	6,78	3,80	586,10	1071,50	294,17	245,26	142,60	388,11E-05	740,27E-05	54,18333

La Tabla 16 muestra una clara influencia de ρ sobre las propiedades mecánicas de las muestras, ya que al aumentar ρ, desde 0.938 hasta 0.940, se observa un cambio en las propiedades mecánicas. Los demás parámetros de materia prima y de condiciones de procesamiento, se han mantenido constantes en las dos muestras, lo cual indica que el cambio en las propiedades mecánicas sólo se debe al cambio en ρ.

En la Tabla 4.3 se desarrollan gráficas de Propiedades Mecánicas Vs. ρ, para las muestras ρ_1 y ρ_2, con las cuales se logrará un acercamiento al tipo de influencia que tiene ρ sobre cada una de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE.

4.2.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. ρ

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene ρ sobre la Resistencia a la Tensión y la Elongación, en películas de HDPE:

- **Resistencia a la Tensión Vs. ρ**

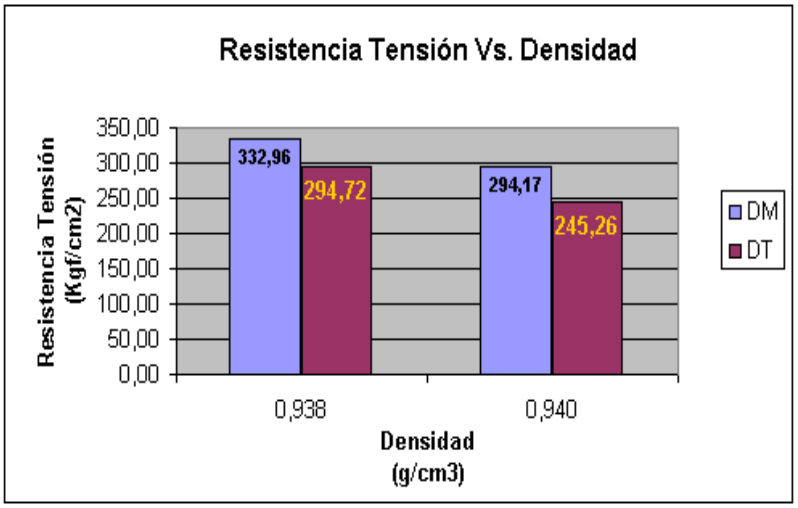


FIGURA 4.9 RESISTENCIA A LA TENSIÓN VS. ρ

La Figura 4.9 muestra los valores de resistencia a la tensión en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de ρ. Los valores de resistencia a la tensión en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los valores de resistencia a la tensión en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.9, se puede observar que en DM, la resistencia a la tensión de la muestra ρ_1 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra ρ_2. La diferencia que se observa en la resistencia a la tensión en DM, se debe a la diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima; mientras menor sea el número de moléculas por unidad de volumen, las moléculas se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia a la tensión en la misma.

La diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen, se debe a la diferencia en ρ; mientras menor sea ρ, menor será el número de moléculas por unidad de volumen. Al haber menos moléculas por unidad de volumen, éstas se estirarán con mayor facilidad mientras se enfrían en el espacio que limita FH.

En DM actúa la fuerza de la gravedad sobre la masa, fuerza que actúa en sentido contrario a la fuerza de estiramiento en DM, provocando que al haber mayor número de moléculas por unidad de volumen, éstas se estiren con mayor dificultad,

ya que la fuerza de gravedad actúa con mayor intensidad sobre cuerpos de mayor masa. La fuerza de la gravedad es una de las razones por la cual las moléculas de las muestras con menor ρ, se estiran con mayor facilidad que las moléculas de las muestras con mayor ρ, en DM.

También hay otra razón intrínseca, por la cual las moléculas de la muestra con menor ρ, se estiran con mayor facilidad en DM. Las moléculas de la materia prima con menor ρ, se enrollarán menos en el proceso de compresión y homogeneización que se realiza en la extrusora, ya que al haber menos número de moléculas por unidad de volumen, las moléculas sufren menos rozamiento entre ellas al realizarse la compresión y homogeneización, lo cual causará que se enrollen menos. Al salir las moléculas del cabezal, menos enrolladas, se desenrollarán en menor tiempo y habrá mayor tiempo de estiramiento puro para ellas en DM.

El enrollamiento que sufren las moléculas en el proceso de compresión y homogeneización que se realiza en la extrusora, es otra razón por la cual las moléculas de la muestra con menor ρ, se estiran con mayor facilidad que las moléculas de la muestra con mayor ρ, en DM.

La Densidad de la muestra ρ_1 es menor que la Densidad de la muestra ρ_2, lo cual indica que la muestra ρ_1 tiene menor número de moléculas por unidad de volumen, razón por la cual las moléculas de ρ_1 se estiraron más en DM, produciéndose así un mayor acercamiento entre moléculas, es decir, enlaces secundarios más fuertes entre las mismas, obteniendo de esta manera, la muestra ρ_1, una mayor resistencia a la tensión en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

  Mediante la Figura 4.9, se puede observar que en DT, la resistencia a la tensión de la muestra ρ_1 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra ρ_2.

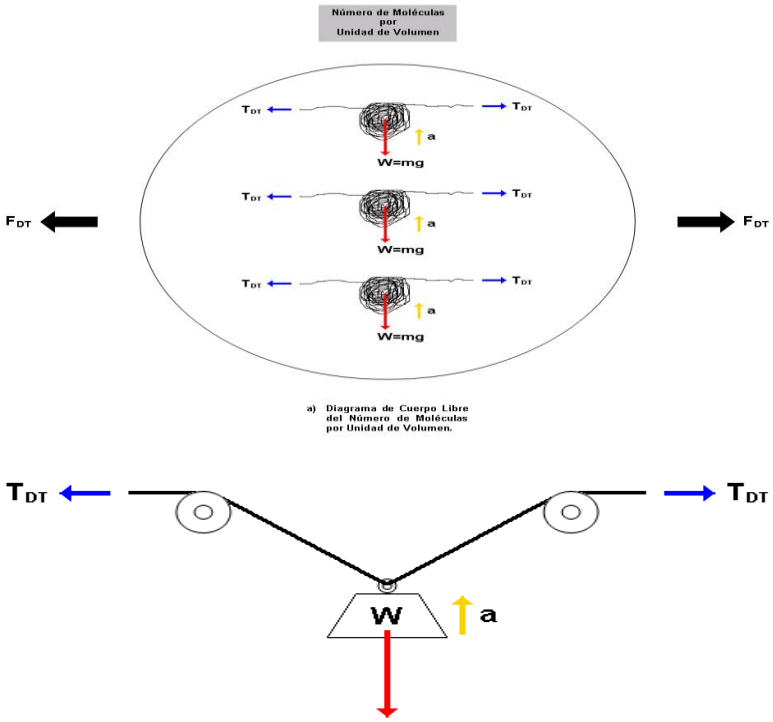
  La diferencia que se observa en la resistencia a la tensión en DT, se debe a la diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima; mientras menor sea el número de moléculas por unidad de volumen, las moléculas se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia a la tensión en la misma.

La diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen, se debe a la diferencia en ρ; mientras menor sea ρ, menor será el número de moléculas por unidad de volumen.

Al haber menos moléculas por unidad de volumen, éstas se estirarán con mayor facilidad, mientras se enfrían en el espacio que limita FH.

Al realizar el análisis de influencia del MI sobre la resistencia a la tensión de la película en DT, en la Figura 4.2 se observa la manera en que la fuerza de gravedad afecta el estiramiento en DT. En el caso actual, la fuerza de gravedad sigue afectando, en esencia, de la misma manera el estiramiento en DT, sino que, ahora la afección es por el número de moléculas por unidad de volumen, más no por el tamaño de las moléculas.

La siguiente figura mostrará la acción de la fuerza de gravedad sobre las moléculas que se estiran y se orientan en DT, para el caso de análisis actual, es decir, para el caso de análisis de influencia de ρ sobre la resistencia a la tensión en DT:



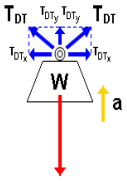
a) Diagrama de Cuerpo Libre del Número de Moléculas por Unidad de Volumen.

b) Analogía del Diagrama de Cuerpo Libre de Molécula Enrollada, estirándose y orientándose en Dirección Transversal.

$\Sigma F_x = 0$

$T_{DT_x} - T_{DT_x} = 0$

$T_{DT_x} = T_{DT_x}$



c) Sumatoria de Fuerzas

$\Sigma F_y = ma$

$T_{DT_y} + T_{DT_y} - W = ma$

$2T_{DT_y} - W = ma$

$$\frac{2T_{DT_y} - W}{m} = a$$

La presión de aire al interior de la burbuja, genera fuerzas de tensión "F_{DT}", las cuales, al haber menor "**Densidad**", se dividen para un menor "**Número de Moléculas por Unidad de Volumen**", lo cual implica que las fuerzas de tensión "T_{DT}" que actúan en cada molécula de la unidad de volumen, serán mayores. Mientras mayor sea "T_{DT}", la aceleración "**a**" será mayor, mientras mayor sea "**a**", menos tiempo le toma a la presión de aire al interior de la burbuja, orientar a la molécula en "**DT**", lo cual ocasiona que la molécula tenga, luego de haber sido orientada en "**DT**", mayor tiempo de buen estiramiento ó de estiramiento efectivo en "**DT**". Al obtener, las moléculas de la película con menor "**Densidad**", mayor tiempo de buen estiramiento ó de estiramiento efectivo en "**DT**", la película con menor "**Densidad**" obtendrá mayor acercamiento entre sus moléculas y así los enlaces secundarios entre las mismas, serán más fuertes, lo cual ocasiona que la película con menor "**Densidad**", obtenga mayor resistencia a la tensión en "**DT**".

FIGURA 4.10 ACCIÓN DE LA FUERZA DE GRAVEDAD SOBRE LAS MOLÉCULAS QUE SE ESTIRAN Y SE ORIENTAN EN DT, PARA EL CASO DE ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE ρ SOBRE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN DT

En la Figura 4.10, se observa que al haber mayor número de moléculas por unidad de volumen, menor es la fuerza de estiramiento por molécula en DT, ya que la fuerza de estiramiento resultante o total, se divide para un mayor número de moléculas. El hecho de que haya menor fuerza de estiramiento por molécula en DT, ocasiona que el peso **W** de cada molécula, ofrezca mayor resistencia al estiramiento en DT.

Como se conoce, el mayor número de moléculas por unidad de volumen, causa un mayor enrollamiento entre ellas, lo que genera un retraso en el estiramiento de las moléculas en DT.

La fuerza de gravedad y el enrollamiento son razones intrínsecas por las cuales se dificulta el estiramiento de las moléculas en DT, para las muestras con mayor número de moléculas por unidad de volumen (muestras con mayor ρ).

La Densidad de la muestra ρ_1 es menor que la Densidad de la muestra ρ_2, lo cual nos indica que la muestra ρ_1 tiene menor número de moléculas por unidad de volumen, razón por la cual las moléculas de ρ_1 se estiraron más en DT, produciéndose así un mayor acercamiento entre moléculas,

es decir, enlaces secundarios más fuertes entre las mismas, obteniendo de esta manera, la muestra ρ_1, una mayor resistencia a la tensión en DT.

- **Elongación Vs. ρ**

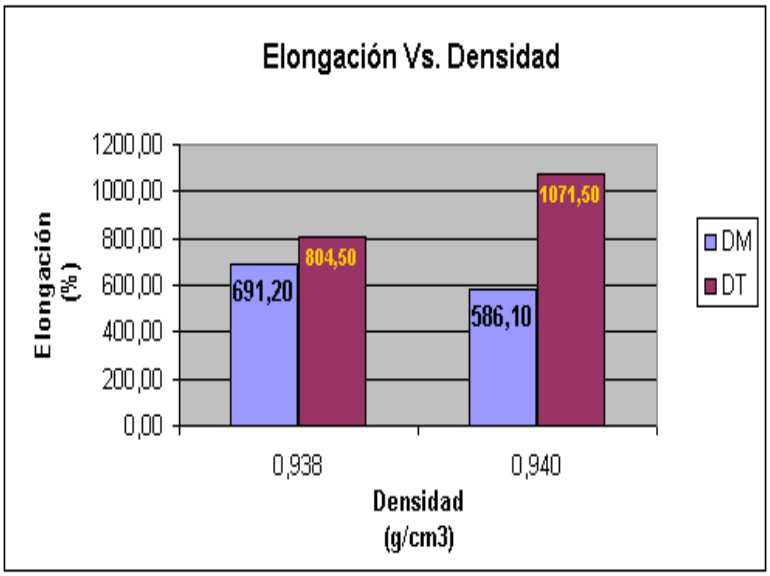


FIGURA 4.11 ELONGACIÓN VS. ρ

La Figura 4.11 muestra los valores de elongación en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de ρ. Los valores de elongación en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los valores de elongación en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

Al haber un mayor número de moléculas por unidad de volumen, habría un mayor número de enlaces secundarios entre moléculas, por unidad de volumen, es decir, habrían más enlaces secundarios que romper y así la muestra tendría mayor elongación. Esta razón nos llevaría a la conclusión que la muestra con mayor Densidad, en este caso ρ_2, es la que tendría mayor elongación, lo cual contradice a los resultados que se muestran en la Figura 4.11.

En la Figura 4.11, se puede observar que en DM, la elongación de la muestra ρ_1 es mayor que la elongación de la muestra ρ_2. La diferencia que se observa en la elongación en DM, se debe a la diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima, y al tiempo de estiramiento que hay en DM.

Las moléculas de la muestra con menor número de moléculas por unidad de volumen (menor ρ), se estiran con mayor facilidad que las moléculas de la muestra con mayor número de moléculas por unidad de volumen (mayor ρ).

La facilidad para estirarse que presentan las moléculas de la muestra con menor ρ, junto con el considerable tiempo de estiramiento que hay en DM, traen como consecuencia que las moléculas de la película con menor ρ, resulten más largas que las moléculas de la película con mayor ρ, luego del tiempo de relajación en DM.

Las moléculas de la muestra con menor ρ, logran tal longitud que los enlaces secundarios que no tienen por el menor número de moléculas por unidad de volumen, los tienen por la longitud que alcanzan, llegando a tener mayor número de enlaces secundarios que las moléculas de la muestra con mayor ρ.

La densidad de la muestra ρ_1 es menor que la Densidad de la muestra ρ_2, lo cual nos indica que la muestra ρ_1 tiene menor número de moléculas por unidad de volumen, en relación a la muestra ρ_2, razón por la cual las moléculas de ρ_1 se estiraron más en DM, y junto con el considerable tiempo de relajación en DM, trae como consecuencia que las moléculas de ρ_1 resulten más largas que las moléculas de ρ_2, formando así, la muestra ρ_1, un mayor número de enlaces secundarios que la muestra ρ_2, que es la razón

por la cual la muestra ρ_1 tiene mayor elongación que la muestra ρ_2, en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

  En la Figura 4.11, se puede observar que en DT, la elongación de la muestra ρ_1 es menor que la elongación de la muestra ρ_2. La diferencia que se aprecia en la elongación en DT, se debe a la diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima, y al tiempo de estiramiento que hay en DT.

  Las moléculas de la muestra con menor número de moléculas por unidad de volumen (menor ρ), se estiran con mayor facilidad que las moléculas de la muestra con mayor número de moléculas por unidad de volumen (mayor ρ). Las moléculas de la muestra con menor ρ, al presentar mayor facilidad para estirarse, llegan a estirarse más en DT, y a ser más largas que las moléculas de la muestra con mayor ρ.

  El tiempo de estiramiento en DT es considerablemente corto en relación al tiempo de estiramiento en DM, razón por la cual, las moléculas de la muestra con menor ρ, no

logran ser considerablemente más largas como para superar el número de enlaces secundarios que logran formar las moléculas de la muestra con mayor ρ, por su mayor número de moléculas por unidad de volumen.

La Densidad de la muestra ρ_1 es menor que la Densidad de la muestra ρ_2, lo cual indica que la muestra ρ_1 tiene menor número de moléculas por unidad de volumen, en relación a la muestra ρ_2, razón por la cual las moléculas de ρ_1 se estiraron más en DT, llegan a ser más largas que las moléculas de la muestra ρ_2, pero por el corto tiempo de relajación que hay en DT.

En relación al tiempo de relajación en DM, el número de enlaces secundarios que logran formar las molécula de la muestra ρ_1, por su mayor longitud, llega a ser menor que el número de enlaces secundarios que forman las moléculas de la muestra ρ_2, por su mayor número de moléculas, de tal manera que la muestra ρ_1 tiene menor elongación que la muestra ρ_2, en DT.

4.2.2 Resistencia al Impacto Vs. ρ

La siguiente gráfica ayudará a realizar un análisis de la influencia que tiene ρ sobre la Resistencia al Impacto, en películas de HDPE:

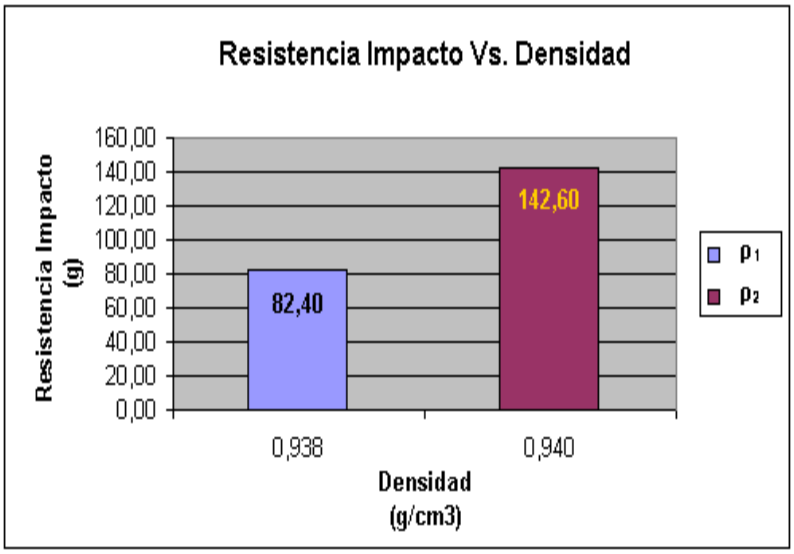


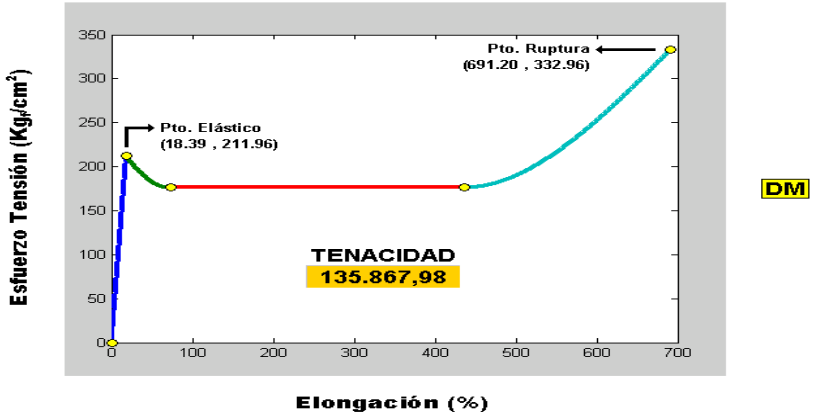
FIGURA 4.12 RESISTENCIA AL IMPACTO VS. ρ

La Figura 4.12 muestra los valores de resistencia al impacto para diferentes valores de ρ. El valor de resistencia al impacto para la muestra ρ_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de resistencia al impacto para la muestra ρ_2, está representado por la columna de color **Vino**. Además se observa que la resistencia al impacto de la muestra ρ_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra ρ_1. La diferencia que se observa en la resistencia al impacto, se debe a la diferencia

en la tenacidad de las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación que se obtuvieron para las muestras ρ_1 y ρ_2, mediante los ensayos de tensión a los cuales se sometieron dichas muestras.

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, indican la resistencia al impacto que tiene la película; dichas curvas se pueden obtener al someter la película al ensayo de tensión. Para cada película se pueden obtener dos curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, una en DM y otra en DT; entre las dos curvas, la que tiene mayor tenacidad indica la resistencia al impacto de la película. A continuación se mostrarán las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras ρ_1 y ρ_2:

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra ρ_1**



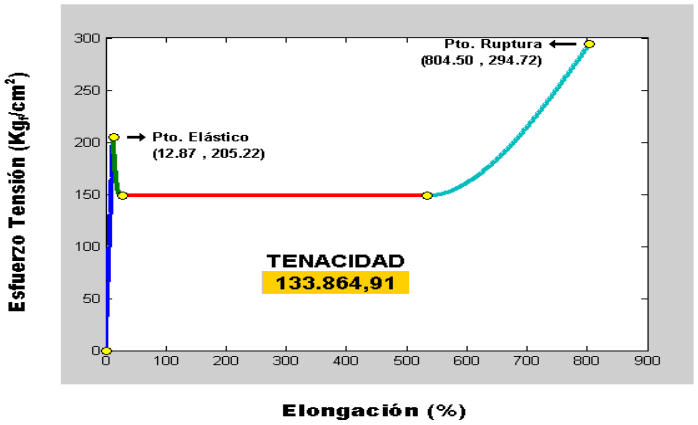


FIGURA 4.13 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA ρ_1

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra ρ_2**

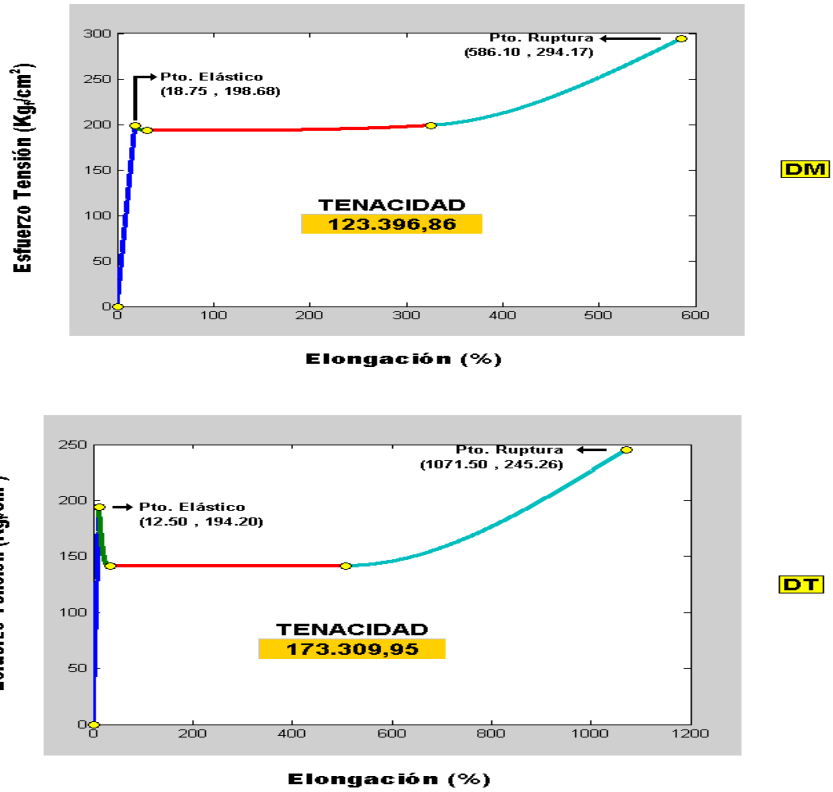


FIGURA 4.14 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA ρ_2

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras ρ_1 y ρ_2, señalan que la resistencia al impacto de la muestra ρ_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra ρ_1, ya que la muestra ρ_2 alcanza una máxima tenacidad de **173.309,95** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, y la muestra ρ_1 alcanza una máxima tenacidad de **135.867,98** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, con lo cual se observa que la tenacidad de la muestra ρ_2 es mayor que la tenacidad de la muestra ρ_1, es decir, la resistencia al impacto de la muestra ρ_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra ρ_1. La muestra ρ_2 es más tenaz que la muestra ρ_1, por el mayor número de moléculas por unidad de volumen que tiene ρ_2.

Las moléculas de ρ_1 se estiraron más que las moléculas de ρ_2, en DM y en DT, pero en DT, por el corto tiempo de relajación que hay en esta dirección de halado, el número de enlaces secundarios que logran formar las molécula de la muestra ρ_1, por su mayor estiramiento, llega a ser menor que el número de enlaces secundarios que forman las moléculas de la muestra ρ_2, por su mayor número de moléculas por unidad de volumen.

Esta es la razón por la cual la elongación de la muestra ρ_2 es mayor que la elongación de la muestra ρ_1, lo cual le permite a la muestra ρ_2 obtener mayor capacidad para absorber la energía de impacto, y así, la resistencia al impacto de la muestra ρ_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra ρ_1, lo cual se observa en la Figura 4.12.

4.2.3 Permeabilidad Vs. ρ

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene ρ sobre la Permeabilidad, en películas de HDPE:

- **Guayaquil (70% HR, 32ºC)**

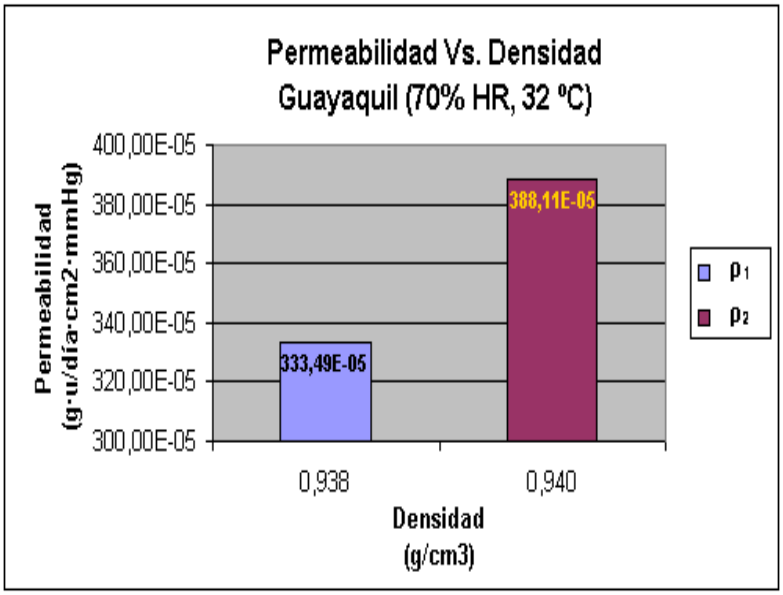


FIGURA 4.15 "PERMEABILIDAD VS. ρ" EN GUAYAQUI

La Figura 4.15 muestra los valores de permeabilidad en Guayaquil, para diferentes valores de ρ. El valor de permeabilidad para la muestra ρ_1, está representado por la columna de color **Azul Claro** y el valor de permeabilidad para la muestra ρ_2, por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.15 indica además que la permeabilidad de la muestra ρ_1 es menor que la permeabilidad de la muestra ρ_2, en Guayaquil. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima; las moléculas de la muestra con menor número de moléculas por unidad de volumen, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Como ya se conoce, las moléculas de la muestra con menor número de moléculas por unidad de volumen, se estiran con mayor facilidad en DM y en DT, y además que la materia prima con menor Densidad, tiene un menor número de moléculas por unidad de volumen.

La Densidad de la muestra ρ_1 es menor que la Densidad de la muestra ρ_2, lo cual nos indica que la muestra ρ_1 ha sido mejor estirada que la muestra ρ_2, es decir, la muestra ρ_1 obtuvo mejor cristalinidad o mayor número de regiones cristalinas, que es la razón por la cual la muestra ρ_1 tiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

- **Quito (50% HR, 23ºC)**

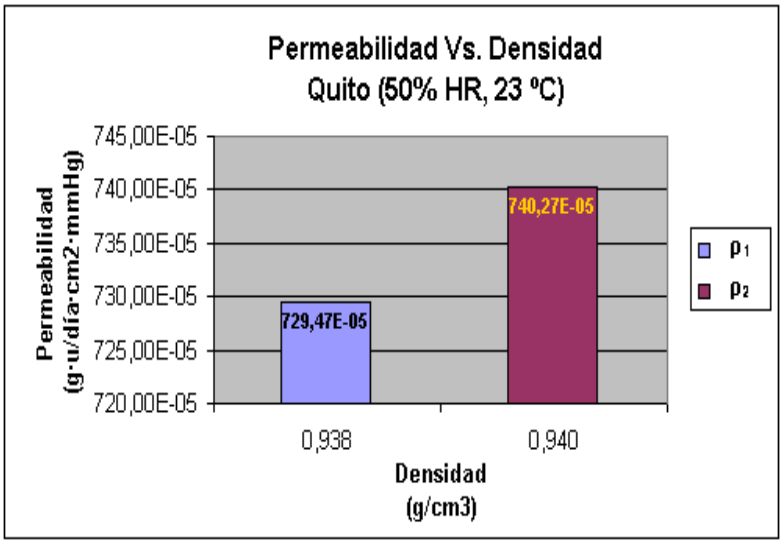


FIGURA 4.16 "PERMEABILIDAD VS. ρ" EN QUITO

La Figura 4.16 muestra los valores de permeabilidad en Quito, para diferentes valores de ρ. El valor de permeabilidad para la muestra ρ_1, está representado por la columna de color **Azul**

Claro; el de la muestra ρ_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.16, se observa que la permeabilidad de la muestra ρ_1 es menor que la permeabilidad de la muestra ρ_2, en Quito. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en el número de moléculas por unidad de volumen de la materia prima; las moléculas de la muestra con menor número de moléculas por unidad de volumen, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Como ya se tiene conocimiento, la razón por la cual las moléculas de la muestra con menor número de moléculas por unidad de volumen, se estiran con mayor facilidad en DM y en DT, y también que la materia prima con menor Densidad, tiene un menor número de moléculas por unidad de volumen. La Densidad de la muestra ρ_1 es menor que la Densidad de la muestra ρ_2, lo cual nos indica que la muestra ρ_1 ha sido mejor estirada que la muestra ρ_2, es decir, la muestra ρ_1 obtuvo mejor cristalinidad o mayor número de regiones cristalinas, que es la

razón por la cual la muestra ρ_1 tiene mayor resistencia contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

4.3 Análisis de influencia del FLUJO sobre las propiedades mecánicas de las muestras de $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$

Las muestras que se fabricaron para analizar el tipo de influencia del FLUJO sobre las Propiedades Mecánicas de las películas de HDPE, fueron $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$. A continuación, en la Tabla 16 se muestra la materia prima y las condiciones de procesamiento con las que se fabricaron las muestras en mención; además indica que las propiedades mecánicas que obtuvieron las muestras en su proceso de fabricación:

TABLA 17

INFLUENCIA DEL ¨FLUJO¨ SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

MUESTRAS	MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO					PROPIEDADES MECÁNICAS							
	MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR	ELONGACIÓN		RESISTENCIA TENSIÓN		RESISTENCIA IMPACTO	PERMEABILIDAD		ESPESOR
								DM	DT	DM	DT		Guayaquil (70% HR, 32°C)	Quito (50% HR, 23°C)	
	(g/10 min, 2,16 Kg_f)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_O)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)	(%)	(%)	(Kg_f/cm^2)	(Kg_f/cm^2)	(g)	($g\cdot\mu/día\cdot cm^2\cdot mm\ Hg$)	($g\cdot\mu/día\cdot cm^2\cdot mm\ Hg$)	(μ)
$FLUJO_1$	0,110	0,943	1	32,71	97	5,25	4,20	296,10	565,17	542,10	342,29	67,70	114,82E-05	97,53E-05	8,93889
$FLUJO_2$	0,110	0,943	1	30,32	79	5,66	4,00	272,80	522,80	567,82	435,93	83,00	88,37E-05	76,25E-05	7,51111

Adicionalmente se muestra una clara influencia del FLUJO sobre las propiedades mecánicas de las muestras, ya que al disminuir el FLUJO, desde 32.71 hasta 30.32, se da un cambio en las demás condiciones de procesamiento. Al realizarse directamente un cambio en el FLUJO, indirectamente se generan cambios en las demás condiciones de procesamiento. Los cambios que se generan de manera implícita, son los que colaboran con el FLUJO a que las propiedades mecánicas cambien.

Las condiciones de procesamiento que cambian de manera implícita por el cambio en el FLUJO, son las siguientes:

- ✓ FH
- ✓ DDR
- ✓ BUR

La condición de procesamiento FH, varía de manera implícita con el cambio en el FLUJO, ya que al aumentar o reducir el FLUJO, se aumenta o se reduce la carga térmica al caudal de aire de enfriamiento, caudal que se encarga de enfriar la masa fundida que se estira en el espacio que limita FH. Al haber menor FLUJO, hay menor carga térmica para el caudal de aire de enfriamiento, lo cual facilita el trabajo de dicho caudal, o sea, la masa fundida se enfriará en menor tiempo, razón por la cual se reduce la altura de enfriamiento. Al

contrario, si hay mayor FLUJO, hay mayor carga térmica para el caudal de aire de enfriamiento, lo cual dificulta el trabajo de dicho caudal, o sea, la masa fundida se enfriará en mayor tiempo, razón por la cual aumenta la altura de enfriamiento.

La condición de procesamiento DDR, varía de manera implícita con el cambio en el FLUJO, ya que al aumentar o reducir el FLUJO, se aumenta o se reduce la velocidad que tiene la masa fundida al salir del cabezal (V_o). La Ecuación 2.6 indica que el DDR es el cociente entre la velocidad lineal de los rodillos haladores (V_L) y la velocidad que tiene el polímero fundido al salir del cabezal (V_o), siendo V_L el dividendo y V_o el divisor. Al haber menor FLUJO, la velocidad V_o del polímero fundido que sale del cabezal, disminuye, obteniendo de esta manera, según la Ecuación 2.6, un aumento en el DDR; al contrario, al haber mayor FLUJO, la velocidad V_o del polímero fundido que sale del cabezal, aumenta, obteniendo de esta manera, una disminución en el DDR.

La condición de procesamiento BUR, varía de manera implícita con el cambio en el FLUJO, ya que al aumentar o reducir el FLUJO, se aumenta o se reduce la resistencia que la masa fundida ofrece a la presión de aire que se encuentra dentro de la burbuja. La Ecuación 2.5 indica que el BUR es el cociente entre el diámetro de la burbuja

($\phi_{burbuja}$) y el diámetro del cuello (ϕ_{cuello}), siendo $\phi_{burbuja}$ el dividendo y ϕ_{cuello} el divisor. Al haber menor FLUJO, disminuye la resistencia que el polímero fundido, al salir del cabezal, ofrece a la presión de aire que se encuentra dentro de la burbuja, ya que al haber menos masa fundida saliendo del cabezal, ésta es más fácil de estirar en DM y en DT, ventaja que es aprovechada por la presión de aire al interior de la burbuja, para expandirla y así aumentar el diámetro de la misma, con lo cual, según la Ecuación 2.5, se obtiene un aumento en el BUR. Al contrario, al haber mayor FLUJO, aumenta la resistencia que el polímero fundido, al salir del cabezal, ofrece a la presión de aire que se encuentra dentro de la burbuja, ya que al haber más masa fundida saliendo del cabezal, ésta es más difícil de estirar en DM y en DT, lo cual dificulta a la presión de aire al interior de la burbuja, expandirla, obteniéndose de esta manera un menor diámetro en la burbuja, con lo cual, según la Ecuación 2.5, se obtiene un menor BUR.

En la Tabla 17, se observa que cuando el FLUJO disminuye, el BUR es menor, lo cual, es incoherente a lo que se explicó en el párrafo anterior acerca de la manera en que el BUR cambia implícitamente con el FLUJO. En el párrafo anterior se narra correctamente la manera en que el BUR cambia implícitamente con el FLUJO; la incoherencia se presenta por una maniobra que realizó el operador de la extrusora donde se obtuvieron las muestras $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$.

El operador se encontraba en una extrusora fabricando una película cuyo diámetro de burbuja tenía que mantenerse dentro del rango de 60 a 63 cm. En el momento que se obtuvo la primera muestra, $FLUJO_1$, el diámetro de la burbuja se encontraba en 63 cm, lo cual significaba que dicho diámetro se encontraba en el límite del rango establecido; luego de obtener la primera muestra, se disminuyó la velocidad del tornillo de la extrusora, para reducir el FLUJO y así obtener la segunda muestra, $FLUJO_2$, en la cual, implícitamente, tendría que haber un aumento en el diámetro de la burbuja, y con aquello un aumento en el BUR, esto sería lo correcto. El operador, al darse cuenta que el diámetro de la burbuja iba a aumentar con la reducción del FLUJO, procedió a aumentar el caudal de aire de enfriamiento, ya que al aumentar la presión de dicho caudal, se frenaría el aumento del diámetro de la burbuja; si él no hubiera aumentado el caudal de aire de enfriamiento, el diámetro de la burbuja hubiera aumentado, quedando fuera del rango establecido para dicho diámetro (60 a 63 cm), lo cual hubiera significado que la película no cumpliera uno de los requisitos de calidad, que era el ancho de la misma.

El aumento del caudal de aire de enfriamiento fue de tal manera que no sólo frenó el aumento del diámetro de la burbuja, sino que también comprimió la burbuja hasta reducir su diámetro a 60 cm. El operador

aumentó de tal manera el caudal de aire de enfriamiento, que la presión de dicho caudal fue mayor a la presión de aire que se encuentra dentro de la burbuja, comprimiéndola de esta manera, con lo cual la muestra $FLUJO_2$ obtendría un diámetro de burbuja menor que el de la muestra $FLUJO_1$, y así el BUR de la muestra $FLUJO_2$ sería menor al BUR de la muestra $FLUJO_1$, que es lo que muestra la Tabla 16.

El aumento del caudal de aire de enfriamiento, no sólo afectó al BUR, también afectó a la altura de enfriamiento. Ya es de nuestro conocimiento que al haber menor FLUJO, la altura de enfriamiento se reduce implícitamente. Cuando obtuvimos la primera muestra, $FLUJO_1$, la película que estaba fabricando el operador, se encontraba con una altura de enfriamiento de 97 cm; para obtener la segunda muestra, $FLUJO_2$, el operador disminuyó el FLUJO de la extrusora, con lo cual disminuyó la altura de enfriamiento de manera implícita. Como se conoce, el operador aumentó el caudal de aire de enfriamiento, luego de haber reducido el FLUJO de la extrusora; el aumento en el caudal de aire de enfriamiento intensificó la reducción de la altura de enfriamiento, llegando ésta a 79 cm, que es el FH de la muestra $FLUJO_2$ que se observa en la Tabla 16.

El DDR no fue afectado por el aumento del caudal de aire de enfriamiento, ya que dicho caudal no afecta a ninguna de las velocidades de las cuales depende el DDR; las velocidades V_L y V_o dependen de la velocidad de los rodillos haladores y del FLUJO de la extrusora, respectivamente. Por esta razón, el cambio que se observa en el DDR de la Tabla 16 se dio, exclusivamente, por el cambio en el FLUJO.

Una vez que se ha explicado la manera en que las demás condiciones de procesamiento, FH, DDR y BUR cambian de manera implícita con el cambio en el FLUJO, se procede a realizar el análisis de influencia del FLUJO sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE, a través de las muestras $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$.

En la Tabla 17 se desarrollarán gráficas de Propiedades Mecánicas Vs. FLUJO, para las muestras $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$, con las cuales se logrará un acercamiento al tipo de influencia que tiene FLUJO sobre cada una de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE.

4.3.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs, FLUJO

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene FLUJO sobre la Resistencia a la Tensión y la Elongación, en películas de HDPE:

- **Resistencia a la Tensión Vs. FLUJO**

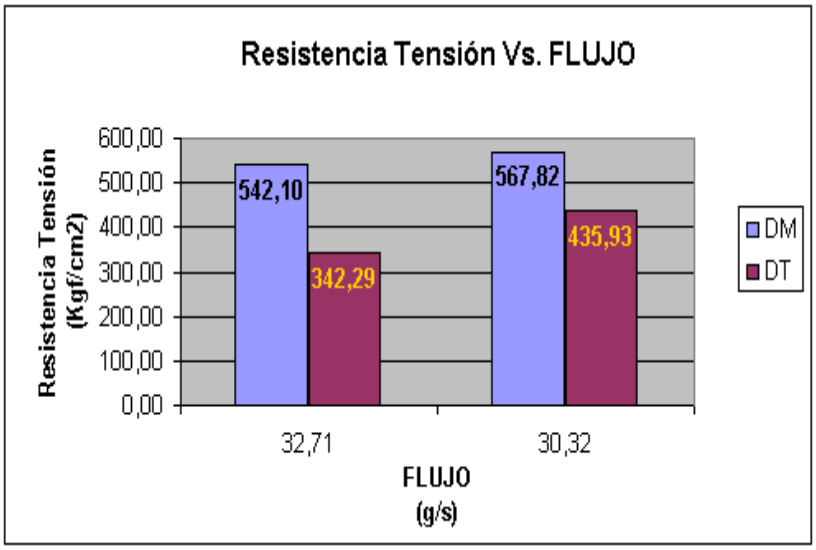


FIGURA 4.17 RESISTENCIA A LA TENSIÓN VS. FLUJO

La Figura 4.17 muestra los valores de resistencia a la tensión en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de FLUJO. Los valores de resistencia a la tensión en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los de resistencia a la tensión en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.17, se puede apreciar que en DM, la resistencia a la tensión de la muestra $FLUJO_2$ es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra $FLUJO_1$. En DM, la resistencia a la

tensión de la muestra $FLUJO_2$ logra ser mayor por el menor FLUJO que tiene esta muestra; al haber menor FLUJO, las moléculas se estiran con mayor facilidad. Mientras hay menor FLUJO, hay menor masa que estirar, lo cual facilita el estiramiento en DM, ya que la fuerza de gravedad actúa con menor intensidad.

En el análisis de influencia del MI y de ρ sobre las propiedades mecánicas, se observa que al haber moléculas más largas (MI menor) o. al haber mayor número de moléculas por unidad de volumen (ρ mayor), hay mayor enrollamiento entre moléculas, lo cual dificulta el estiramiento de las mismas, tanto en DM como en DT. Moléculas más largas o mayor número de moléculas por unidad de volumen, significa mayor masa; entonces, al haber mayor masa, hay mayor enrollamiento entre moléculas. Este razonamiento nos indica que al haber mayor FLUJO, hay mayor enrollamiento entre moléculas, lo cual dificulta el estiramiento de las mismas, tanto en DM como en DT.

Además, al haber menor FLUJO, la velocidad del polímero fundido al salir del cabezal (V_o), es menor, lo cual causa que el DDR de la muestra $FLUJO_2$ (5.66), sea mayor que el DDR de la

muestra $FLUJO_1$ (5.25); al haber mayor DDR, hay mayor intensidad de halado en DM, lo cual mejora el estiramiento de las moléculas en DM.

La altura de enfriamiento de la muestra $FLUJO_1$ (97 cm), es considerablemente mayor que la altura de enfriamiento de la muestra $FLUJO_2$ (79 cm), con lo cual se obtendría un mejor estiramiento de las moléculas de la muestra $FLUJO_1$, ya que al haber mayor altura de enfriamiento, hay mayor tiempo de estiramiento, es decir, las moléculas se estiran por más tiempo, pudiendo lograr mayor estiramiento de las mismas y así, mayor cristalinidad y resistencia a la tensión.

Aunque la altura de enfriamiento de la muestra $FLUJO_1$ es considerablemente mayor que la altura de enfriamiento de la muestra $FLUJO_2$, las razones por las cuales se facilita el estiramiento, en DM, de las moléculas de la muestra $FLUJO_2$, ofrecen mayor ventaja que la altura de enfriamiento que tiene la muestra $FLUJO_1$, para el estiramiento de las moléculas, de tal manera que la muestra $FLUJO_2$ alcanza a obtener una mayor resistencia a la tensión en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

En la Figura 4.17, se puede observar que en DT, la resistencia a la tensión de la muestra $FLUJO_2$ es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra $FLUJO_1$. En DT, la resistencia a la tensión de la muestra $FLUJO_2$ logra ser mayor por el menor FLUJO que tiene esta muestra; al haber menor FLUJO, las moléculas se estiran con mayor facilidad.

Mientras hay menor FLUJO, hay menor masa que estirar, lo cual facilita el estiramiento en DT, ya que la fuerza de gravedad actúa con menor intensidad y hay un menor enrollamiento en las moléculas.

Las ventajas que ofrece la muestra $FLUJO_2$ para el estiramiento de sus moléculas, representan una menor resistencia a la presión de aire que se encuentra dentro de la burbuja, de tal manera que las moléculas de la muestra $FLUJO_2$ se estiran más que las moléculas de la muestra $FLUJO_1$.

Como ya se mencionó, el BUR de la muestra $FLUJO_1$ es mayor que el BUR de la muestra $FLUJO_2$, con lo cual, la muestra $FLUJO_1$ tiene mayor intensidad de halado en DT, y así podría tener mejor estiramiento en sus moléculas.

El estiramiento de las moléculas en DT, empieza cuando la película inicia la expansión de su diámetro desde el ϕ_{cuello}, y termina, cuando la película alcanza el $\phi_{burbuja}$. Este espacio de estiramiento para las moléculas, en DT, implica un tiempo de estiramiento para las mismas.

Al haber mayor expansión en el diámetro de la película, es decir, un $\phi_{burbuja}$ mayor ó un BUR mayor, habrá mayor espacio para estirar a las moléculas en DT, lo cual implicaría que habría un mayor tiempo de estiramiento para las moléculas en DT.

Al contrario, al haber menor expansión en el diámetro de la película, es decir, un $\phi_{burbuja}$ menor o un BUR menor, habrá menor espacio para estirar a las moléculas en DT, lo cual implicaría que habría un menor tiempo de estiramiento para las moléculas en DT.

Aunque la muestra $FLUJO_1$ tiene un mayor BUR, la diferencia no es considerable para las ventajas que ofrece el menor FLUJO de la muestra $FLUJO_2$, respecto al estiramiento de las moléculas.

Al no ser el BUR de la muestra $FLUJO_1$, considerablemente mayor al BUR de la muestra $FLUJO_2$, el tiempo de estiramiento

de la muestra $FLUJO_1$, en DT, tampoco sería considerablemente mayor para contrarrestar las ventajas que ofrece la muestra $FLUJO_2$ respecto al estiramiento de las moléculas.

La muestra $FLUJO_2$, al tener mayores ventajas que la muestra $FLUJO_1$, para el estiramiento de las moléculas, obtiene un mejor estiramiento de las mismas, de tal manera que la muestra $FLUJO_2$ alcanza una mayor resistencia a la tensión en DT.

- **Elongación Vs. FLUJO**

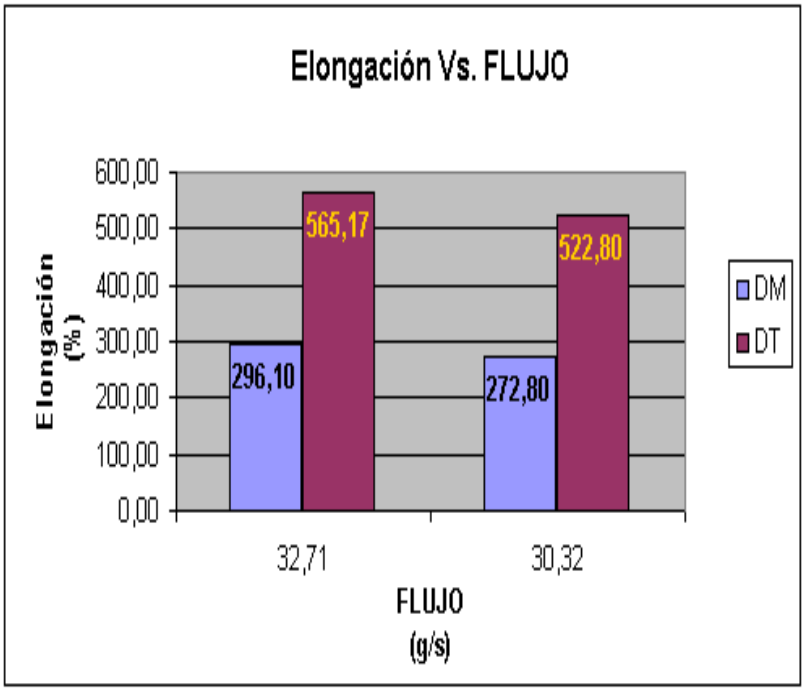


FIGURA 4.18 ELONGACIÓN VS. FLUJO

La Figura 4.18 muestra los valores de elongación en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de FLUJO. Los valores de elongación en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los de elongación en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.18, se puede observar que en DM, la elongación de la muestra $FLUJO_1$ es mayor que la elongación de la muestra $FLUJO_2$. La diferencia que se observa en la elongación en DM, se debe a la diferencia en el FLUJO y en la altura de enfriamiento.

La muestra $FLUJO_1$, al tener mayor FLUJO, tiene mayor cantidad de masa, lo cual significa que la muestra $FLUJO_1$ tiene mayor cantidad de moléculas, y seguramente tendría mayor número de enlaces secundarios que la muestra $FLUJO_2$, al inicio del proceso de estiramiento. La mayor cantidad de moléculas, junto con la considerable mayor altura de enfriamiento que tiene $FLUJO_1$, ayudan a que en la muestra $FLUJO_1$ se formen más enlaces secundarios que en la muestra $FLUJO_2$, durante el proceso de estiramiento.

La muestra $FLUJO_2$ tiene mayores ventajas para el estiramiento de sus moléculas, causando que la muestra $FLUJO_2$ se estirara mejor que la muestra $FLUJO_1$, y así la muestra $FLUJO_2$ obtenga moléculas más largas que las moléculas de la muestra $FLUJO_1$, ya que las moléculas de la muestra $FLUJO_2$ se estiraron más durante su tiempo de relajación.

Aunque la muestra $FLUJO_2$ alcanza a obtener moléculas más largas, el número de enlaces secundarios que logran formar las moléculas de la muestra $FLUJO_2$, por su mayor longitud, llega a ser menor que el número de enlaces secundarios que forman las moléculas de la muestra $FLUJO_1$, por su mayor número de moléculas y por su considerable mayor altura de enfriamiento.

La muestra $FLUJO_1$, al lograr obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra $FLUJO_2$, alcanza una mayor elongación en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

En la Figura 4.18, se puede observar que en DT, la elongación de la muestra $FLUJO_1$ es mayor que la elongación de la muestra $FLUJO_2$. La diferencia que se observa en la elongación

en DT, se debe a la diferencia en el FLUJO y en el tiempo de estiramiento o relajación que hay en DT.

La muestra $FLUJO_1$, al tener mayor FLUJO, tiene mayor cantidad de masa, lo cual significa que la muestra $FLUJO_1$ tiene mayor cantidad de moléculas, y seguramente tendría mayor número de enlaces secundarios que la muestra $FLUJO_2$, al inicio del proceso de estiramiento. Además, la muestra $FLUJO_1$ tiene un mayor BUR, lo cual implica que haya una mayor intensidad de halado y un mayor tiempo de estiramiento en DT, para la muestra $FLUJO_1$.

La mayor cantidad de moléculas, junto con el mayor BUR que tiene $FLUJO_1$, ayudan a que en la muestra $FLUJO_1$ se formen más enlaces secundarios que en la muestra $FLUJO_2$, durante el proceso de estiramiento.

Como se conoce, la muestra $FLUJO_2$ tiene mayores ventajas para el estiramiento de sus moléculas, causando que la muestra $FLUJO_2$ se estirara mejor que la muestra $FLUJO_1$, y así la muestra $FLUJO_2$ obtenga moléculas más largas que las moléculas de la muestra $FLUJO_1$, ya que las moléculas de la muestra $FLUJO_2$ se estiraron más durante su tiempo de relajación.

Aunque la muestra $FLUJO_2$ alcanza a obtener moléculas más largas, el corto tiempo de estiramiento que hay en DT, no deja que el número de enlaces secundarios que logran formar las molécula de la muestra $FLUJO_2$, por su mayor longitud, alcance a ser mayor que el número de enlaces secundarios que forman las moléculas de la muestra $FLUJO_1$, por su mayor número de moléculas, las cuales, al ser estiradas con un BUR un poco mayor, es decir, con un poco más de intensidad de halado y de tiempo de estiramiento en DT, logran con mayor razón, formar un mayor número de enlaces secundarios.

La muestra $FLUJO_1$, al lograr obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra $FLUJO_2$, alcanza una mayor elongación en DT.

4.3.2 Resistencia al Impacto Vs. FLUJO

La siguiente gráfica nos ayudará a realizar un análisis de la influencia que tiene FLUJO sobre la Resistencia al Impacto, en películas de HDPE:

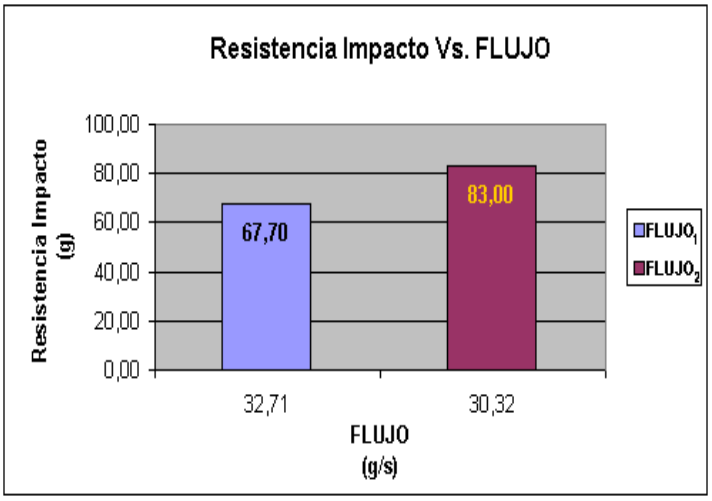


FIGURA 4.19 RESISTENCIA AL IMPACTO VS. FLUJO

La Figura 4.19 muestra los valores de resistencia al impacto para diferentes valores de FLUJO. El valor de resistencia al impacto para la muestra $FLUJO_1$, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de resistencia al impacto para la muestra $FLUJO_2$, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.19, se puede observar que la resistencia al impacto de la muestra $FLUJO_2$ es mayor que la resistencia al impacto de la muestra $FLUJO_1$. La diferencia que se observa en la resistencia al impacto, se debe a la diferencia en la tenacidad de las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación que se obtuvieron para las muestras $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$, mediante los

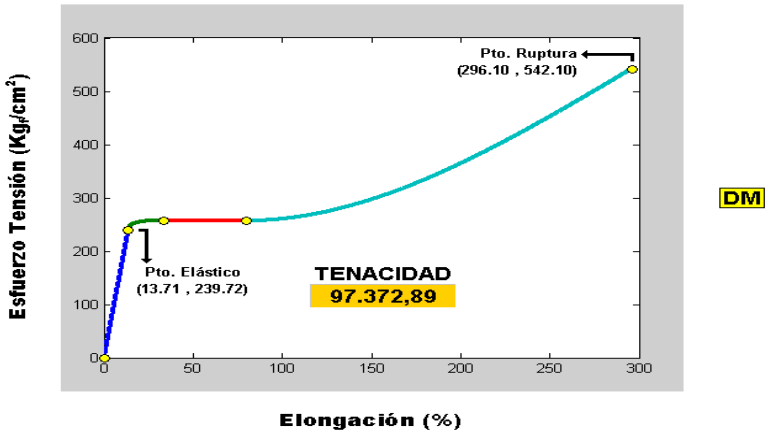
ensayos de tensión a los cuales se sometieron dichas muestras.

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, indican la resistencia al impacto que tiene la película; dichas curvas se pueden obtener al someter la película al ensayo de tensión.

Para cada película se pueden obtener dos curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, una en DM y otra en DT; entre las dos curvas, la que tiene mayor tenacidad indica la resistencia al impacto de la película.

A continuación se mostrarán las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras $FLUJO_1$ y $FLUJO_2$:

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra $FLUJO_1$**



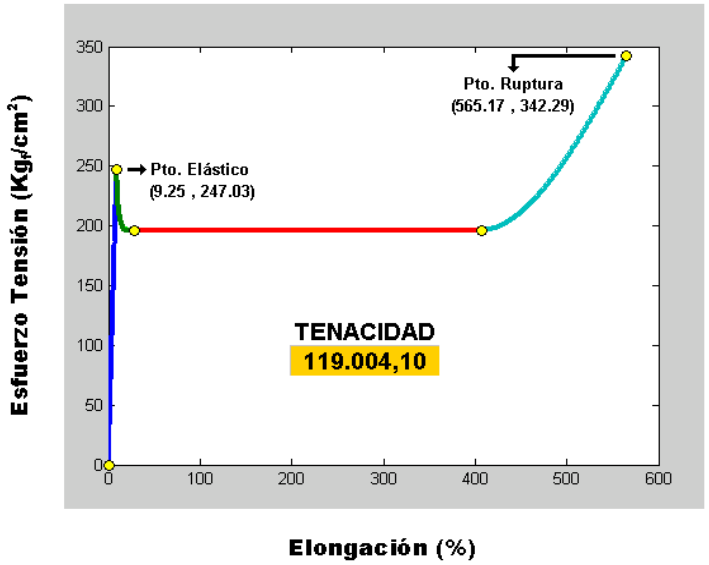
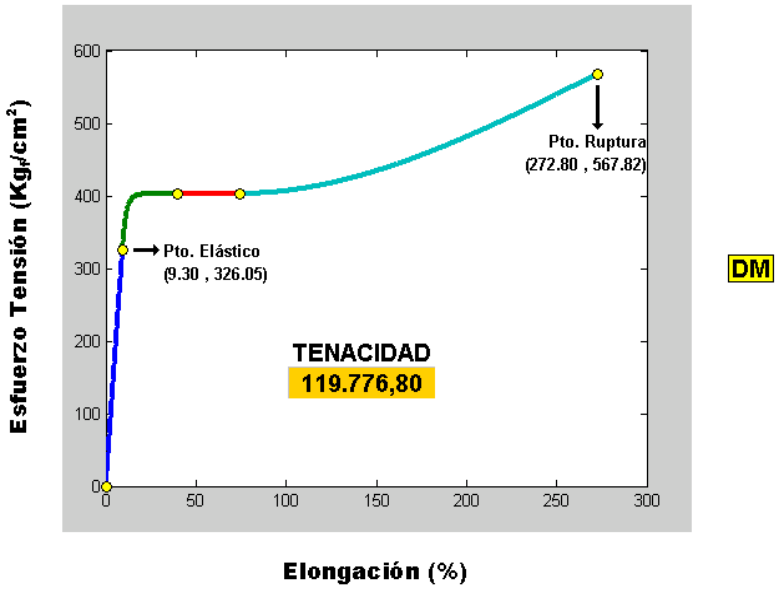


FIGURA 4.20 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA FLUJO$_1$

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra FLUJO$_2$**



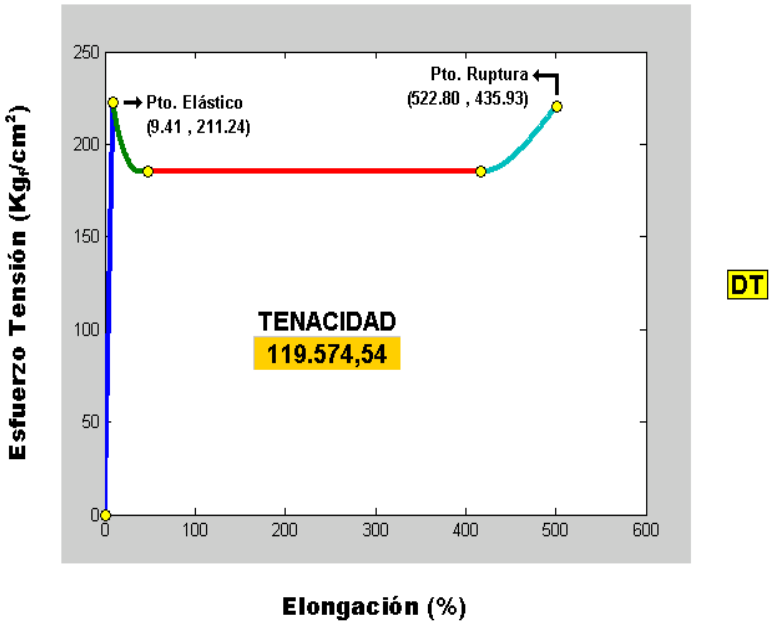


FIGURA 4.21 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA FLUJO$_2$

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras FLUJO$_1$ y FLUJO$_2$, indican que la resistencia al impacto de la muestra FLUJO$_2$ es mayor que la resistencia al impacto de la muestra FLUJO$_1$, ya que la muestra FLUJO$_2$ alcanza una máxima tenacidad de **119.776,80** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, y la muestra FLUJO$_1$ alcanza una máxima tenacidad de **119.004,10** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, con lo cual se observa que la tenacidad de la muestra FLUJO$_2$ es mayor que la tenacidad de la muestra FLUJO$_1$, es decir, la resistencia al impacto de la

muestra $FLUJO_2$ es mayor que la resistencia al impacto de la muestra $FLUJO_1$.

La muestra $FLUJO_2$ es más tenaz que la muestra $FLUJO_1$, por la alta resistencia a la tensión que alcanzó la muestra $FLUJO_2$. Las ventajas que las moléculas de la muestra $FLUJO_2$ obtuvieron en el proceso de estiramiento en DM (menor FLUJO y mayor DDR), generaron que la resistencia a la tensión de la muestra $FLUJO_2$, se elevará considerablemente, lo cual le permite a la muestra $FLUJO_2$ obtener mayor capacidad para absorber la energía de impacto, y así, la resistencia al impacto de la muestra $FLUJO_2$ es mayor que la resistencia al impacto de la muestra $FLUJO_1$, lo cual se observa en la Figura 4.19.

4.3.3 Permeabilidad Vs. FLUJO

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene FLUJO sobre la Permeabilidad, en películas de HDPE:

- **Guayaquil (70% HR, 32ºC)**

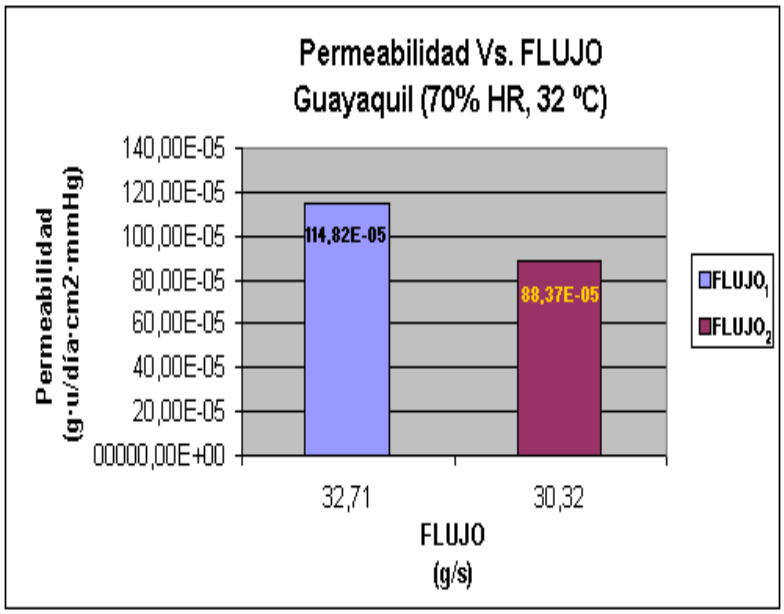


FIGURA 4.22 "PERMEABILIDAD VS. FLUJO" EN GUAYAQUIL

La Figura 4.22 muestra los valores de permeabilidad en Guayaquil, para diferentes valores de FLUJO. El valor de permeabilidad para la muestra $FLUJO_1$, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra $FLUJO_2$, está representado por la columna de color **Vino**. Además se puede observar que la permeabilidad de la muestra $FLUJO_2$ es menor que la permeabilidad de la muestra $FLUJO_1$, en Guayaquil.

La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en el FLUJO; las moléculas de la muestra con menor

FLUJO, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad. Ya se conoce la razón por la cual las moléculas de la muestra con menor FLUJO, se estiran con mayor facilidad en DM y en DT.

El FLUJO de la muestra $FLUJO_2$ es menor que el FLUJO de la muestra $FLUJO_1$, lo cual nos indica que la muestra $FLUJO_2$ ha sido mejor estirada que la muestra $FLUJO_1$, es decir, la muestra $FLUJO_2$ obtuvo mejor cristalinidad ó mayor número de regiones cristalinas, que es la razón por la cual la muestra $FLUJO_2$ tiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

- **Quito (50% HR, 23ºC)**

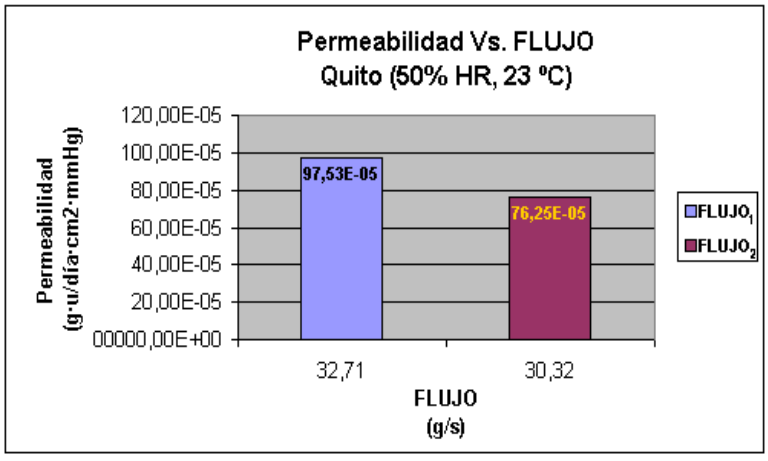


FIGURA 4.23 "PERMEABILIDAD VS. FLUJO" EN QUITO

La Figura 4.23 muestra los valores de permeabilidad en Quito, para diferentes valores de FLUJO. El valor de permeabilidad para la muestra $FLUJO_1$, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra $FLUJO_2$, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.23, se observa que la permeabilidad de la muestra $FLUJO_2$ es menor que la permeabilidad de la muestra $FLUJO_1$, en Quito. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en el FLUJO; las moléculas de la muestra con menor FLUJO, se estiran con mayor facilidad, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Ya es de nuestro conocimiento la razón por la cual las moléculas de la muestra con menor FLUJO, se estiran con mayor facilidad en DM y en DT. El FLUJO de la muestra $FLUJO_2$ es menor que el FLUJO de la muestra $FLUJO_1$, lo cual nos indica que la muestra $FLUJO_2$ ha sido mejor estirada que la muestra $FLUJO_1$, es decir, la muestra $FLUJO_2$ obtuvo mejor cristalinidad o mayor número de regiones cristalinas, que es la

razón por la cual la muestra $FLUJO_2$ tiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

4.4 Análisis de influencia de la Altura de Enfriamiento (FH) sobre las propiedades mecánicas de las muestras FH_1 y FH_2

Las muestras que se fabricaron para analizar el tipo de influencia de la Altura de Enfriamiento (FH) sobre las Propiedades Mecánicas de las películas de HDPE, fueron FH_1 y FH_2. A continuación, en la tabla 17 se indica la materia prima y las condiciones de procesamiento con las que se fabricaron las muestras en mención y además las propiedades mecánicas que obtuvieron las muestras en su proceso de fabricación:

TABLA 18

INFLUENCIA DE LA ALTURA DE ENFRIAMIENTO (FH) SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

MUESTRAS	MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO					PROPIEDADES MECÁNICAS							
	MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR	ELONGACIÓN		RESISTENCIA TENSIÓN		RESISTENCIA IMPACTO	PERMEABILIDAD		ESPESOR
								DM	DT	DM	DT		Guayaquil (70% HR, 32°C)	Quito (50% HR, 23°C)	
	(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm³)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_1/V_0)	($\phi_{burbuja}$/ϕ_{anillo})	(%)	(%)	(Kg/cm²)	(Kg/cm²)	(g)	(g-μ/día-cm²-mm Hg)	(g-μ/día-cm²-mm Hg)	(μ)
FH_1	0,110	0,945	1	32,71	80	5,25	3,87	280,45	474,14	337,50	221,86	57,50	172,34E-05	113,39E-05	10,76867
FH_2	0,110	0,945	1	32,71	97	5,25	4,20	296,10	666,17	542,10	342,29	67,70	114,82E-05	97,53E-05	9,93889

La Tabla 18 no muestra una clara influencia de FH sobre las propiedades mecánicas de las muestras, ya que al aumentar FH, desde 80 cm hasta 97 cm, se observa un cambio en el BUR. Al

realizarse, directamente, un cambio en FH, indirectamente, se genera un cambio en el BUR. El cambio que se genera de manera implícita en el BUR, colabora con FH a que las propiedades mecánicas cambien.

El cambio implícito que se genera en el BUR, al realizarse un cambio en FH, se debe a que se realiza en el caudal de aire de enfriamiento; para generar cambios en FH, se debe realizar cambios en el caudal de aire de enfriamiento, los cuales, al mismo tiempo, generarán cambios en el BUR.

El caudal de aire de enfriamiento, no sólo influye en FH, también influye en el BUR. Para aumentar FH, se reduce el caudal de aire de enfriamiento, lo cual genera una reducción en la presión de dicho caudal, de tal manera que la presión del aire al interior de la burbuja se vuelve mayor que la presión del aire de enfriamiento, y así se ocasiona una expansión de la burbuja, es decir, el diámetro de la burbuja aumenta, lo cual significa que aumenta el BUR.

Al contrario, para reducir FH, se aumenta el caudal de aire de enfriamiento, lo cual genera un aumento en la presión de dicho caudal, de tal manera que la presión del aire al interior de la burbuja se vuelve menor que la presión del aire de enfriamiento, y así se

ocasiona una compresión de la burbuja, es decir, el diámetro de la burbuja se reduce, lo cual significa que se reduce el BUR.

Para obtener la muestra FH_2, se partió de la muestra FH_1, como se explicará a continuación. El operador de la extrusora donde se fabricaron las muestras FH_1 y FH_2, se encontraba fabricando, inicialmente, la muestra FH_1, cuyos parámetros de fabricación se encuentran en la Tabla 17. Para obtener la muestra FH_2, el operador cerró un poco la válvula de succión de aire de la bomba de enfriamiento, para disminuir de esta manera el caudal de aire de enfriamiento y así aumentar FH, desde 80 cm para FH_1, hasta 97 cm para FH_2, con lo cual, también se generó un cambió en el BUR, desde 3.87 para FH_1, hasta 4.20 para FH_2, que es lo que se muestra en la Tabla 17.

Una vez que se ha explicado la manera en que cambia el BUR de manera implícita con el cambio en FH, se procede a realizar el análisis de influencia de FH sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE, a través de las muestras FH_1 y FH_2.

En la Tabla 18 se desarrollarán unas gráficas de Propiedades Mecánicas Vs. FH, para las muestras FH_1 y FH_2, con las cuales se logrará un acercamiento al tipo de influencia que tiene FH sobre cada una de las propiedades mecánicas de las películas de HDP.

4.4.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. FH

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene FH sobre la Resistencia a la Tensión y la Elongación, en películas de HDPE:

- **Resistencia a la Tensión Vs. FH**

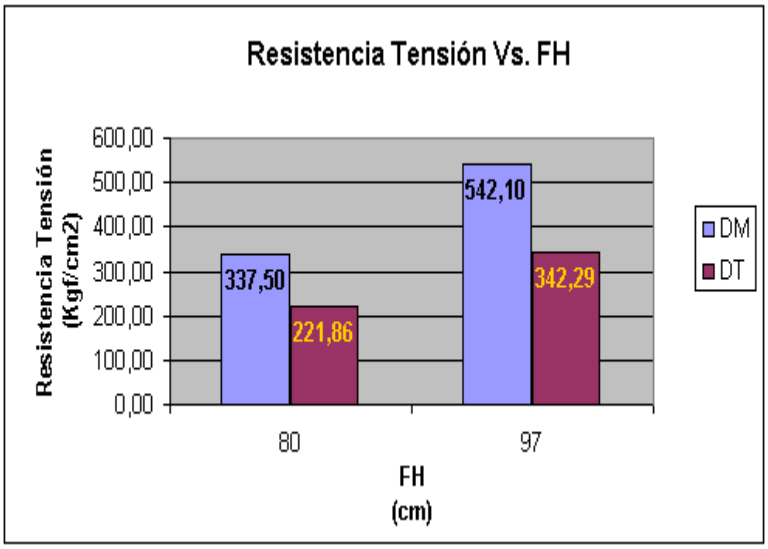


FIGURA 4.24 RESISTENCIA A LA TENSIÓN VS. FH

La Figura 4.24 muestra los valores de resistencia a la tensión en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de FH. Los valores de resistencia a la tensión en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; de resistencia a la tensión en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

  En la Figura 4.24, se observa que en DM, la resistencia a la tensión de la muestra FH_2 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra FH_1. En DM, la resistencia a la tensión de la muestra FH_2 logra ser mayor por la mayor Altura de Enfriamiento que tiene esta muestra; al haber mayor Altura de Enfriamiento, las moléculas tienen mayor tiempo de estiramiento, lo cual genera que las moléculas se estiren más.

  La Altura de Enfriamiento de la muestra FH_2 (97 cm), es considerablemente mayor que la Altura de Enfriamiento de la muestra FH_1 (80 cm), con lo cual se obtendría un mejor estiramiento de las moléculas de la muestra FH_2, ya que al haber mayor FH, hay mayor tiempo de estiramiento, es decir, las moléculas se estiran por más tiempo, lo cual genera que éstas se estiren más y así, la muestra FH_2 obtenga mayor cristalinidad y resistencia a la tensión.

- **Dirección Transversal (DT)**

  En la Figura 4.24, se observa que en DT, la resistencia a la tensión de la muestra FH_2 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra FH_1.

En DT, la resistencia a la tensión de la muestra FH_2 logra ser mayor por el mayor BUR que tiene esta muestra; al haber mayor BUR, las moléculas se estiran por más tiempo y con mayor intensidad en DT.

Como ya se mencionó, el BUR de la muestra FH_2 es mayor que el BUR de la muestra FH_1, con lo cual, las moléculas de la muestra FH_2 se estiran por más tiempo y con mayor intensidad de halado en DT, que es lo que le da a la muestra FH_2, un mejor estiramiento en sus moléculas, es decir, mayor cristalinidad y resistencia a la tensión en DT.

- **Elongación Vs. FH**

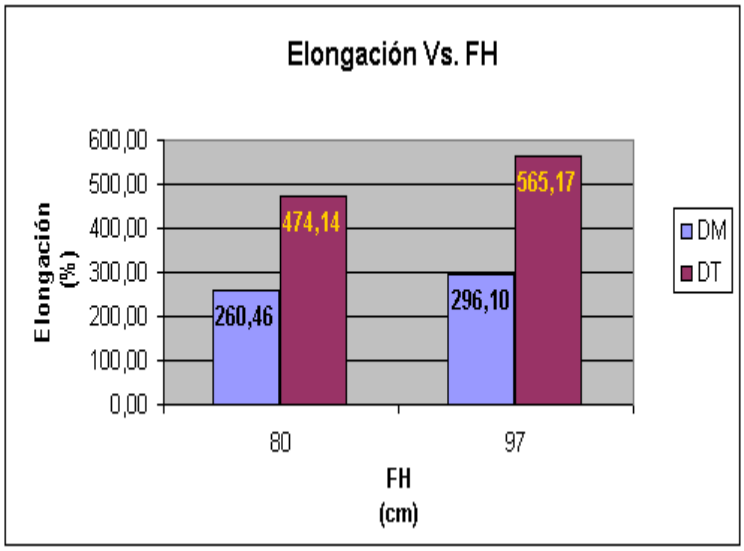


FIGURA 4.25 ELONGACIÓN VS. FH

La Figura 4.25 muestra los valores de elongación en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de FH. Los valores de elongación en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los valores de elongación en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.25, se puede observar que en DM, la elongación de la muestra FH_2 es mayor que la elongación de la muestra FH_1. La diferencia que se observa en la elongación en DM, se debe a la diferencia en FH.

La muestra FH_2, al tener mayor FH, sus moléculas tienen mayor tiempo de estiramiento, lo cual genera que éstas se estiren más y se vuelvan más largas que las moléculas de la muestra FH_1. La muestra FH_2, al obtener moléculas más largas luego del tiempo de relajación, obtiene un mayor número de enlaces secundarios entre sus moléculas.

La muestra FH_2, al lograr obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra FH_1, alcanza una mayor elongación en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

En la Figura 4.25, se puede observar que en DT, la elongación de la muestra FH_2 es mayor que la elongación de la muestra FH_1. La diferencia que se observa en la elongación en DT, se debe a la diferencia en el BUR.

La muestra FH_2, al tener mayor BUR, sus moléculas se estiran por más tiempo y con mayor intensidad en DT, lo cual genera que éstas se estiren más y se vuelvan más largas que las moléculas de la muestra FH_1. En DT, la muestra FH_2, al obtener moléculas más largas luego del tiempo de relajación, obtiene un mayor número de enlaces secundarios entre sus moléculas.

La muestra FH_2, al lograr obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra FH_1, alcanza una mayor elongación en DT.

4.4.2 Resistencia al Impacto Vs. FH

La siguiente gráfica ayudará a realizar un análisis de la influencia que tiene FH sobre la Resistencia al Impacto, en películas de HDPE:

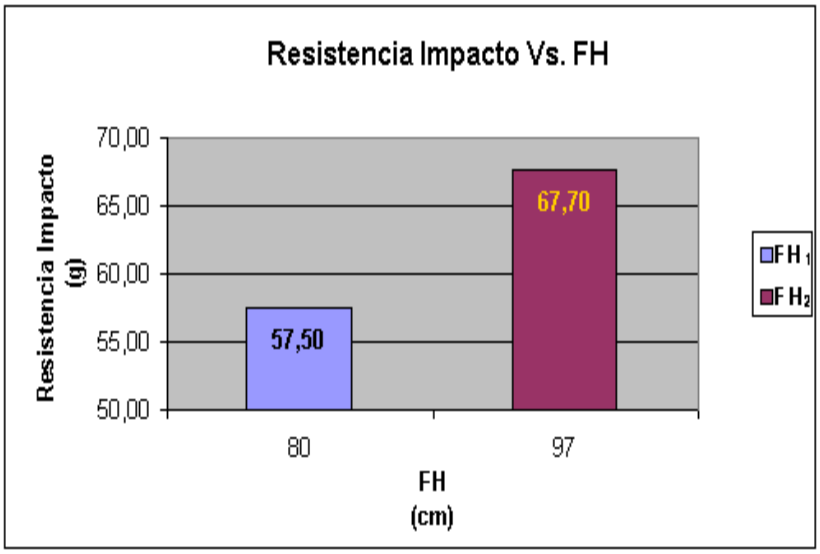


FIGURA 4.26 RESISTENCIA AL IMPACTO VS. FH

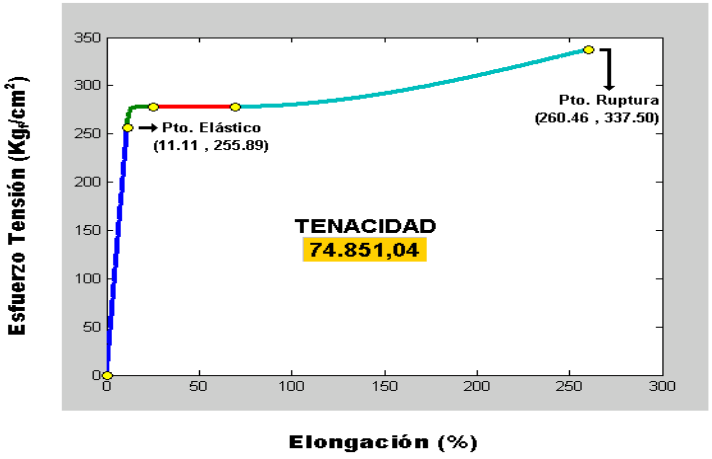
La Figura 4.26 muestra los valores de resistencia al impacto para diferentes valores de FH. El valor de resistencia al impacto para la muestra FH_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de resistencia al impacto para la muestra FH_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la misma Figura 4.26, se puede observar que la resistencia al impacto de la muestra FH_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra FH_1. La diferencia que se observa en la

resistencia al impacto, se debe a la diferencia en la tenacidad de las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación que se obtuvieron para las muestras FH_1 y FH_2, mediante los ensayos de tensión a los cuales se sometieron dichas muestras.

Se conoce que las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, indican la resistencia al impacto que tiene la película; dichas curvas se pueden obtener al someter la película al ensayo de tensión. Para cada película se pueden obtener dos curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, una en DM y otra en DT; entre las dos curvas, la que tiene mayor tenacidad indica la resistencia al impacto de la película. A continuación se mostrarán las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras FH_1 y FH_2:

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra FH_1**



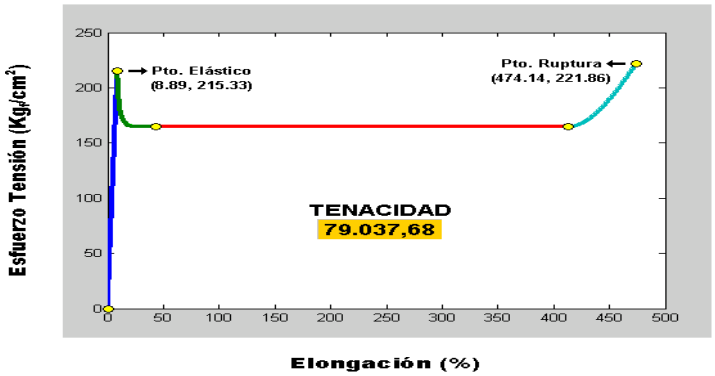


FIGURA 4.27 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA FH_1

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra FH_2**

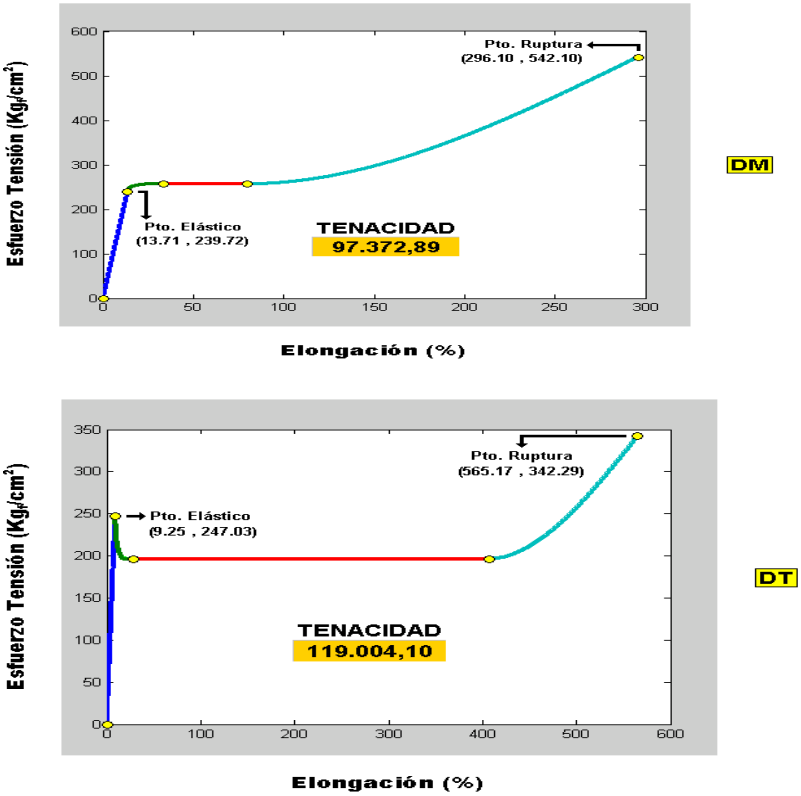


FIGURA 4.28 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA FH_2

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras FH_1 y FH_2, nos indican que la resistencia al impacto de la muestra FH_2 es mayor que la Mediante la Figura 4.29, se puede observar que la permeabilidad de la muestra FH_2 es menor que la permeabilidad de la muestra FH_1, en Guayaquil. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en la Altura de Enfriamiento y en el BUR; las moléculas de la muestra con mayor FH y con mayor BUR, se estiran más, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia ó barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Ya es de nuestro conocimiento la razón por la cual las moléculas de la muestra con mayor FH y con mayor BUR, se estiran más en DM y en DT. La Altura de Enfriamiento y el BUR de la muestra FH_2, son mayores que la Altura de Enfriamiento y el BUR de la muestra FH_1, lo cual nos indica que la muestra FH_2 ha sido mejor estirada que la muestra FH_1, es decir, la muestra FH_2 obtuvo mejor cristalinidad ó mayor número de regiones cristalinas, que es la razón por la cual la muestra FH_2 tiene mayor

resistencia ó barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad, resistencia al impacto de la muestra FH_1, ya que la muestra FH_2 alcanza una máxima tenacidad de **119.004,10** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, y la muestra FH_1 alcanza una máxima tenacidad de **79.037,68** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, con lo cual se observa que la tenacidad de la muestra FH_2 es mayor que la tenacidad de la muestra FH_1, es decir, la resistencia al impacto de la muestra FH_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra FH_1.

La muestra FH_2 es más tenaz que la muestra FH_1, por la alta elongación que alcanzó la muestra FH_2 en DT, además de la mayor resistencia a la tensión que alcanzó esta muestra en la misma dirección de halado. Por esta razón, la muestra FH_2 obtiene mayor capacidad para absorber la energía de impacto, y así, la resistencia al impacto de la muestra FH_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra FH_1, lo cual se observa en la Figura 4.26.

4.4.3 Permeabilidad Vs. FH

Las siguientes gráficas nos ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene FH sobre la Permeabilidad, en películas de HDPE:

- **Guayaquil (70% HR, 32ºC)**

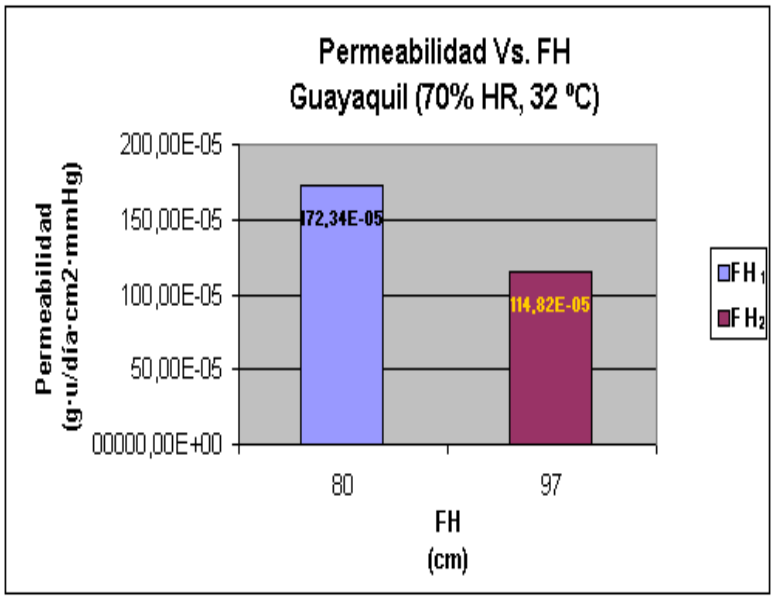


FIGURA 4.29 "PERMEABILIDAD VS. FH" EN GUAYAQUIL

La Figura 4.29 muestra los valores de permeabilidad en Guayaquil, para diferentes valores de FH. El valor de permeabilidad para la muestra FH_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra FH_2, está representado por la columna de color **Vino**.

- **Quito (50% HR, 23ºC)**

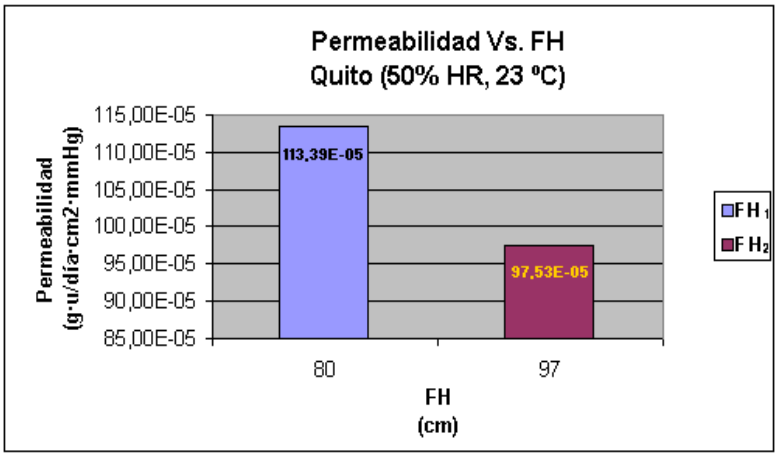


FIGURA 4.30 "PERMEABILIDAD VS. FH" EN QUITO

En la Figura 4.30 se aprecian los valores de permeabilidad en Quito, para diferentes valores de FH. El valor de permeabilidad para la muestra FH_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra FH_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.30, se puede observar que la permeabilidad de la muestra FH_2 es menor que la permeabilidad de la muestra FH_1, en Quito. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la Altura de Enfriamiento y al BUR; las moléculas de la muestra con mayor FH y con mayor BUR, se estiran más, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia o barrera contra el flujo de

vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Como ya se conoce, las moléculas de la muestra con mayor FH y con mayor BUR, se estiran más en DM y en DT. La Altura de Enfriamiento y el BUR de la muestra FH_2, son mayores que la Altura de Enfriamiento y el BUR de la muestra FH_1, lo cual indica que la muestra FH_2 ha sido mejor estirada que la muestra FH_1, es decir, la muestra FH_2 obtuvo mejor cristalinidad o mayor número de regiones cristalinas, que es la razón por la cual la muestra FH_2 tiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

4.5 Análisis de influencia del DDR sobre las propiedades mecánicas de las muestras DDR_1 y DDR_2

Las muestras que se fabricaron para analizar el tipo de influencia del DDR sobre las Propiedades Mecánicas de las películas de HDPE, fueron DDR_1 y DDR_2. En la siguiente tabla, se muestra la materia prima y las condiciones de procesamiento con las que se fabricaron las muestras en mención; también señala las propiedades mecánicas que obtuvieron las muestras en su proceso de fabricación:

TABLA 19

INFLUENCIA DEL ¨DDR¨ SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

MUESTRAS	MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO					PROPIEDADES MECÁNICAS							
	MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR	ELONGACIÓN		RESISTENCIA TENSIÓN		RESISTENCIA IMPACTO	PERMEABILIDAD		ESPESOR
								DM	DT	DM	DT		Guayaquil (70% HR, 32°C)	Quito (50% HR, 23°C)	
	(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm³)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_1/V_0)	($\phi_{burbuja}/\phi_{matriz}$)	(%)	(%)	(Kg/cm²)	(Kg/cm²)	(g)	(g-μ/día-cm²-mm Hg)	(g-μ/día-cm²-mm Hg)	(μ)
DDR_1	0,110	0,943	1	32,71	97	5,25	4,20	296,10	565,17	542,10	342,29	67,70	114,92E-05	97,53E-05	8,93888
DDR_2	0,110	0,943	1	33,02	100	10,61	4,40	323,67	500,73	659,33	220,49	42,60	99,71E-05	81,00E-05	9,92778

La Tabla 19 no muestra una clara influencia del DDR sobre las propiedades mecánicas de las muestras, ya que al aumentar el DDR, desde 5.25 hasta 10.61, se observa un cambio en las demás condiciones de procesamiento y éstos se dan por la acción del operador. Para obtener la muestra DDR_2, se tenía que pasar de la muestra $FLUJO_2$ a la muestra $FLUJO_1$, ya que la producción de la cual se estaba obteniendo las muestras para los análisis no podía permanecer mucho tiempo en las condiciones de procesamiento de la muestra $FLUJO_2$, por lo que, una vez obtenida la muestra $FLUJO_2$, se tenía que volver a la muestra $FLUJO_1$.

Por esta razón se decidió que la muestra $FLUJO_1$ también serviría para el análisis de influencia del DDR sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE, utilizándola, también, como DDR_1, es decir, como la primera muestra para el análisis de influencia

del DDR, lo cual representaría un ahorro, ya que sólo faltaría fabricar la muestra DDR_2 para obtener dos muestras con el DDR diferente, o sea, dos muestras con las cuales acercarse al tipo de influencia que tiene el DDR sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE.

Para la fabricación de la muestra DDR_2, se aprovechó la acción de volver a las condiciones de procesamiento de la muestra $FLUJO_1$; una vez hecho esto, se procedió a cambiar el DDR, con el que se obtuvo la muestra DDR_2.

Para pasar de las condiciones de procesamiento de la muestra $FLUJO_2$ a las condiciones de procesamiento de la muestra $FLUJO_1$, el operador tuvo que aumentar la velocidad del tornillo hasta obtener el FLUJO y el DDR de la muestra $FLUJO_1$; también tuvo que disminuir el caudal de aire de enfriamiento hasta obtener el FH y el BUR de la muestra $FLUJO_1$.

Los cambios que tuvo que realizar el operador en la velocidad del tornillo y en el caudal de aire de enfriamiento, eran manuales, y no había un monitor que indicara las condiciones de procesamiento a las cuales llegó con los cambios que tenía que hacer manualmente, es decir, no existió un monitor que indicara el FLUJO, DDR, FH y BUR, a

los cuales tuvo que llegar con el aumento de la velocidad del tornillo y la disminución del caudal de aire de enfriamiento.

Al no haber un monitor que permitiera observar las condiciones de procesamiento a las cuales se llegó a través de los cambios manuales que se realizaron en la máquina de extrusión de película soplada, el operador realizó los cambios de manera subjetiva, guiándose por su experiencia. Es por esta razón que aparte del cambio en el DDR, se observan cambios en otras condiciones de procesamiento (FLUJO, FH y BUR).

Al aumentar la velocidad del tornillo para aumentar el FLUJO hasta llegar al valor de la muestra $FLUJO_1$ ó DDR_1, el operador aumentó un poco más de lo debido la velocidad del tornillo, obteniendo de esta manera un FLUJO un poco mayor al de la muestra $FLUJO_1$ ó DDR_1. Al obtener un FLUJO un poco mayor, consigue un V_o un poco mayor, y así, un DDR un poco menor al de la muestra $FLUJO_1$ ó DDR_1.

Lo mismo sucede con el caudal de aire de enfriamiento; al disminuir dicho caudal para aumentar el FH y el BUR hasta los valores de la muestra $FLUJO_1$ ó DDR_1, disminuyó un poco más de lo debido el caudal de aire de enfriamiento, obteniendo de esta manera un FH y un BUR un poco mayores a los de la muestra $FLUJO_1$ o DDR_1.

Como se observa, una vez que el operador cambió manualmente la velocidad del tornillo y el caudal de aire de enfriamiento, obtuvo una muestra con condiciones de procesamiento cercanas a las condiciones de procesamiento de la muestra $FLUJO_1$ o DDR_1. Al obtener esta nueva muestra, con los cambios manuales que realizó, procedió a aumentar considerablemente, hasta donde se podía, la velocidad de los rodillos haladores para aumentar considerablemente el DDR de la nueva muestra y así obtener la muestra DDR_2.

Con los primeros cambios manuales, en la velocidad del tornillo y en el caudal de aire de enfriamiento, el operador pensó, subjetivamente, que había vuelto a las condiciones de procesamiento de la muestra $FLUJO_1$, o que había llegado a condiciones de procesamiento cercanas a las de la muestra $FLUJO_1$; pensó que cualesquiera que hayan sido las condiciones a las cuales llegó, iguales o cercanas, las propiedades de la nueva muestra que había obtenido con los cambios manuales en la velocidad del tornillo y en el caudal de aire de enfriamiento, iban a ser iguales a las propiedades de la muestra $FLUJO_1$, sin que existiera algún cambio considerable entre las propiedades de estas dos muestras.

Si no hubiera existido algún cambio considerable entre las propiedades de la nueva muestra que obtuvo el operador con los

cambios manuales en la velocidad del tornillo y en el caudal de aire de enfriamiento, y la muestra $FLUJO_1$, la Tabla 18 sólo hubiera mostrado cambios considerables en las propiedades mecánicas en DM, por el cambio que realizó el operador en la velocidad de los rodillos haladores para la obtención de la muestra DDR_2.

La Tabla 18 no sólo muestra cambios considerables en las propiedades mecánicas en DM, sino también cambios considerables en DT El DDR sólo afecta a las propiedades mecánicas en DM, por lo tanto, los cambios que se aprecian en las propiedades mecánicas en DT, se deben, sin lugar a duda, a una o a algunas de las pequeñas diferencias que existen entre las condiciones de procesamiento, aparte del DDR.

A continuación, se procederá a realizar el análisis de influencia del DDR sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE, a través de las muestras DDR_1 y DDR_2.

En la Tabla 19 se desarrollan gráficas de Propiedades Mecánicas Vs. DDR, para las muestras DDR_1 y DDR_2, con las que se logró un acercamiento al tipo de influencia que tiene DDR sobre cada una de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE.

4.5.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. DDR

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene DDR sobre la Resistencia a la Tensión y la Elongación, en películas de HDPE:

- **Resistencia a la Tensión Vs. DDR**

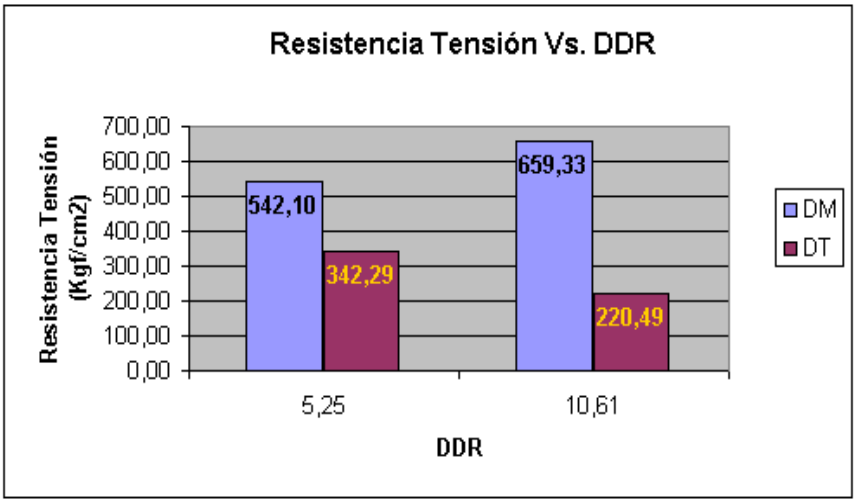


FIGURA 4.31 RESISTENCIA A LA TENSIÓN VS. DDR

La Figura 4.31 muestra los valores de resistencia a la tensión en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de DDR. Los valores de resistencia a la tensión en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los valores de resistencia a la tensión en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.31, se puede observar que en DM, la resistencia a la tensión de la muestra DDR_2 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra DDR_1. En DM, la resistencia a la tensión de la muestra DDR_2 logra ser mayor por tener un DDR mayor, además de tener un FH un poco mayor; lo cual hace que las moléculas tienen un mayor estiramiento.

Mientras el DDR es mayor, hay mayor intensidad de halado en DM, causando que las moléculas se estiren más y se acerquen más entre ellas, de tal manera que haya un mejor orden en la estructura molecular, es decir, la estructura molecular sea más cristalina.

Lo mismo sucede con el FH, mientras mayor es el FH, las moléculas se estiran por más tiempo, causando que éstas se estiren más y se acerquen más entre ellas, de tal manera que se mejora el orden en la estructura molecular, por ende, se genera una mayor cristalinidad.

La diferencia porcentual entre el DDR de la muestra DDR_1 (5.25) y el DDR de la muestra DDR_2 (10.61), es

considerablemente mayor a la diferencia porcentual entre el FH de la muestra DDR_1 (97 cm) y el FH de la muestra DDR_2 (100 cm). Al ser, la diferencia porcentual en el DDR, mayor a la diferencia porcentual en el FH, se atribuyen en mayor porcentaje los cambios que se observan entre las propiedades mecánicas de las muestras DDR_1 y DDR_2, en DM, a la diferencia en el DDR que existe entre estas dos muestras; es decir, las mejores propiedades mecánicas, en DM, de la muestra DDR_2, se deben, en mayor porcentaje, al DDR de esta muestra.

El FLUJO de la muestra DDR_1 es menor que el FLUJO de la muestra DDR_2, lo cual representa una ventaja para la muestra DDR_1, ya que al tener menor FLUJO, hay menor masa que estirar, lo cual facilita el estiramiento en DM, por la menor intensidad con la que actúa la fuerza de gravedad y por el menor enrollamiento que existe en las moléculas.

El FLUJO de la muestra DDR_1 es un poco menor al FLUJO de la muestra DDR_2, al contrario, el DDR de la muestra DDR_2 es mayor al DDR de la muestra DDR_1. Esto nos indica que las ventajas que ofrece el mayor DDR de la muestra DDR_2, superan considerablemente a las ventajas que ofrece

el menor FLUJO de la muestra DDR_1, respecto al estiramiento de las moléculas en DM.

El atribuir al DDR de la muestra DDR_2, en mayor porcentaje, las mejores propiedades de esta muestra, en DM, implica que el FH contribuye en menor proporción a las mejores propiedades de la muestra DDR_2, es decir, el FH de la muestra DDR_2 conlleva a superar un poco más las ventajas que ofrece la muestra DDR_1 respecto al estiramiento de las moléculas en DM.

Como se ha observado, la muestra DDR_2 ofrece mayores ventajas que la muestra DDR_1, para el estiramiento de las moléculas en DM, razón por la cual la muestra DDR_2 alcanza a obtener una mayor resistencia a la tensión en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

En la Figura 4.31, se puede observar que en DT, la resistencia a la tensión de la muestra DDR_1 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra DDR_2. En DT, la resistencia a la tensión de la muestra DDR_1 logra ser mayor por el menor FLUJO que tiene esta muestra; al haber menor FLUJO, las moléculas se estiran con mayor facilidad.

Mientras existe menor FLUJO, hay menor masa que estirar, lo cual facilita el estiramiento en DT, ya que la fuerza de gravedad actúa con menor intensidad y hay un menor enrollamiento en las moléculas. Las ventajas que ofrece la muestra DDR_1 para el estiramiento de sus moléculas, representan una menor resistencia a la presión de aire que se encuentra dentro de la burbuja, de tal manera que las moléculas de la muestra DDR_1 se estiran más que las moléculas de la muestra DDR_2.

En la Tabla 18 se observa que el BUR de la muestra DDR_2 es mayor que el BUR de la muestra DDR_1, con lo cual, la muestra DDR_2 tiene mayor intensidad de halado en DT, y así podría tener mejor estiramiento en sus moléculas.

Aunque la muestra DDR_2 tiene un mayor BUR, la diferencia no es considerable para ofrecer las ventajas que ofrece el menor FLUJO de la muestra DDR_1, respecto al estiramiento de las moléculas; es decir, el BUR de la muestra DDR_2 no es lo suficientemente mayor para estirar bien el exceso de FLUJO que tiene esta muestra respecto a la muestra DDR_1, de tal manera que las moléculas de la muestra DDR_2 no

logran estirarse tanto como las moléculas de la muestra DDR_1.

Las moléculas de la muestra DDR_1, al estirarse más que las moléculas de la muestra DDR_2, en DT, obtienen un mejor estiramiento en esta misma dirección, de tal manera que la muestra DDR_1 alcanza una mayor resistencia a la tensión en DT.

- **Elongación Vs. DDR**

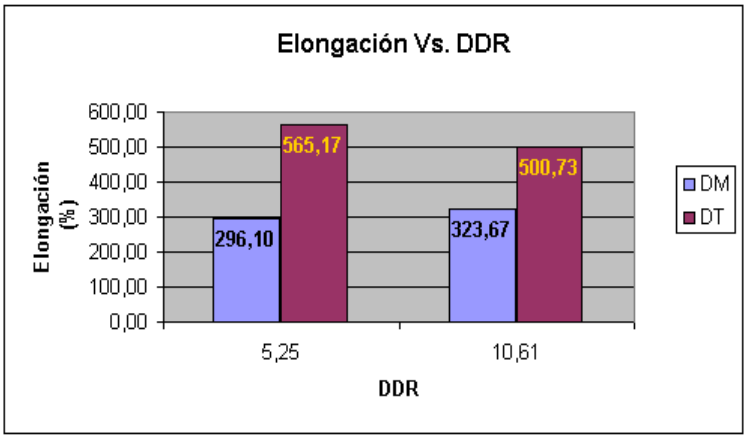


FIGURA 4.32 ELONGACIÓN VS. DDR

La Figura 4.32 muestra los valores de elongación en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de DDR. Los valores de elongación en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los valores de elongación en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.32, se puede observar que en DM, la elongación de la muestra DDR_2 es mayor que la elongación de la muestra DDR_1. En DM la elongación de la muestra DDR_2 logra ser mayor por tener un DDR considerablemente mayor, además de tener un FH y un FLUJO, un poco mayores.

Mientras el DDR es mayor, hay mayor intensidad de halado en DM, causando que las moléculas se estiren más y así formen más enlaces secundarios entre ellas.

Lo mismo sucede con el FH, mientras mayor es el FH, las moléculas se estiran por más tiempo, causando que éstas se estiren más y así formen más enlaces secundarios entre ellas.

Al haber mayor FLUJO, hay mayor masa, es decir, mayor número de moléculas, lo cual implica que hay mayor número de enlaces secundarios entre moléculas.

Ya se conoce que se atribuye al DDR de la muestra DDR_2, en mayor porcentaje, el hecho de que esta muestra tenga mejores propiedades mecánicas en DM, y que el FH

colabora en menor porcentaje con el hecho. Lo mismo sucede con el FLUJO de la muestra DDR_2, en el caso de la elongación en DM; al ser un poco mayor el FLUJO de la muestra DDR_2, colabora en menor porcentaje con el hecho de que la muestra DDR_2 tenga mayor elongación en DM.

Aunque el FLUJO de la muestra DDR_1 es menor que el FLUJO de la muestra DDR_2, se sabe que la diferencia porcentual en el FLUJO entre estas dos muestras, es pequeña en relación a la diferencia porcentual en el DDR, razón por la cual, las ventajas que ofrece el menor FLUJO de la muestra DDR_1, son superadas por las ventajas del mayor DDR de la muestra DDR_2, respecto al estiramiento de las moléculas en DM.

La muestra DDR_2, al tener mayores ventajas que la muestra DDR_1, respecto al estiramiento de las moléculas, sus moléculas se estiran más que las moléculas de la muestra DDR_1, formándose así, un mayor número de enlaces secundarios en la muestra DDR_2, número que aún se incrementa un poco más con el poco mayor FH de la muestra DDR_2 y con el poco mayor FLUJO de esta muestra.

Como se observa, la muestra DDR_2 logra obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra DDR_1, razón por la cual, la muestra DDR_2 logra obtener una mayor elongación en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

En la Figura 4.32, se puede observar que en DT, la elongación de la muestra DDR_1 es mayor que la elongación de la muestra DDR_2. En DT, la elongación de la muestra DDR_1 logra ser mayor por el menor FLUJO que tiene esta muestra; al haber menor FLUJO, las moléculas se estiran con mayor facilidad.

Mientras hay menor FLUJO, hay menor masa que estirar, lo cual facilita el estiramiento en DT, ya que la fuerza de gravedad actúa con menor intensidad y hay un menor enrollamiento en las moléculas.

Las ventajas que ofrece la muestra DDR_1 para el estiramiento de sus moléculas, representan una menor resistencia a la presión de aire que se encuentra dentro de la burbuja, de tal manera que las moléculas de la muestra DDR_1 se estiran más que las moléculas de la muestra DDR_2.

En la Tabla 18 se observa que el BUR de la muestra DDR_2 es mayor que el BUR de la muestra DDR_1, con lo cual, la muestra DDR_2 tiene mayor intensidad de halado en DT, y así podría tener mejor estiramiento en sus moléculas.

Aunque la muestra DDR_2 tiene un mayor BUR, la diferencia no es considerable para ofrecer las ventajas que ofrece el menor FLUJO de la muestra DDR_1, respecto al estiramiento de las moléculas; es decir, el BUR de la muestra DDR_2 no es lo suficientemente mayor para estirar bien el exceso de FLUJO que tiene esta muestra respecto a la muestra DDR_1, de tal manera que las moléculas de la muestra DDR_2 no logran estirarse tanto como las moléculas de la muestra DDR_1.

También hay que mencionar que la muestra DDR_2, al tener mayor FLUJO, tiene mayor masa, lo cual implica que tiene mayor número de moléculas, y así, tiene mayor número de enlaces secundarios entre moléculas, al inicio del proceso de estiramiento.

Las moléculas de la muestra DDR_1, al estirarse más que las moléculas de la muestra DDR_2, en DT, logran tal longitud que los enlaces secundarios que no tienen por el menor

número de moléculas, los tienen por la longitud que alcanzan durante el proceso de estiramiento en DT, llegando a tener un mayor número de enlaces secundarios que las moléculas de la muestra DDR_2.

La muestra DDR_1, al lograr obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra DDR_2, en DT, alcanza una mayor elongación en DT.

4.5.2 Resistencia al Impacto Vs. DDR

La siguiente gráfica nos ayudará a realizar un análisis de la influencia que tiene el DDR sobre la Resistencia al Impacto, en películas de HDPE:

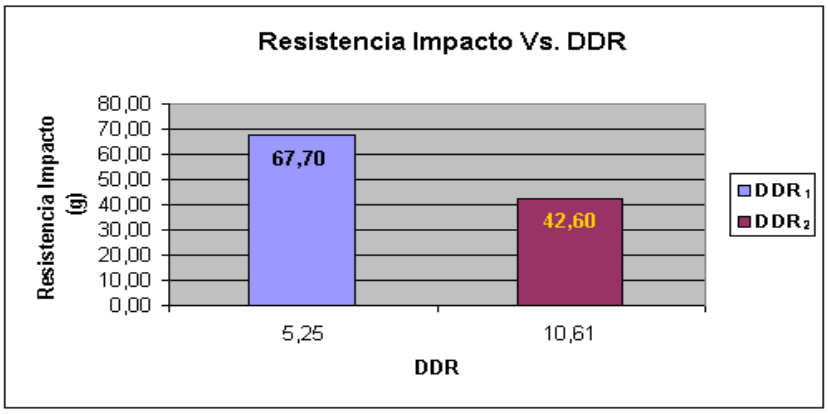


FIGURA 4.33 RESISTENCIA AL IMPACTO VS. DDR

La Figura 4.33 muestra los valores de resistencia al impacto para diferentes valores de DDR. El valor de resistencia al

impacto para la muestra DDR_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de resistencia al impacto para la muestra DDR_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.33, se puede observar que la resistencia al impacto de la muestra DDR_1 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra DDR_2. La diferencia que se observa en la resistencia al impacto, se debe a la diferencia en la tenacidad de las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación que se obtuvieron para las muestras DDR_1 y DDR_2, mediante los ensayos de tensión a los cuales se sometieron dichas muestras.

Es conocido que las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, indican la resistencia al impacto que tiene la película; dichas curvas se pueden obtener al someter la película al ensayo de tensión.

Para cada película se pueden obtener dos curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, una en DM y otra en DT; entre las dos curvas, la que tiene mayor tenacidad indica la resistencia al impacto de la película.

A continuación se muestran las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras DDR_1 y DDR_2:

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra DDR_1**

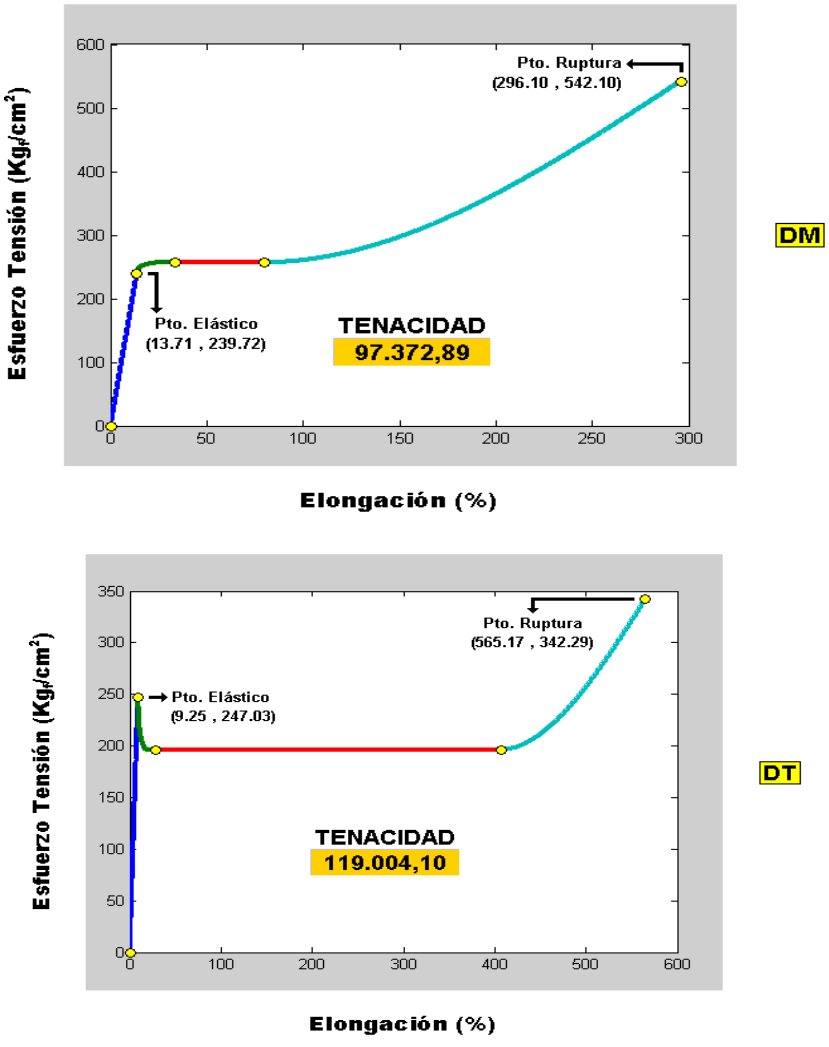
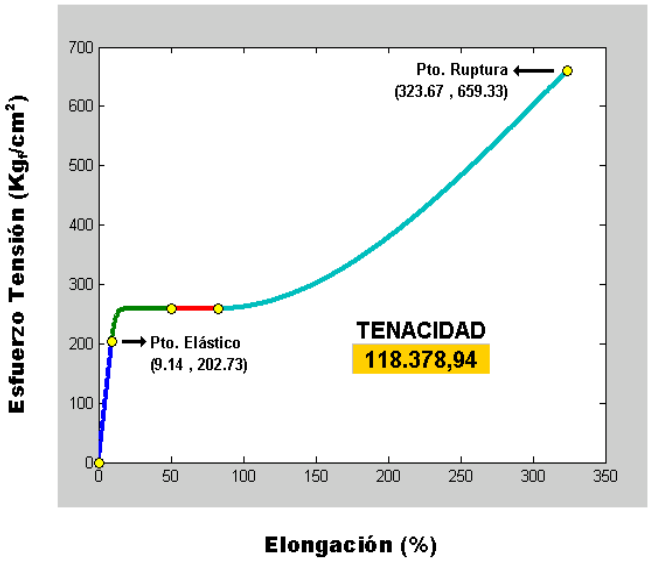


FIGURA 4.34 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA DDR_1

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra DDR_2**



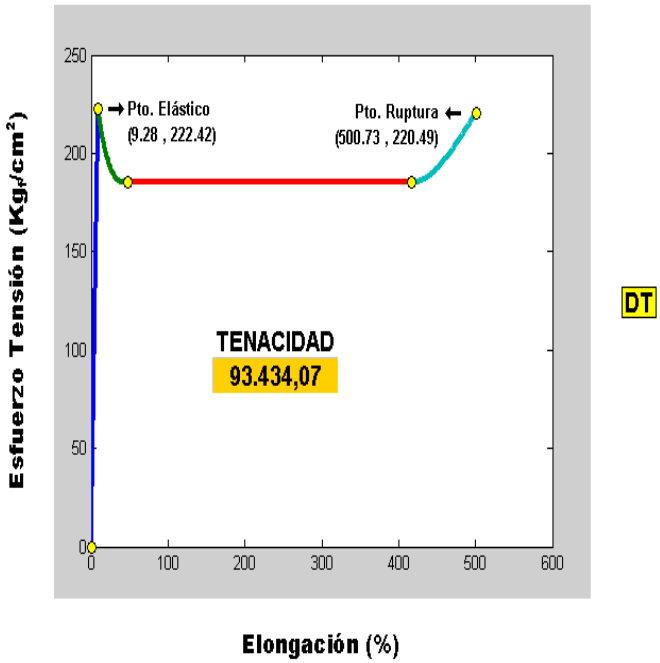


FIGURA 4.35 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA DDR

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras DDR_1 y DDR_2, nos indican que la resistencia al impacto de la muestra DDR_1 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra DDR_2, ya que la muestra DDR_1 alcanza una máxima tenacidad de **119.004,10** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, y la muestra DDR_2 alcanza una máxima tenacidad de **118.378,94** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, con lo cual se observa que la tenacidad de la muestra DDR_1 es mayor que la tenacidad de la muestra DDR_2, es decir, la resistencia al impacto de la muestra DDR_1 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra DDR_2.

La muestra DDR_1 es más tenaz que la muestra DDR_2, por la alta elongación que alcanzó la muestra DDR_1 en DT, además de la mayor resistencia a la tensión que alcanzó esta muestra en la misma dirección de halado. Por esta razón, la muestra DDR_1 obtiene mayor capacidad para absorber la energía de impacto, y así, la resistencia al impacto de la muestra DDR_1 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra DDR_2, lo cual se observa en la Figura 4.33.

4.5.3 Permeabilidad Vs. DDR

Las siguientes gráficas nos ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene el DDR sobre la Permeabilidad, en películas de HDPE:

- **Guayaquil (70% HR, 32ºC)**

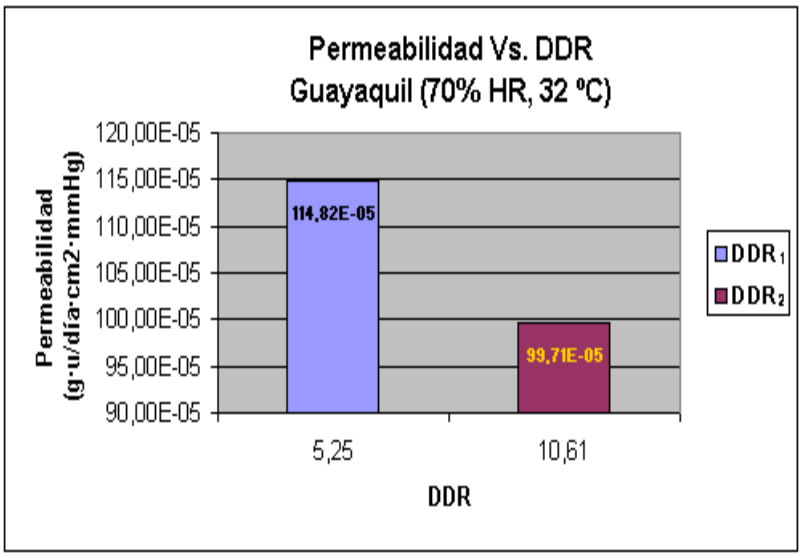


FIGURA 4.36 "PERMEABILIDAD VS. DDR" EN GUAYAQUIL

La Figura 4.36 muestra los valores de permeabilidad en Guayaquil, para diferentes valores de DDR. El valor de permeabilidad para la muestra DDR_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra DDR_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.36, se puede observar que la permeabilidad de la muestra DDR_2 es menor que la permeabilidad de la muestra DDR_1, en Guayaquil.

La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe, en mayor porcentaje, a la diferencia en el DDR; las moléculas de la muestra con mayor DDR, se estiran con mayor intensidad en DM, lo cual genera que las moléculas, en DM, se estiren más y se acerquen más entre ellas, de tal manera que la estructura molecular alcanza un mejor orden, es decir, la estructura molecular llega a ser más cristalina, en mayor porcentaje, por el considerable mayor DDR.

Como ya se conoce, la otra condición de procesamiento que colabora con la mayor cristalinidad de la muestra DDR_2, es el FH de esta muestra, el cual, colabora en menor porcentaje por ser un poco mayor al FH de la muestra DDR_1.

La muestra DDR_2, al ser más cristalina que la muestra DDR_1, obtiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

- **Quito (50% HR, 23ºC)**

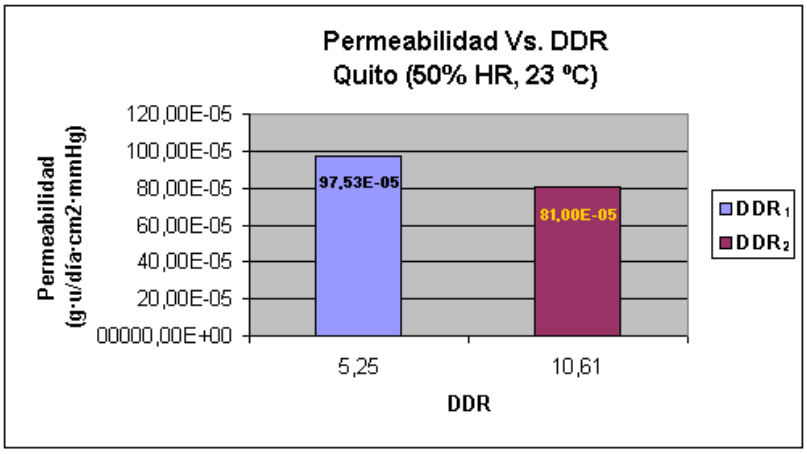


FIGURA 4.37 "PERMEABILIDAD VS. DDR" EN QUITO

La Figura 4.37 muestra los valores de permeabilidad en Quito, para diferentes valores de DDR. El valor de permeabilidad para la muestra DDR_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra DDR_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la misma figura, se observa que la permeabilidad de la muestra DDR_2 es menor que la permeabilidad de la muestra DDR_1, en Quito. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe, en mayor porcentaje, a la diferencia en el DDR; las moléculas de la muestra con mayor DDR, se estiran con mayor intensidad en DM, lo cual genera que las moléculas, en DM, se estiren más y se acerquen más entre

ellas, de tal manera que la estructura molecular alcanza un mejor orden, es decir, la estructura molecular llega a ser más cristalina, en mayor porcentaje, por el considerable mayor DDR.

Como se mencionó, otra condición de procesamiento que colabora con la mayor cristalinidad de la muestra DDR_2, es el FH de esta muestra, el cual, colabora en menor porcentaje por ser un poco mayor al FH de la muestra DDR_1.

La muestra DDR_2, al ser más cristalina que la muestra DDR_1, obtiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

4.6 Análisis de influencia del BUR sobre las propiedades mecánicas de las muestras BUR_1 y BUR_2

Para el análisis de influencia del BUR sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE, se utilizará el mismo esquema que se usó para el análisis de influencia de FH sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE, ya que para cambiar el BUR, se procedió de la misma manera que para cambiar FH; es decir, para cambiar el BUR, se cambió el caudal de aire de enfriamiento, lo cual

también se realizó para cambiar FH, razón por la cual se utiliza el mismo esquema de análisis para ambas condiciones de procesamiento, FH y BUR.

Hay otras maniobras que el operador puede ejecutar para cambiar directamente el BUR, sin que haya algún cambio en otra condición de procesamiento y consiste en hacer un orificio en la burbuja, arriba de la línea de enfriamiento, para que la burbuja empiece a perder aire por el orificio y así la presión del caudal del aire de enfriamiento supere a la presión del aire al interior de la burbuja, de esta manera se ocasionaría una compresión de la burbuja, es decir, el diámetro de la burbuja se reduciría, lo cual significa que se reduciría el BUR. La otra maniobra consiste en aumentar la cantidad de aire que se encuentra en el interior de la burbuja, a través de la válvula de ingreso de aire al interior de la burbuja; el operador puede abrir un poco dicha válvula, de tal manera que ingrese un poco de aire al interior de la burbuja, lo cual ocasionaría una expansión de la burbuja, es decir, habría un aumento en el diámetro de la burbuja, lo que significa un aumento en el BUR.

El operador decidió no ejecutar ninguna de las dos maniobras que se detallaron en el párrafo anterior y decidió cambiar el BUR a través del cambio en el caudal de aire de enfriamiento, lo cual también generaría

un cambio en FH. Las razones por las cuales el operador no ejecutó ninguna de las otras maniobras, radica en los requerimientos del cliente respecto a la película que se estaba produciendo en ese momento, de la cual se estaba obteniendo muestras con diferente BUR y, por la decisión del operador, diferente FH.

Las muestras que se fabricaron para analizar el tipo de influencia del BUR sobre las Propiedades Mecánicas de las películas de HDPE, fueron BUR_1 y BUR_2. A continuación se muestra una tabla que indica la materia prima y las condiciones de procesamiento con las que se fabricaron las muestras en mención; la tabla también indica las propiedades mecánicas que obtuvieron las muestras en su proceso de fabricación:

TABLA 20

INFLUENCIA DEL BUR SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

MUESTRAS	MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO					PROPIEDADES MECÁNICAS							
	MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR	ELONGACIÓN		RESISTENCIA TENSIÓN		RESISTENCIA IMPACTO	PERMEABILIDAD		ESPESOR
								DM	DT	DM	DT		Guayaquil (70% HR, 32°C)	Quito (50% HR, 23°C)	
	(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_O)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)	(%)	(%)	(Kg/cm^2)	(Kg/cm^2)	(g)	($g \cdot \mu/día \cdot cm^2 \cdot mm\ Hg$)	($g \cdot \mu/día \cdot cm^2 \cdot mm\ Hg$)	(μ)
BUR_1	0,110	0,943	1	44,14	47	1,83	1,47	383,59	645,66	384,79	175,79	27,70	242,92E-05	373,86E-05	35,50000
BUR_2	0,110	0,943	1	44,14	65	1,83	1,73	462,80	755,09	593,26	241,05	37,00	205,12E-05	330,34E-05	32,23889

La Tabla 20 no muestra una clara influencia del BUR sobre las propiedades mecánicas de las muestras, ya que al aumentar el BUR, desde 1.47 hasta 1.73, se observa un cambio en FH. Al realizarse, directamente, un cambio en el BUR, a través de un cambio en el caudal de aire de enfriamiento, indirectamente se genera un cambio en FH. El cambio que se genera de manera implícita en FH, colabora con el BUR a que las propiedades mecánicas cambien.

El caudal de aire de enfriamiento, no sólo influye en el BUR, también influye en FH. Para aumentar el BUR, se reduce el caudal de aire de enfriamiento, lo cual genera una reducción en la presión de dicho caudal, de tal manera que la presión del aire al interior de la burbuja se vuelve mayor que la presión del aire de enfriamiento, y así se ocasiona una expansión de la burbuja, es decir, el diámetro de la burbuja aumenta, lo cual significa que aumenta el BUR. Al reducir el caudal de aire de enfriamiento, aumenta FH. Al contrario, para reducir el BUR, se aumenta el caudal de aire de enfriamiento, lo cual genera un aumento en la presión de dicho caudal, de tal manera que la presión del aire al interior de la burbuja se vuelve menor que la presión del aire de enfriamiento, y así se ocasiona una compresión de la burbuja, es decir, el diámetro de la burbuja se reduce, lo cual significa que se reduce el BUR y al aumentar el caudal de aire de enfriamiento, se reduce FH.

Para obtener la muestra BUR_2, se partió de la muestra BUR_1, como se explicará a continuación. El operador de la extrusora donde se fabricaron las muestras BUR_1 y BUR_2, se encontraba fabricando, inicialmente, la muestra BUR_1, cuyos parámetros de fabricación se encuentran en la Tabla 19. Para obtener la muestra BUR_2, el operador cerró un poco la válvula de succión de aire de la bomba de enfriamiento, para disminuir de esta manera el caudal de aire de enfriamiento y así aumentar el BUR, desde 1.47 para BUR_1, hasta 1.73 para BUR_2, con lo cual, también se generó un aumento en FH, desde 47 cm para BUR_1, hasta 65 cm para BUR_2, que es lo que se muestra en la Tabla 19.

Una vez que se ha explicado el cambio implícito que se produce en la condición de procesamiento FH, al cambiar directamente el BUR a través del cambio en el caudal de aire de enfriamiento, se procede a realizar el análisis de influencia del BUR sobre las propiedades mecánicas de las películas de HDPE, utilizando los datos y resultados de las muestras BUR_1 y BUR_2.

En la misma tabla 19 se desarrollarán gráficas de Propiedades Mecánicas Vs. BUR, para las muestras BUR_1 y BUR_2, con las cuales se logrará un acercamiento al tipo de influencia que tiene el BUR

sobre cada una de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE.

4.6.1 Resistencia a la Tensión y Elongación Vs. BUR

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene el BUR sobre la Resistencia a la Tensión y la Elongación, en películas de HDPE:

- **Resistencia a la Tensión Vs. BUR**

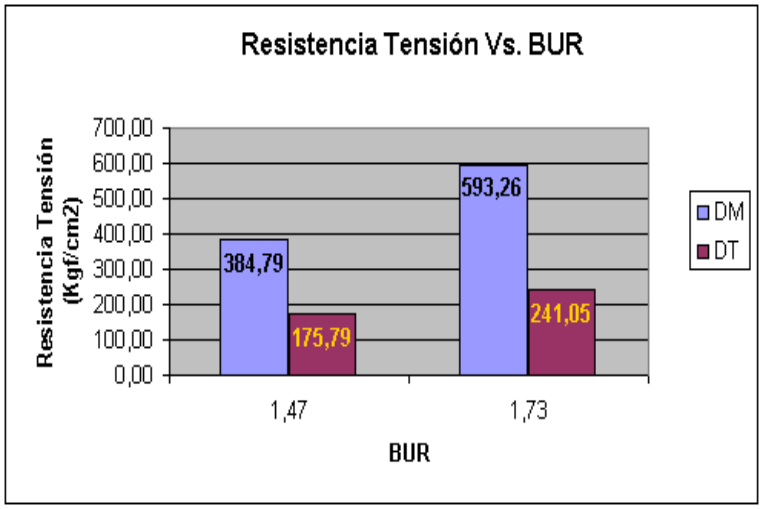


FIGURA 4.38 RESISTENCIA A LA TENSIÓN VS. BUR

La Figura 4.38 muestra los valores de resistencia a la tensión en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de BUR. Los valores de resistencia a la tensión en DM, están representados por las columnas de color

Azul Claro; los valores de resistencia a la tensión en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

  En la Figura 4.38, se puede observar que en DM, la resistencia a la tensión de la muestra BUR_2 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra BUR_1. En DM, la resistencia a la tensión de la muestra BUR_2 logra ser mayor por la mayor altura de enfriamiento que tiene esta muestra; al haber mayor altura de enfriamiento, las moléculas tienen mayor tiempo de estiramiento, lo cual genera que las moléculas se estiren más.

  La altura de enfriamiento de la muestra BUR_2 (65 cm), es considerablemente mayor que la altura de enfriamiento de la muestra BUR_1 (47 cm), con lo cual se obtendría un mejor estiramiento de las moléculas de la muestra BUR_2, ya que al haber mayor FH, hay mayor tiempo de estiramiento, es decir, las moléculas se estiran por más tiempo, lo cual genera que éstas se estiren más y así, la muestra BUR_2 obtenga mayor cristalinidad y resistencia a la tensión.

- **Dirección Transversal (DT)**

En la Figura 4.38, se puede observar que en DT, la resistencia a la tensión de la muestra BUR_2 es mayor que la resistencia a la tensión de la muestra BUR_1. En DT, la resistencia a la tensión de la muestra BUR_2 logra ser mayor por el mayor BUR que tiene esta muestra; al haber mayor BUR, las moléculas se estiran por más tiempo y con mayor intensidad en DT. Como ya se mencionó, el BUR de la muestra BUR_2 es mayor que el BUR de la muestra BUR_1, con lo cual, las moléculas de la muestra BUR_2 se estiran por más tiempo y con mayor intensidad de halado en DT, que es lo que le da a la muestra BUR_2, un mejor estiramiento en sus moléculas, es decir, mayor cristalinidad y resistencia a la tensión en DT.

- **Elongación Vs. BUR**

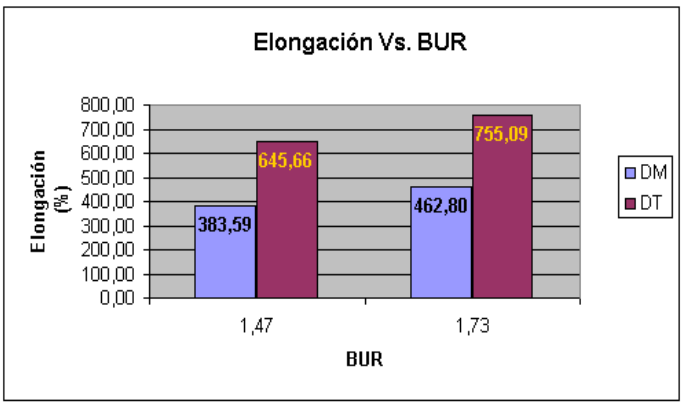


FIGURA 4.39 ELONGACIÓN VS. BUR

La Figura 4.39 muestra los valores de elongación en Dirección Máquina (DM) y en Dirección Transversal (DT), para diferentes valores de BUR. Los valores de elongación en DM, están representados por las columnas de color **Azul Claro**; los valores de elongación en DT, están representados por las columnas de color **Vino**.

- **Dirección Máquina (DM)**

En la Figura 4.39, se puede observar que en DM, la elongación de la muestra BUR_2 es mayor que la elongación de la muestra BUR_1. La diferencia que se observa en la elongación en DM, se debe a la diferencia en FH.

La muestra BUR_2, al tener mayor FH, sus moléculas tienen mayor tiempo de estiramiento, lo cual genera que éstas se estiren más y se vuelvan más largas que las moléculas de la muestra BUR_1. La muestra BUR_2, al obtener moléculas más largas luego del tiempo de relajación, obtiene un mayor número de enlaces secundarios entre sus moléculas.

La muestra BUR_2, al lograr obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra BUR_1, alcanza una mayor elongación en DM.

- **Dirección Transversal (DT)**

  En la Figura 4.39, se puede observar que en DT, la elongación de la muestra BUR_2 es mayor que la elongación de la muestra BUR_1. La diferencia que se observa en la elongación en DT, se debe a la diferencia en el BUR.

  La muestra BUR_2, al tener mayor BUR, sus moléculas se estiran por más tiempo y con mayor intensidad en DT, lo cual genera que éstas se estiren más y se vuelvan más largas que las moléculas de la muestra BUR_1. En DT, la muestra BUR_2, al obtener moléculas más largas luego del tiempo de relajación, obtiene un mayor número de enlaces secundarios entre sus moléculas.

  La muestra BUR_2, al lograr obtener un mayor número de enlaces secundarios que la muestra BUR_1, alcanza una mayor elongación en DT.

4.6.2 Resistencia al Impacto Vs. BUR

La siguiente gráfica ayudará a realizar un análisis de la influencia que tiene el BUR sobre la Resistencia al Impacto, en películas de HDPE:

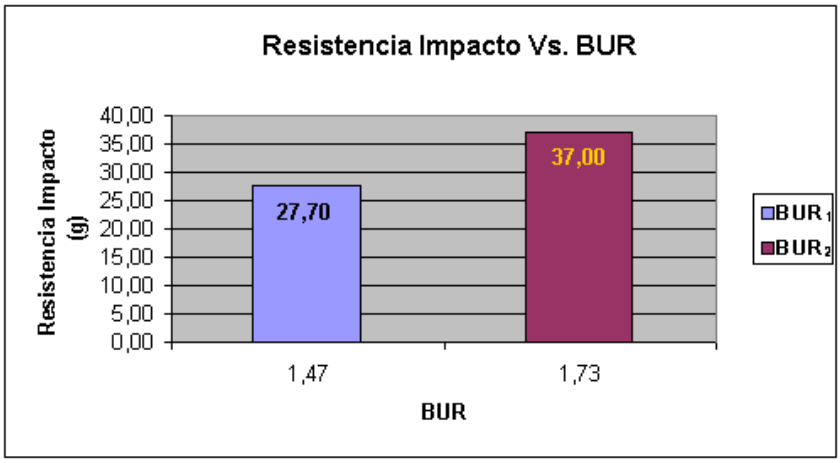


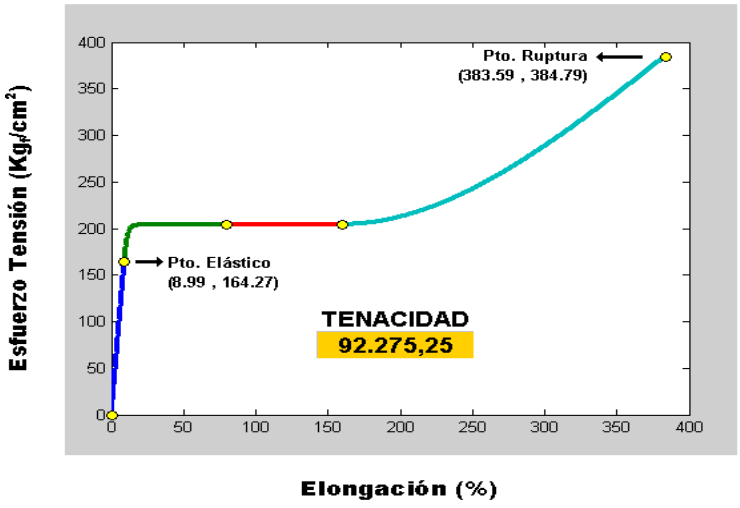
FIGURA 4.40 RESISTENCIA AL IMPACTO VS. BUR

La Figura 4.40 muestra los valores de resistencia al impacto para diferentes valores de BUR. El valor de resistencia al impacto para la muestra BUR_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de resistencia al impacto para la muestra BUR_2, está representado por la columna de color **Vino**. Asimismo, se observa que la resistencia al impacto de la muestra BUR_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra BUR_1. La diferencia que se observa en la resistencia al impacto, se debe a la diferencia en la tenacidad de las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación que se obtuvieron para

las muestras BUR_1 y BUR_2, mediante los ensayos de tensión a los cuales se sometieron dichas muestras.

Como se conoce, las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, indican la resistencia al impacto que tiene la película; dichas curvas se pueden obtener al someter la película al ensayo de tensión. Para cada película se pueden obtener dos curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, una en DM y otra en DT; entre las dos curvas, la que tiene mayor tenacidad indica la resistencia al impacto de la película. A continuación se mostrarán las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras BUR_1 y BUR_2:

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra BUR_1**



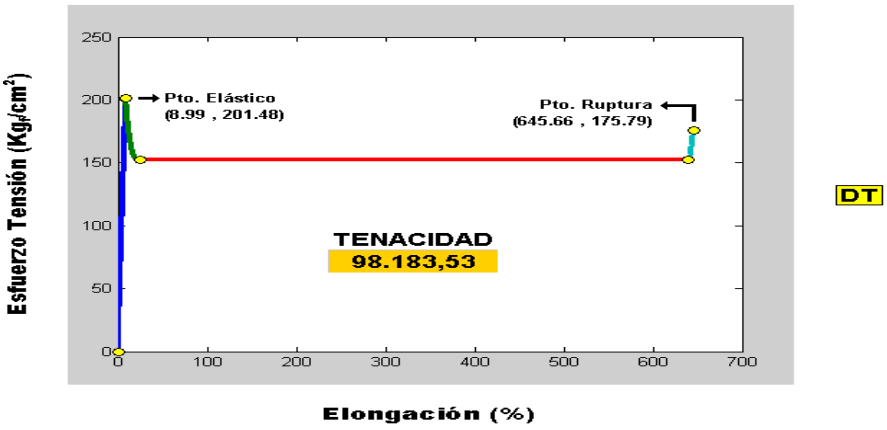


FIGURA 4.41 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN¨ PARA BUR_1

- **Curvas de ¨Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación¨, en DM y en DT, para la muestra BUR_2**

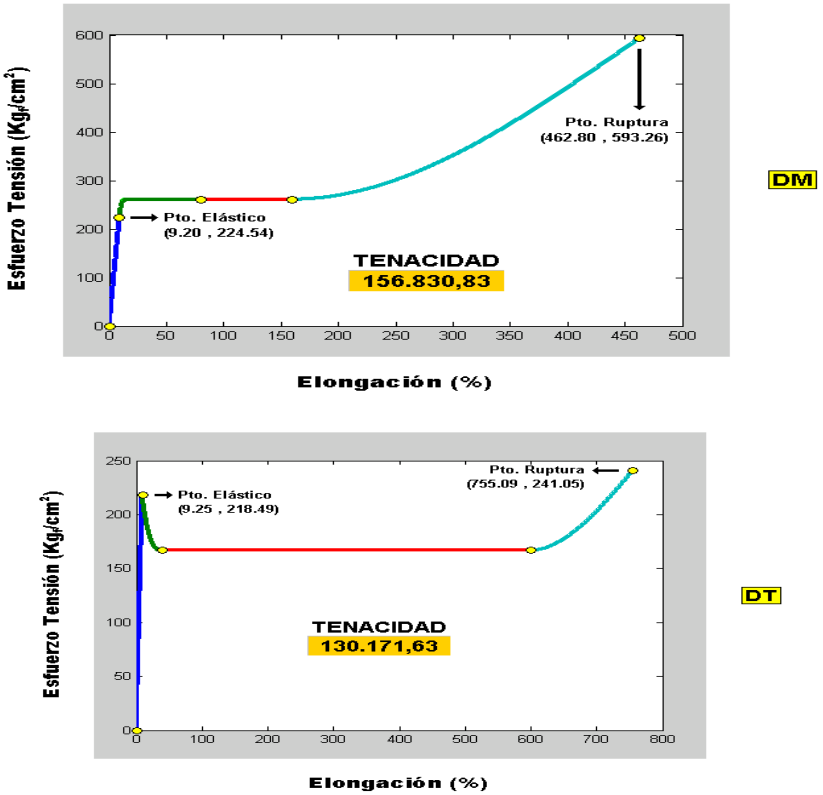


FIGURA 4.42 CURVAS DE ¨ESFUERZO DE TENSIÓN VS. ELONGACIÓN

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, en DM y en DT, para las muestras BUR_1 y BUR_2, señalan que la resistencia al impacto de la muestra BUR_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra BUR_1, ya que la muestra BUR_2 alcanza una máxima tenacidad de **156.830,83** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, y la muestra BUR_1 alcanza una máxima tenacidad de **98.183,53** $\frac{\% \cdot Kg_f}{cm^2}$, con lo cual se observa que la tenacidad de la muestra BUR_2 es mayor que la tenacidad de la muestra BUR_1, es decir, la resistencia al impacto de la muestra BUR_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra BUR_1.

La muestra BUR_2 es más tenaz que la muestra BUR_1, por la alta resistencia a la tensión que alcanzó la muestra BUR_2 en DM, además de la considerable elongación que alcanzó esta muestra en la misma dirección de halado.

Por esta razón, la muestra BUR_2 obtiene mayor capacidad para absorber la energía de impacto, y así, la resistencia al impacto de la muestra BUR_2 es mayor que la resistencia al impacto de la muestra BUR_1, lo cual se observa en la Figura 4.40.

Hay otro indicativo de la resistencia al impacto, este indicativo es la Termografía, la cual puede reemplazar a los ensayos de impacto y a las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación. A continuación se muestran las Termografías de las películas BUR_1 y BUR_2, que se tomaron en el proceso de enfriamiento de dichas películas:

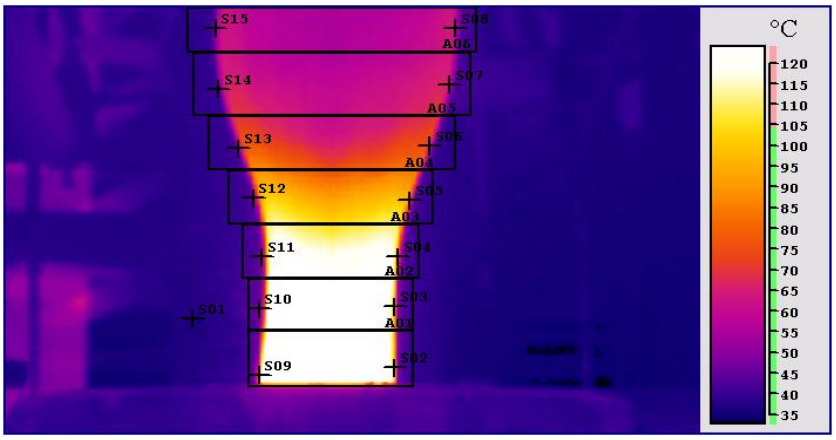


FIGURA 4.43 TERMOGRAFÍA BUR_1

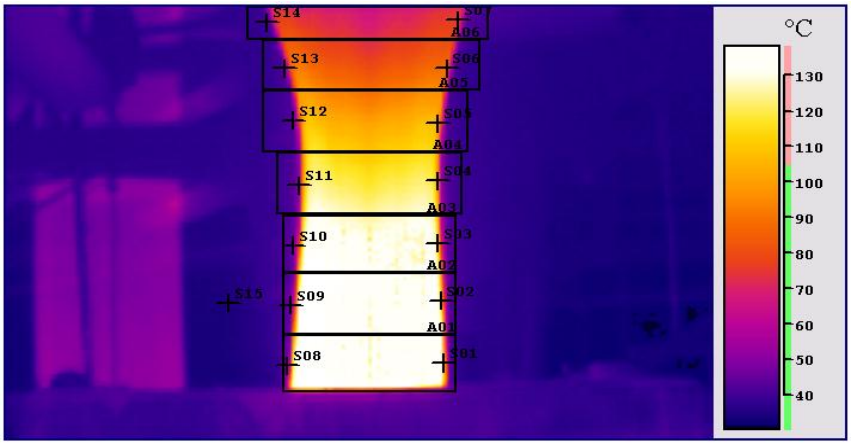


FIGURA 4.44 TERMOGRAFÍA BUR_2

Las Termografías de las películas BUR_1 y BUR_2, muestran una clara diferencia en el proceso de enfriamiento de dichas películas. La película BUR_1, a través de la Termografía, muestra, claramente, un rápido enfriamiento desde que sale del cabezal hasta que termina su altura de enfriamiento. La película BUR_2, a través de la Termografía, muestra, claramente, un enfriamiento lento desde que sale del cabezal hasta que termina su altura de enfriamiento.

Como ya se ha mencionado, la rapidez del proceso de enfriamiento de las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, depende del caudal de aire de enfriamiento, el cual, al disminuir, genera un enfriamiento más lento en la película de HDPE. Las Termografías de las películas BUR_1 y BUR_2, confirman que al disminuir el caudal de aire de enfriamiento, se genera un enfriamiento más lento en la película de HDPE.

Las Termografías de las películas BUR_1 y BUR_2, generaron datos que ayudan a analizar los procesos de enfriamiento de estas dos películas. Con estos datos se procedió a calcular el Gradiente Térmico Promedio para las películas BUR_1 y

BUR_2. A continuación se mostrará la denotación que se utilizó para dicho gradiente:

$$\frac{\partial T}{\partial FH}$$

Donde:

- ✓ ∂T es el diferencial de temperatura que se toma a lo largo de la altura de enfriamiento;
- ✓ ∂FH es el diferencial de la altura de enfriamiento, en el cual se mide el diferencial de temperatura.

La Termografía de la película BUR_1, muestra toda la altura de enfriamiento, la cual mide 47 cm; se puede observar, en dicha Termografía, que la película BUR_1 sale del cabezal con una temperatura de 120 ºC, y al terminar su proceso de enfriamiento, es decir, al terminar la altura de enfriamiento de la película BUR_1, ésta llega a obtener una temperatura de 52.5 ºC. Con los datos obtenidos de la Termografía de la película BUR_1, se puede calcular el Gradiente Térmico Promedio para dicha película:

$$\frac{\partial T}{\partial FH} = \frac{(52.5 - 120)}{47}$$

$$\frac{\partial T}{\partial FH} = -1.44 \frac{°\mathrm{C}}{\mathrm{cm}}$$

La Termografía de la película BUR_2, no muestra toda la altura de enfriamiento, la cual mide 65 cm, ya que para mostrar toda la altura de enfriamiento de la película BUR_2, había que alejarse más de dicha película, con lo cual no se podría observar bien el patrón térmico que tiene la película BUR_2 en su proceso de enfriamiento. Por esta razón, en la Termografía de la película BUR_2, sólo se muestra una parte de la altura de enfriamiento de dicha película; la parte de la altura de enfriamiento que muestra la Termografía de la película BUR_2, mide 47 cm, ya que luego de haber tomado la Termografía de la película BUR_1, se tomó en la misma posición la Termografía de la película BUR_2.

Se puede observar en la Termografía de la película BUR_2, que dicha película sale del cabezal con una temperatura de 130 ºC, y luego de haberse enfriado a lo largo de un espacio de 47 cm, llega a obtener una temperatura de 70 ºC. Con los datos obtenidos de la Termografía de la película BUR_2, se puede calcular el Gradiente Térmico Promedio para dicha película:

$$\frac{\partial T}{\partial FH} = \frac{(70 - 130)}{47}$$

$$\frac{\partial T}{\partial FH} = -1.28 \frac{°\mathrm{C}}{\mathrm{cm}}$$

Los gradientes térmicos calculados para las muestras BUR_1 y BUR_2, confirman lo que se observa en las Termografías de las películas BUR_1 y BUR_2, ya que, en valor absoluto, al ser el Gradiente Térmico Promedio de la película BUR_2 (***- 1.28 ºC/cm***), menor que el Gradiente Térmico Promedio de la película BUR_1 (***- 1.44 ºC/cm***), se concluye que en el proceso de enfriamiento, por centímetro, la película BUR_2 cede menos calor que la película BUR_1, lo cual significa que el proceso de enfriamiento de la película BUR_2 es más lento que el proceso de enfriamiento de la película BUR_1, que es lo que se observa en las Termografías de estas películas.

Las películas de HDPE que se fabrican por medio del proceso de extrusión de película soplada, tienen un comportamiento similar al del acero, cuando se somete al material a un proceso de enfriamiento, luego de haber sido calentado en un tratamiento térmico.

Mientras más lento es el proceso de enfriamiento del acero, luego de haber sido calentado en un tratamiento térmico, la tenacidad del acero será mayor luego del proceso de enfriamiento, ya que aumentará su capacidad de deformarse, lo cual, aunque disminuya su resistencia a la

tensión, generará mayor área bajo la curva de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, área que indica la tenacidad del material, por ende, indica la resistencia al impacto del mismo.

Las películas de HDPE que se fabrican por medio del proceso de extrusión de película soplada, tienen un comportamiento similar al del acero; mientras más lento es el proceso de enfriamiento, luego de haber sido calentado el HDPE, la tenacidad de la película de HDPE será mayor luego del proceso de enfriamiento, ya que aumentará su capacidad de deformarse y su resistencia a la tensión también aumentará. Esta es la ventaja que ofrecen las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, en relación al acero, ya que al ser el proceso de enfriamiento de estas películas de HDPE, más lento, no sólo aumenta su capacidad de deformarse, también aumenta su resistencia a la tensión; en cambio, en el acero, al ser el proceso de enfriamiento más lento, sólo aumenta su capacidad de deformarse, y su resistencia a la tensión disminuye.

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, para las películas BUR_1 y BUR_2, confirman la similitud que existe entre las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, y el acero, en el proceso de enfriamiento, luego de haber sido calentado el material en un tratamiento térmico. En DM y en DT, las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, para las películas BUR_1 y BUR_2, indican que al ser el proceso de enfriamiento más lento, en las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, la tenacidad de estas películas de HDPE aumenta, ya que se observa en las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, para las películas BUR_1 y BUR_2, que la película BUR_2 es considerablemente más tenaz que la película BUR_1, en DM y en DT.

El acero, al tener un proceso de enfriamiento más lento, luego de haber sido calentado en un tratamiento térmico, obtiene mayor tenacidad, lo cual implica que obtiene mayor resistencia al impacto; es decir, el acero, al tener un proceso de enfriamiento más lento, luego de haber sido calentado en un tratamiento térmico, obtiene mayor resistencia al impacto.

La misma relación que existe en el acero, entre el proceso de enfriamiento luego de haber sido calentado el material en un tratamiento térmico, y la resistencia al impacto, existe en las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada.

Las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, para las películas BUR_1 y BUR_2, confirman que al ser el proceso de enfriamiento de la película BUR_2, más lento que el proceso de enfriamiento de la película BUR_1, la tenacidad de la película BUR_2 es mayor que la tenacidad de la película BUR_1; ya se confirmó que la tenacidad de las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, indican la resistencia al impacto, ya que la Figura 4.40 (RESISTENCIA AL IMPACTO VS. BUR) muestra que la resistencia al impacto de la película BUR_2, es mayor que la resistencia al impacto de la película BUR_1, lo que señala las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, para las películas BUR_1 y BUR_2.

Una vez que se ha confirmado la relación que existe en las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, entre su proceso de

enfriamiento y su tenacidad, y a su vez, entre su tenacidad y su resistencia al impacto, se puede concluir que mientras más lento es el proceso de enfriamiento de las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, mayor es la resistencia al impacto de estas películas.

Al concluir que mientras más lento es el proceso de enfriamiento de las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, mayor es la resistencia al impacto de estas películas, se puede aseverar que la Termografía puede reemplazar a los ensayos de impacto y a las curvas de Esfuerzo de Tensión Vs. Elongación, de las películas de HDPE fabricadas por medio del proceso de extrusión de película soplada, lo cual ahorraría tiempo, esfuerzo y dinero para la obtención de la resistencia al impacto de estas películas, ya que al instalar una ***Cámara Termográfica*** de manera permanente, enfocando la etapa de enfriamiento de la película de HDPE fabricada por medio del proceso de extrusión de película soplada, se observaría instantáneamente el patrón térmico que tiene la película, con el cual se podría discernir la resistencia al impacto de la película

4.6.3 Permeabilidad Vs. BUR

Las siguientes gráficas ayudarán a realizar un análisis de la influencia que tiene el BUR sobre la Permeabilidad, en películas de HDPE:

- **Guayaquil (70% HR, 32ºC)**

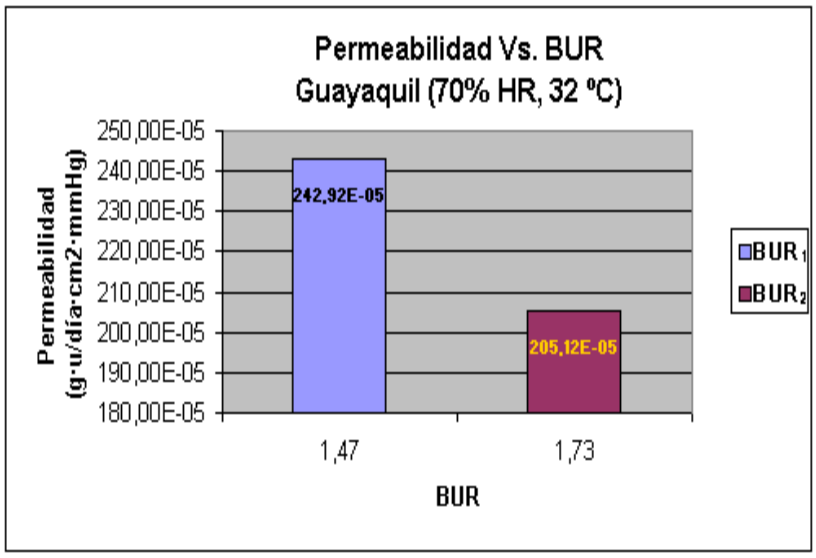


FIGURA 4.45 "PERMEABILIDAD VS. BUR" EN GUAYAQUIL

La Figura 4.45 muestra los valores de permeabilidad en Guayaquil, para diferentes valores de BUR. El valor de permeabilidad para la muestra BUR_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra BUR_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.45, se puede observar que la permeabilidad de la muestra BUR_2 es menor que la permeabilidad de la muestra BUR_1, en Guayaquil. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en el BUR y en la altura de enfriamiento; las moléculas de la muestra con mayor BUR y con mayor FH, se estiran más, lo cual mejora la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Ya es conocida la razón por la cual las moléculas de la muestra con mayor BUR y con mayor FH, se estiran más en DM y en DT. El BUR y la altura de enfriamiento de la muestra BUR_2, son mayores que el BUR y la altura de enfriamiento de la muestra BUR_1, lo cual nos indica que la muestra BUR_2 ha sido mejor estirada que la muestra BUR_1, es decir, la muestra BUR_2 obtuvo mejor cristalinidad o mayor número de regiones cristalinas, que es la razón por la cual la muestra BUR_2 tiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

- **Quito (50% HR, 23ºC)**

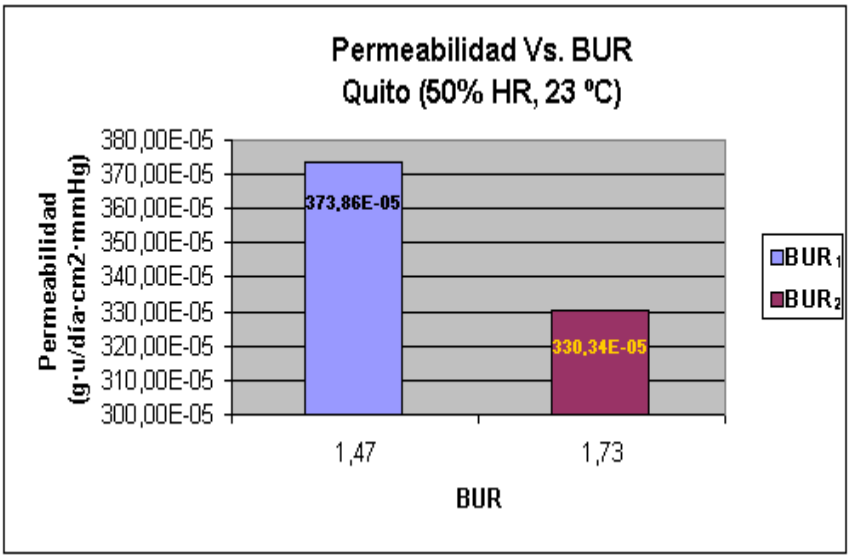


FIGURA 4.46 "PERMEABILIDAD VS. BUR" EN QUITO

La Figura 4.46 muestra los valores de permeabilidad en Quito, para diferentes valores de BUR. El valor de permeabilidad para la muestra BUR_1, está representado por la columna de color **Azul Claro**; el valor de permeabilidad para la muestra BUR_2, está representado por la columna de color **Vino**.

En la Figura 4.46, se puede observar que la permeabilidad de la muestra BUR_2 es menor que la permeabilidad de la muestra BUR_1, en Quito. La diferencia que se observa en la permeabilidad, se debe a la diferencia en el BUR y en la altura de enfriamiento; las moléculas de la muestra con mayor BUR y con mayor FH, se estiran más, lo cual mejora

la cristalinidad de la película, y así se obtiene mejor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

Ya se conoce la razón por la cual las moléculas de la muestra con mayor BUR y con mayor FH, se estiran más en DM y en DT. El BUR y la altura de enfriamiento de la muestra BUR_2, son mayores que el BUR y la altura de enfriamiento de la muestra BUR_1, lo cual indica que la muestra BUR_2 ha sido mejor estirada que la muestra BUR_1, es decir, la muestra BUR_2 obtuvo mejor cristalinidad o mayor número de regiones cristalinas, que es la razón por la cual la muestra BUR_2 tiene mayor resistencia o barrera contra el flujo de vapor de agua (WVTR) a través de la película, o sea, menor permeabilidad.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones:

1. Mientras mejor es el estiramiento de las moléculas de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, en la etapa de enfriamiento, mejores serán las propiedades mecánicas de dichas películas.

2. El estiramiento de las moléculas de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, se mejora en la etapa de enfriamiento de dichas películas, por medio de cualquiera de los siguientes cambios:

- Utilizando HDPE con mayor Melt Index (MI), como materia prima.
- Utilizando HDPE con menor Densidad (ρ), como materia prima.
- Disminuyendo las Revoluciones por Minuto (RPM) del Tornillo de la extrusora.
- Aumentando las Revoluciones por Minuto (RPM) de los Rodillos Haladores.
- Disminuyendo el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo.

3. Mientras mayor es el Melt Index (MI) del HDPE utilizado como materia prima, las moléculas de la materia prima son más cortas, lo cual facilita el estiramiento de las mismas y así se mejoran algunas de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE:

   - La resistencia a la tensión será mayor en DM y en DT.
   - La elongación será mayor en DM.
   - La permeabilidad será menor.

4. Mientras menor es la Densidad (ρ) del HDPE utilizado como materia prima, hay menor número de moléculas por unidad de volumen, lo cual facilita el estiramiento de las mismas y así se

mejoran algunas de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE:

- La resistencia a la tensión será mayor en DM y en DT.
- La elongación será mayor en DM.
- La permeabilidad será menor.

5. Al disminuir las Revoluciones por Minuto (RPM) del Tornillo de la extrusora, disminuye la cantidad de masa por unidad de tiempo, que la extrusora envía al cabezal para que sea soplada luego de que pase a través de dicho cabezal. Al haber menos masa por unidad de tiempo saliendo del cabezal, las moléculas de dicha masa se estirarán con mayor facilidad, con lo cual se mejorarán algunas de las propiedades mecánicas:

   - La resistencia a la tensión será mayor en DM y en DT.
   - La resistencia al impacto será mayor.
   - La permeabilidad será menor.

6. Al aumentar las Revoluciones por Minuto de los Rodillos Haladores, aumenta el DDR, y así aumenta la intensidad de halado de las moléculas de la película de HDPE soplada, en Dirección Máquina (DM); dicho aumento en el DDR, generará que las moléculas de la película de HDPE soplada, se estiren

más en Dirección Máquina (DM), con lo cual se mejorarán algunas de las propiedades mecánicas:

- La resistencia a la tensión será mayor en DM.
- La elongación será mayor en DM.
- La permeabilidad será menor.

7. Al disminuir el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, aumentará la Altura de Enfriamiento (FH) y el BUR de la película de HDPE soplada. Al aumentar la Altura de Enfriamiento (FH) de la película de HDPE, aumenta el tiempo de enfriamiento de la misma, y así, las moléculas de dicha película se estiran por más tiempo en Dirección Máquina (DM), es decir, dichas moléculas se estiran más en Dirección Máquina (DM). Al disminuir el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, aumenta el Diámetro de la Burbuja, lo cual genera un aumento en el BUR; al aumentar el BUR, las moléculas de la película de HDPE se estiran con mayor intensidad y por más tiempo, en Dirección Transversal (DT). Al haber un mejor estiramiento en las moléculas de la película de HDPE, por causa de una disminución en el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, las propiedades mecánicas mejorarán:

   - La resistencia a la tensión será mayor en DM y en DT.

- La elongación será mayor en DM y en DT.
- La resistencia al impacto será mayor.
- La permeabilidad será menor.

8. Mientras mejor es la distribución de temperaturas de la película de HDPE fabricada a través del proceso de extrusión de película soplada, en su etapa de enfriamiento, más tenaz será la película, por lo tanto, tendrá mayor resistencia al impacto.

5.2 Recomendaciones

1. Cuando se aumenta el Melt Index (MI) para mejorar algunas de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, se recomienda disminuir el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, para que también mejoren las siguientes propiedades mecánicas de dichas películas:
   - La elongación en DT.
   - La resistencia al impacto.

2. Cuando una disminución del Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, acompaña a un aumento en el Melt Index (MI), dicha disminución en el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, no sólo mejorará la elongación en DT y la resistencia al impacto,

sino que, también mejorará, aún más, las propiedades mecánicas que obtienen las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, al sólo aumentar el Melt Index (MI); es decir:

- La resistencia a la tensión aumentará, aún más, en DM y en DT.
- La elongación aumentará, aún más, en DM.
- La permeabilidad disminuirá, aún más.

3. Cuando se disminuye la Densidad (ρ) para mejorar algunas de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, se recomienda disminuir el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, para que también mejoren las siguientes propiedades mecánicas de dichas películas:

   - La elongación en DT.
   - La resistencia al impacto.

4. Cuando una disminución del Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, acompaña a una disminución en la Densidad (ρ), dicha disminución en el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, no sólo mejorará la elongación en DT y la resistencia al impacto,

sino que, también mejorará, aún más, las propiedades mecánicas que obtienen las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, al sólo disminuir la Densidad (ρ); es decir:

- La resistencia a la tensión aumentará, aún más, en DM y en DT.
- La elongación aumentará, aún más, en DM.
- La permeabilidad disminuirá, aún más.

5. Cuando se aumentan las Revoluciones por Minuto de los Rodillos Haladores para mejorar algunas de las propiedades mecánicas de la película de HDPE fabricada a través del proceso de extrusión de película soplada, se recomienda disminuir el Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, para que también mejoren las siguientes propiedades mecánicas de dichas películas:

   - La resistencia a la tensión en DT.
   - La elongación en DT.
   - La resistencia al impacto.

6. Caudal de Aire de Enfriamiento Externo, no sólo mejorará la resistencia a la tensión en DT, la elongación en DT y la

resistencia al impacto, sino que, también mejorará, aún más, las propiedades mecánicas que obtiene la película de HDPE fabricada a través del proceso de extrusión de película soplada, al sólo aumentar las Revoluciones por Minuto de los Rodillos Haladores; es decir:

- La resistencia a la tensión aumentará, aún más, en DM.
- La elongación aumentará, aún más, en DM.
- La permeabilidad disminuirá, aún más.

7. Se recomienda instalar una ***Cámara Termográfica*** de manera permanente, enfocando la etapa de enfriamiento de la película de HDPE fabricada por medio del proceso de extrusión de película soplada, ya que la imagen que enfocaría dicha cámara, mostraría la distribución de temperaturas que tiene la película en su etapa de enfriamiento. Al observar la distribución de temperaturas en mención, se podría discernir la resistencia al impacto que tiene la película, y así se ahorraría tiempo, esfuerzo y dinero en realizar ensayos de impacto.

8. Se recomienda profundizar en el estudio de la materia prima, de las condiciones de procesamiento y de las propiedades mecánicas de las películas de HDPE fabricadas a través del proceso de extrusión de película soplada, ya que al profundizar

en dicho estudio, se profundizaría en la influencia que tiene la materia prima y las condiciones de procesamiento, sobre las propiedades mecánicas de las películas en mención, y así se podría llegar a un modelo matemático que represente esta influencia. Con este modelo matemático se podría desarrollar un programa que me permita ingresar los parámetros de materia prima y de condiciones de procesamiento, y que me muestre los valores de las propiedades mecánicas que obtendrá la película al ser fabricada con los parámetros de materia prima y de condiciones de procesamiento que se ingresaron en el programa.

APÉNDICES

APÉNDICE A

HOJA TÉCNICA DE RESINA ENTEC HFB950

ENTEC

Entec International
7900 Summit Tower Blvd.
Suite 650
Orlando, FL 32810

Certificate of Analysis

Material Grade:	HFB950 - HDPE
Lot No.	HD0488768
Production Date:	Feb-26-2008
Quantity:	191,350 NET LBS.

Test Description	Test Result	Unit of Measure
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

Garantizado por
DISAN
ESTE CERTIFICADO ES FIEL COPIA DEL ORIGINAL

Fecha de Vencimiento 26 FEB. 2009

APÉNDICE B

HOJA TÉCNICA DE RESINA SABIC 118

سابك

118 Series

LLDPE for Blown Film Extrusion

118 Series are general purpose film grades Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) resins. Films produced from these resins are tough with excellent puncture resistance, high tensile strength and good hot tack properties.

118 Series includes the following grades:

Grade	Antiblock (ppm)	Slip (ppm)	Applications
118N *	None	None	Blending stock for other resins, blown films of thick gauge, stretch wrap film
118L	2500	1000	General purpose blown films of medium gauge
118Z	2500	1000	General purpose blown films of medium gauge
118W	3500	1500	General purpose blown films of thin gauge.
118WS **	2700	1400	High clarity thin gauge film

* Must be modified with Slip/Antiblock as required

** High Clarity Film

Typical Applications

Shipping sacks, ice bags, frozen food bags, stretch wrap film, produce bags, liners, carrier bags, garbage bags, agricultural films, laminated and coextruded films for meat wrap, frozen food and other food packaging, shrink film (for blending with LDPE), industrial consumer packaging, and high clarity film applications if blended with (10-20%) LDPE.

Physical Properties		Unit	Value(1)	Test Method
Melt index		g/10 min	1.0	D-1238
Density		g/cm³	0.918	D-792
Film Properties *				
Tensile strength @ yield	MD	MPa	11	D-882
	TD		11.5	
Tensile strength @ break	MD	MPa	40	D-882
	TD		32	
Tensile elongation @ break	MD	%	750	D-882
	TD		800	
1% Secant modulus	MD	MPa	220	D-882
	TD		260	
Dart drop impact, F		g	154	D-1709
Puncture resistance		J/mm	68	SABIC method
Elmendorf tear strength	MD	g	165	D-1922
	TD		300	
Gloss 60° angle			60	D-2457
Haze		%	9.5	D 1003

* The film properties have been measured on [illegible] masterbatch added.

(1) Typical values [illegible]

APÉNDICE C

HOJA TÉCNICA DE RESINA SABIC F00952

سابك

SABIC® HDPE F00952

High density polyethylene for Blown film

Description

SABIC® HDPE F 00952 resin is a high molecular weight high density polyethylene copolymer which has been designed specifically for blown film extrusion. Its high molecular weight, broad molecular distribution and high density combine succesfully to give excellent extrudability with high film strenght and rigidity. The material contains ant. oxidant

Application

SABIC® HDPE F 00952 resin is recommended for blown film extrusion. This product is suggested for the manufacture of high strength grocery sacks, shopping bags and high quality thin films for multi wall sack liners and replacement for thin paper products. Films of this poduct are readily treated and printed to give high quality graphics

Processing conditions

SABIC® HDPE F 00952E can be extruded on conventional HMW HDPE equipment at melt temperatures between 200 and 235 °C

Film properties

Film properties have been measured at 15 µm blown film with a BUR = 4

Typical data Revision 20080219

Properties	Units SI	Values	Test methods
Polymer properties			
Melt flow rate (MFR)			ISO 1133
at 190 °C and 2.16 kg	g/10 min	0.05	
at 190 °C and 21.6 kg	g/10 min	9	
Density	kg/m³	952	ISO 1183
Formulation			
Anti oxidant	mg/kg	+	SABIC method
Film properties			
Dart impact F50	g	180	ASTM D 1709
Tear strength TD Elmendorf	g	60	ASTM D 1922
Tear strength MD Elmendorf	g	12	ASTM D 1922
Tensile test film			ASTM D 882
Yield stress TD	MPa	31	
Yield stress MD	MPa	33	
Stress at break TD	MPa	56	
Stress at break MD	MPa	60	
Strain at break TD	%	630	
Strain at break MD	%	400	
Modulus of elasticity TD	MPa	1600	
Modulus of elasticity MD	MPa	1260	
Thermal properties			
Vicat softening temperature	°C	125	ASTM D 1525

internet: www.SABIC-europe.com
email: TDS-MFH@SABIC-europe.com

APÉNDICE D

HOJA TÉCNICA DE RESINA BRASKEM FLEXUS 9211

Bras

Folha de Dados
Rev. 1 – Maio/07
Flexus 9211

[illegible]

Descrição

Aplicações

Processo

Propriedades de Controle

[illegible]	[illegible]	[illegible]
D-1238	g/10 min	1,0
D-792A	g/cm3	0,917

Propriedades Típicas

[illegible]	[illegible]	[illegible]
D-1003	%	13,9
D-2457	%	8
D-882	Mpa	53/46
D-882	%	871/1035
D-882	MPa	142/154
D-1894	[illegible]	0,09
D-1709	g	>850
D-1922	Kgf/cm	91/141
Método Braskem	°C	94

Observações Finais

APÉNDICE E

HOJA TÉCNICA DE RESINA IPIRANGA GM 9450 F

Ipiranga

GM 9450 F

Polietileno de Alta Densidad - Extrusión

APLICACIONES

Extrusión :
Película :

RECOMENDACIONES DE PROCESAMIENTO

Extrusión Película

Perfil de Temperatura

Razón de soplo
Altura del cuello

PROPIEDADES	METODO ASTM	UNIDAD	VALOR

APÉNDICE F

HOJA TÉCNICA DE RESINA BRASKEM LL-218/21

Braskem

Folha de Dados
Rev. 1 – Mar/07
LL-218/21

Descrição:

Aditivação:

Aplicações:

Processo:

Propriedades de Controle:

	D-1238	g/10 min	2,0
	D-792	g/cm³	0,917

Propriedades Típicas:

	D-1003	%	55,6
	D-2457	%	2,4
	D-882	MPa	31/27
	D-882	%	1140/1441
	D-882	MPa	203/216
	D-1709	gF/50%f	97
	D-1922	KgF/cm	56/135

Observações Finais:

APÉNDICE G

HOJA TÉCNICA DE RESINA ALATHON L 5005

athon®

_ 5005

gh Density Polyethylene
MW Film Grade
elt Index 0.057   Density 0.949

cations
THON L 5005 is a high molecular weight high density copolymer that provides broad bimodal molecular weight distribution, high stiffness and good heat seal response and strength. Typical applications include merchandise bags, grocery sacks, trash can liners, produce bags and stock.

cation
5005 meets the requirements of the Food and Drug Administration regulation 21 CFR 177 1520. This regulation allows the use of this olefin polymer in "...articles or components of articles intended for use in contact with food." Specific limitations or conditions of use may apply. Contact your Equistar sales representative for more information.

Processing Techniques
Specific recommendations for processing L 5005 can only be made when the processing conditions, equipment and end use are known. For further suggestions, please contact your Equistar sales representative.

Physical Properties

Property	Nominal Value	Units	ASTM Test Method
Index	0.057	g/10 min	D 1238
Density	0.949	g/cc	D 1505
Total Energy Dart Drop	2.05	ft-lbs/mil	D 3420
Elmendorf Tear Strength, MD (TD)	14 (35)	g	D 1922
Tensile Strength @ Yield, MD (TD)	3,800 (3,400)	psi	D 882
Tensile Strength @ Break, MD (TD)	8,500 (5,000)	psi	D 822
Elongation @ Break, MD (TD)	300 (420)	%	D 882
Secant Modulus, MD (TD)	115,000 (140,000)	psi	D 882

cal Process Condition Ranges:

=3.5-4.5:1; Neck Height=6-9 Die Diameters; Die Gap (nominal), in =0.040-0.050; Tower Height=Relatively Short; Output, Lb/Hr/In. of Die Circumference=10-12; Melt Temperature - 390-420°F (199-216°C)

The information on this document is, to our knowledge, true and accurate. However, since the particular uses and the actual conditions of use of our products are beyond our control, establishing satisfactory performance of our products for the intended application is the customer's sole responsibility. All uses of Equistar products and any written or oral information, suggestions or technical advice from Equistar are without warranty, express or implied, and are not an inducement to use any process or product in conflict with any patent.

Equistar materials are not designed or manufactured for use in implantation in the human body or in contact with internal body fluids or tissues. Equistar makes no representation, promise, express warranty or implied warranty concerning the suitability of these materials for use in implantation in the human body or in contact with internal body tissues or fluids.

The detailed safety and disposal information on our products is contained in the Material Safety Data Sheet (MSDS). All users of our products are urged to retain and use the MSDS. A MSDS is automatically distributed upon purchase/order execution. You may request an advance or replacement copy by calling our MSDS Hotline at (800) 700-0946.

Alathon is a trademark of Equistar Chemicals, LP

Equistar Chemicals, LP
1221 McKinney, Suite 700
P.O. Box 2583
Houston, Texas 77252-2583
(713) 652-7200
http://www.equistarchem.com

EQUISTAR

601005

APÉNDICE H

HOJA TÉCNICA DE RESINA WESTLAKE LF 1020

Westlake Polymers LP

LF 1020

Linear Low Density Polyethylene

Typical Physical Properties

PROPERTY		EXPECTED VALUE	ASTM METHOD
MELT INDEX (gm/10 min.)		1.1	D 1238
DENSITY (g/cm³)		0.918	D 1505
FILM GAUGE (mil)		1.0	WESTLAKE
*HAZE		15	D 1003
DART DROP IMPACT, F_{50} (grams)		120	D 1709A
ELMENDORF TEARS STRENGTH (grams)	MD	150	D 1922A
	TD	450	
TENSILE STRENGTH @ YIELD (psi)	MD	1,500	D 882
	TD	1,500	
TENSILE STRENGTH @ BREAK (psi)	MD	5,200	D 882
	TD	3,600	
ULTIMATE ELONGATION (%)	MD	670	D 882
	TD	900	
1% SECANT MODULUS (psi)	MD	27,000	D 882
	TD	30,000	

Applications

For agriculture film, coextrusion, and trash can liners.

Properties

Excellent mechanical with Down gauging advantages

Typical film property as measured on a 1.0 mil blown film sample fabricated at a 2.5:1 B.U.R.
Unformulated polymer only

NOTES: KOSHER APPROVED

FDA
This material complies with FDA regulations in 21 CFR section 177.1520 paragraph C section 3.1a

PROCESSING
Melt temperatures of 400 - 420 F are recommended for Westlake Polymers LF 1020 with blow up ratios of 2:1 or higher

NOTICE
Above properties represent typical values for the above material as measured by Westlake Polymers LP. The determination of suitability and fitness for use is the sole responsibility of the buyer and user.

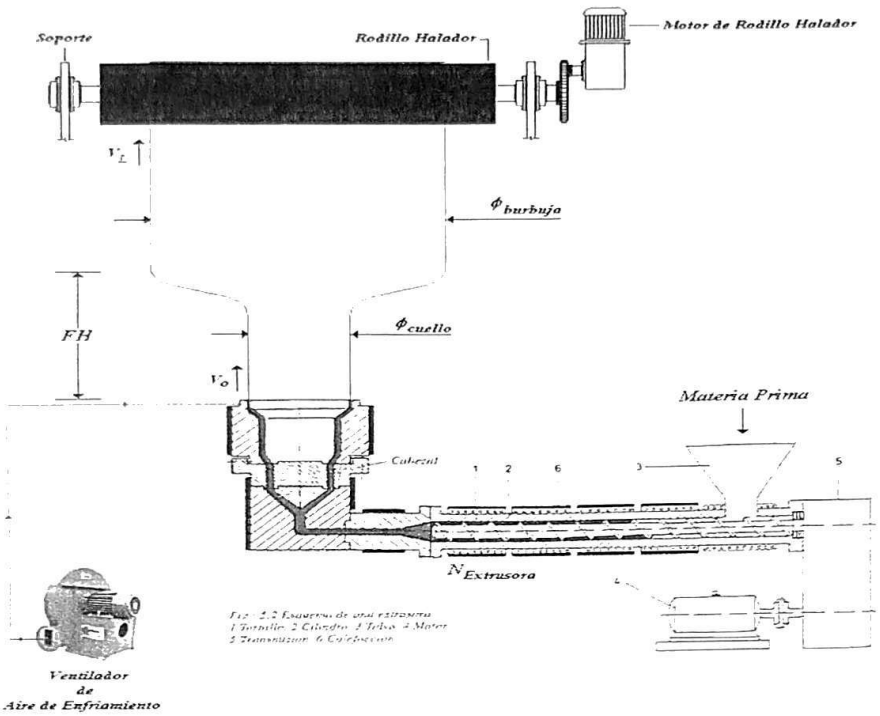
Westlake makes no representation or warranty of any kind, express or implied, with respect to this product, whether as to merchantability, fitness for particular purpose or otherwise.

WESTLAKE CHEMICAL CORPORATION
2801 Post Oak Blvd Suite 600 Houston Texas
Customer Service 1 800 [illegible]
Visit www.westlakepolymers.com

WESTLAKE POLYMERS LP
[illegible] Service Hwy Sulphur Louisiana 70663
Technical Service 337 583 6897
Date 08/15/04

APÉNDICE I

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: ρ_1



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \dot{\forall} = 0{,}938\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14{,}6)^2\right)\right]1{,}99 = 17{,}4\,\frac{g}{s}$$

$$V_o = 1{,}99\,\frac{cm}{s}$$

$$V_L = 13{,}5\,\frac{cm}{s}$$

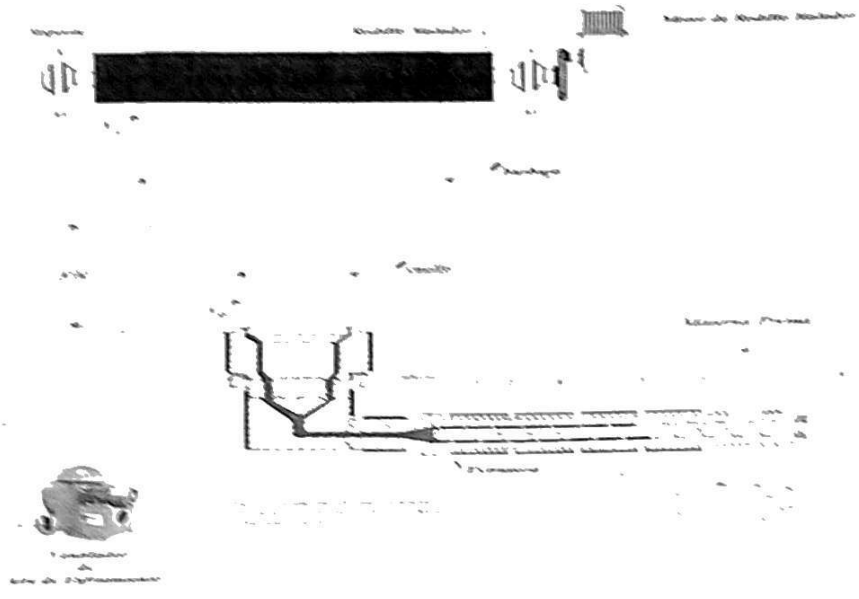
$$\phi_{burbuja} = 57\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_O)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)
0,142	0,938	2	17,40	70	6,78	3,80

APÉNDICE J

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: ρ_2, MI_1



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \forall = 0.94\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14.6)^2\right)\right] 1.99 = 17.4\ \frac{g}{s}$$

$$V_o = 1.99\ \frac{cm}{s}$$

$$V_L = 13.5\ \frac{cm}{s}$$

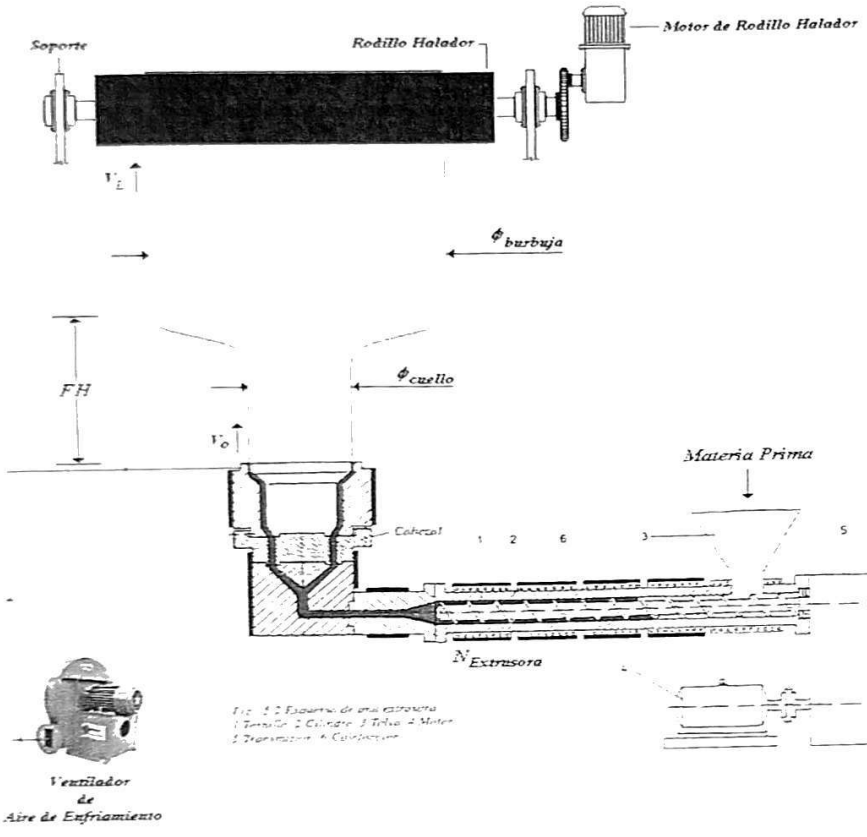
$$\phi_{burbuja} = 5^{\circ}\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g 10 min, 2.16 kg)	(g/cm³)	(mm)	(g/s)	(cm)		

APÉNDICE K

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: MI_2



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \forall = 0,94\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14,6)^2\right)\right]1,99 = 17,4\,\frac{g}{s}$$

$$V_o = 1,99\,\frac{cm}{s}$$

$$V_L = 13,5\,\frac{cm}{s}$$

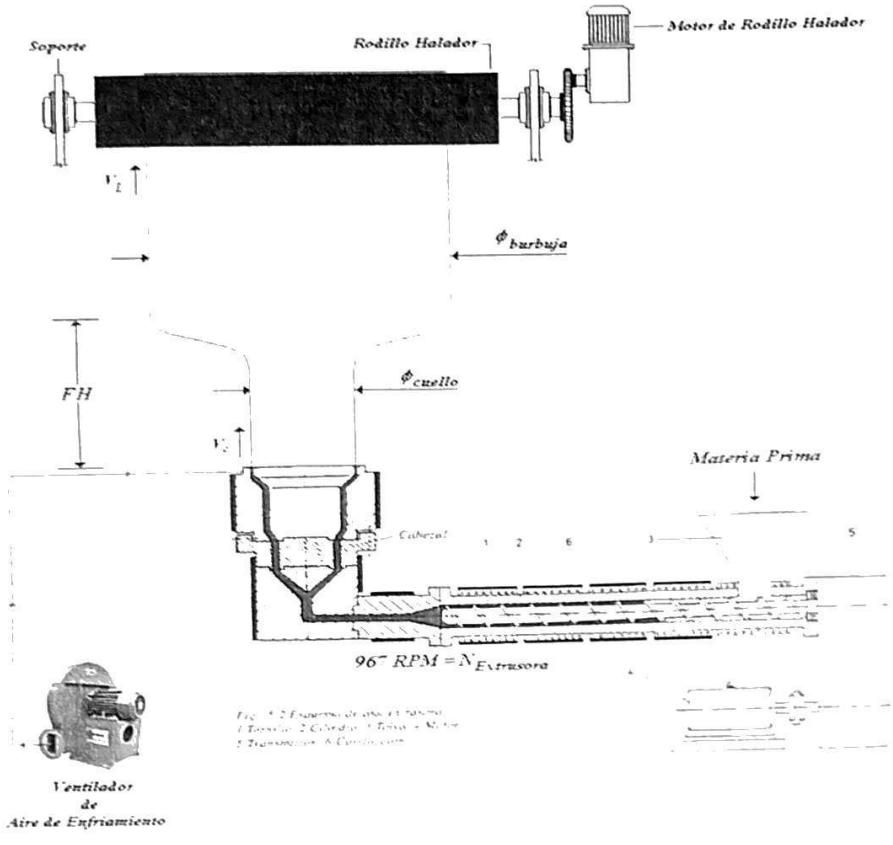
$$\phi_{burbuja} = 57\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g/10 min, 2.16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_O)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)
0,232	0,940	2	17,40	70	6,78	3,80

APÉNDICE L

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: FH_1



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \dot{\forall} = 0{,}943\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14{,}8)^2\right)\right]7{,}41 = 32{,}71\,\frac{g}{s}$$

$$V_o = 7{,}41\,\frac{cm}{s}$$

$$V_L = 38{,}89\,\frac{cm}{s}$$

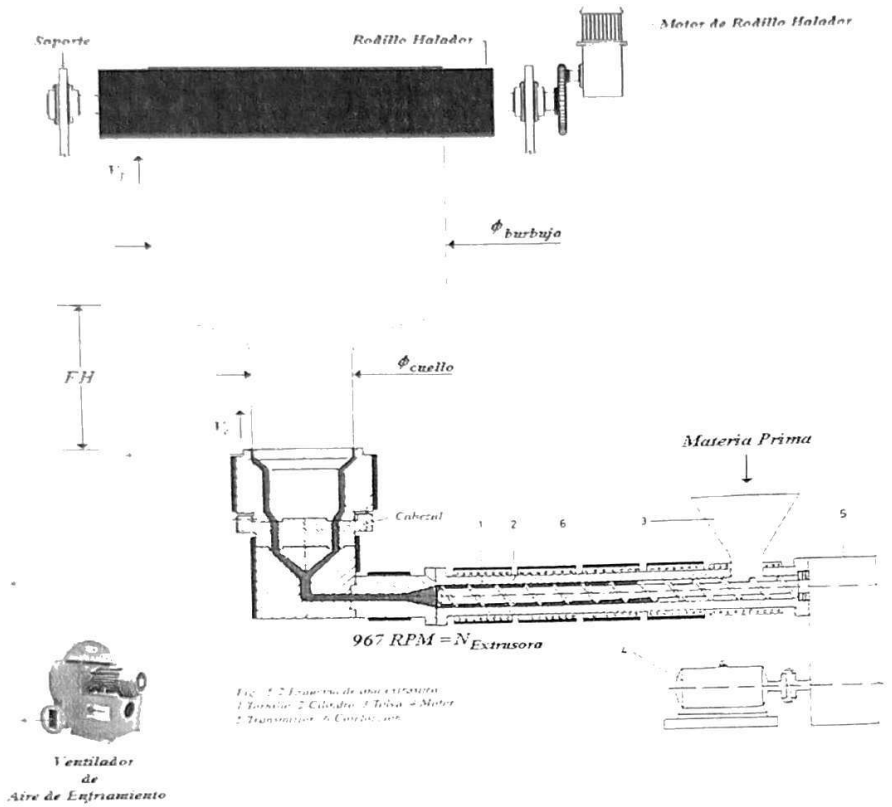
$$\phi_{burbuja} = 58\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_o)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)
0,110	0,943	1	32,71	80	5,25	3,87

APÉNDICE M

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: FH_2, $FLUJO_1$, DDR_1



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \forall = 0{,}943\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14{,}8)^2\right)\right]7{,}41 = 32{,}71\,\frac{g}{s}$$

$$V_o = 7{,}41\,\frac{cm}{s}$$

$$V_L = 38{,}89\,\frac{cm}{s}$$

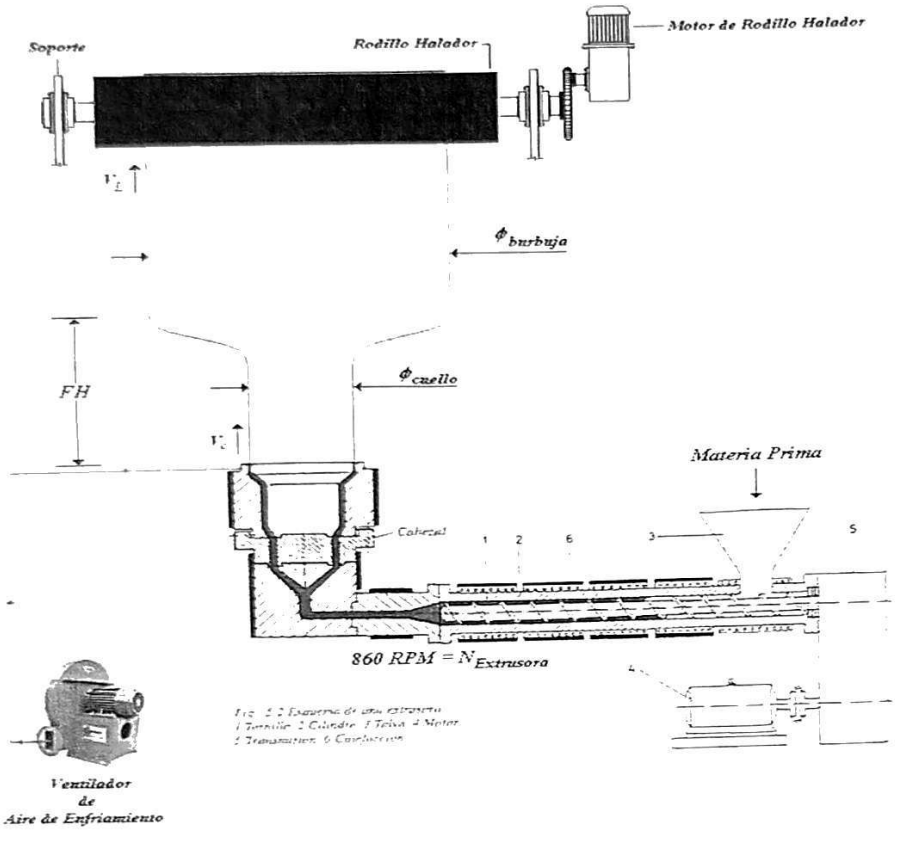
$$\phi_{burbuja} = 63\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm³)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_o)	($\phi_{burbuja}$/ϕ_{cuello})
0,119	0,943	1	32,71	45	5,25	4,20

APÉNDICE N

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: FLUJO$_2$



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \forall = 0{,}943\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14{,}8)^2\right)\right]6{,}87 = 30{,}32\,\frac{g}{s}$$

$$V_o = 6{,}87\,\frac{cm}{s}$$

$$V_L = 38{,}89\,\frac{cm}{s}$$

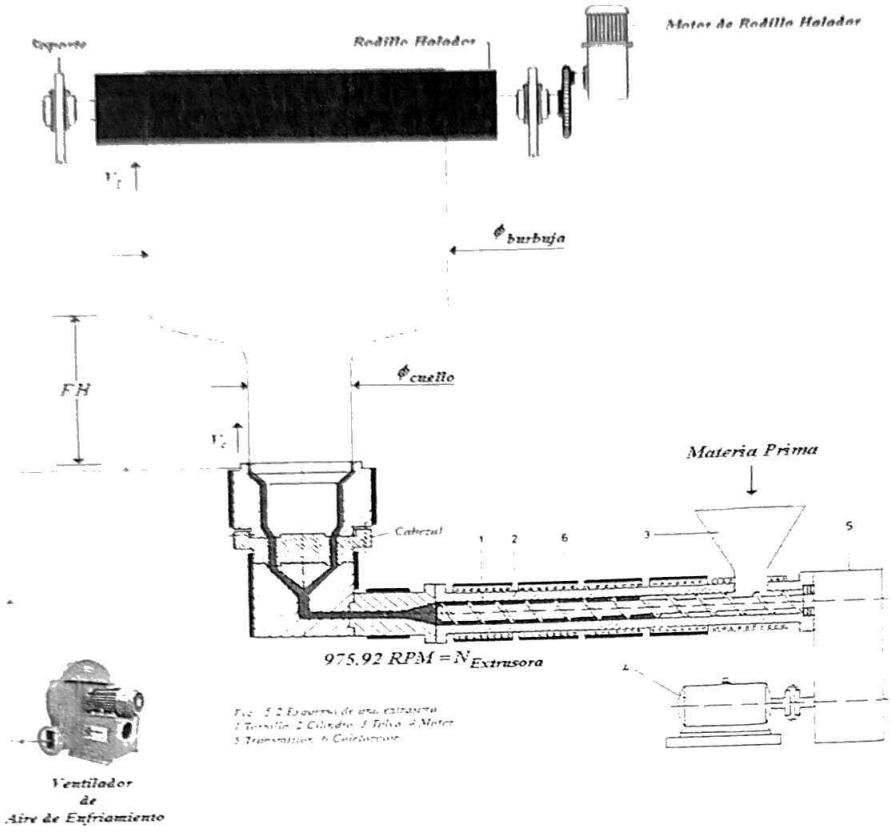
$$\phi_{burbuja} = 60\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L / V_o)	($\phi_{burbuja}$ / ϕ_{cuello})
0,110	0,943	1	30,32	74	5,66	4,00

APÉNDICE O

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: DDR_2



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \dot{\forall} = 0{,}943\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14{,}8)^2\right)\right]7{,}48 = 33{,}02\,\frac{g}{s}$$

$$V_o = 7{,}48\,\frac{cm}{s}$$

$$V_L = 79{,}38\,\frac{cm}{s}$$

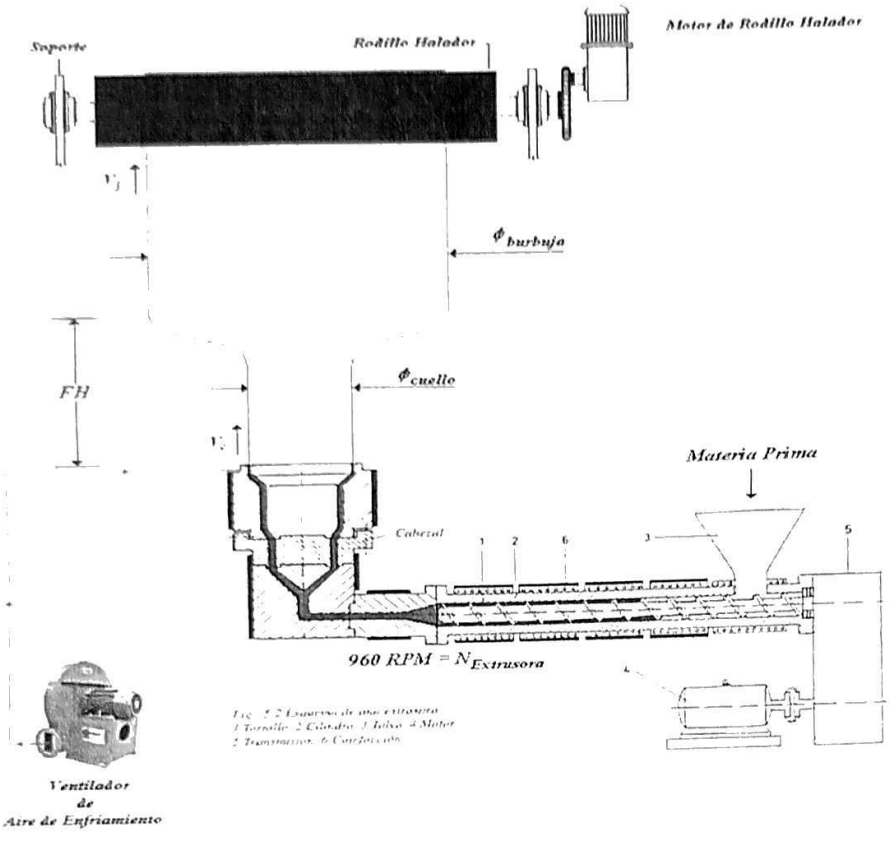
$$\phi_{burbuja} = 66\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g/10 min. 2,16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_o)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)
0,110	0,943	1	33,02	100	10,61	4,40

APÉNDICE P

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: BUR_1



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \dot{\forall} = 0{,}943\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14{,}8)^2\right)\right]10 = 44{,}14\,\frac{g}{s}$$

$$V_o = 10\,\frac{cm}{s}$$

$$V_L = 18{,}28\,\frac{cm}{s}$$

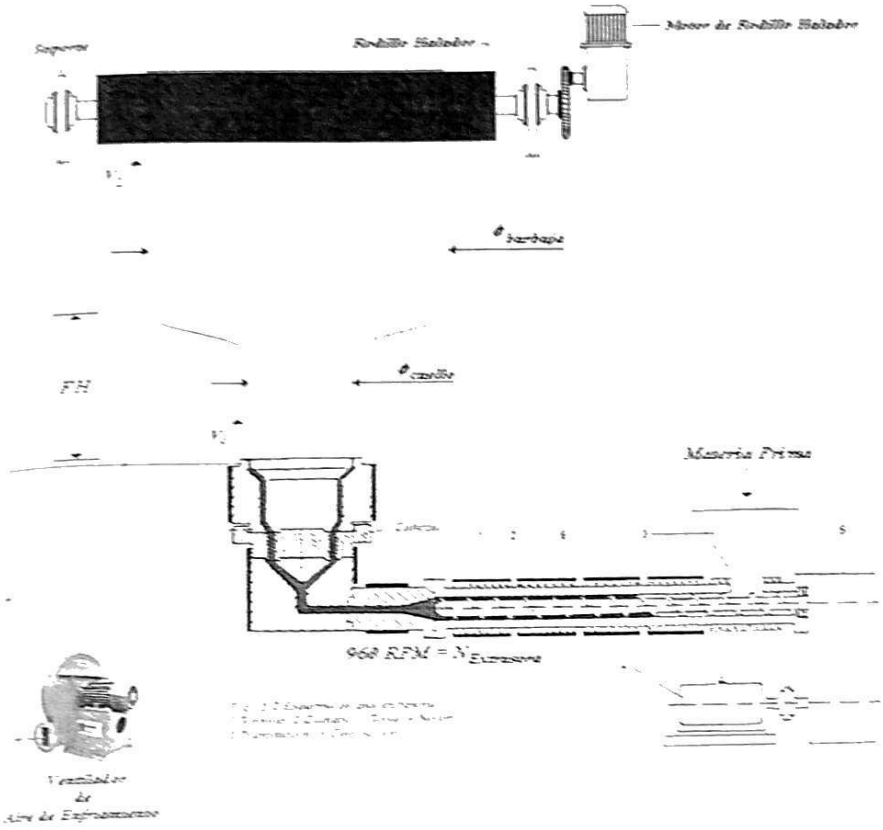
$$\phi_{burbuja} = 22\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g/10 min, 2,16 Kg)	(g/cm^3)	(mm)	(g/s)	(cm)	(V_L/V_o)	($\phi_{burbuja}/\phi_{cuello}$)
0,110	0,943	1	44,14	47	1,83	1,47

APÉNDICE Q

PROCESO DE EXTRUSIÓN DE: BUR_2



$$FLUJO = \frac{m}{t} = \rho \dot{\forall} = 0.943\left[\frac{\pi}{4}\left((15)^2 - (14.8)^2\right)\right]10 = 44.14\ \frac{g}{s}$$

$$V_o = 10\ \frac{cm}{s}$$

$$V_L = 18.28\ \frac{cm}{s}$$

$$\phi_{burbuja} = 26\ cm$$

$$\phi_{cuello} = 15\ cm$$

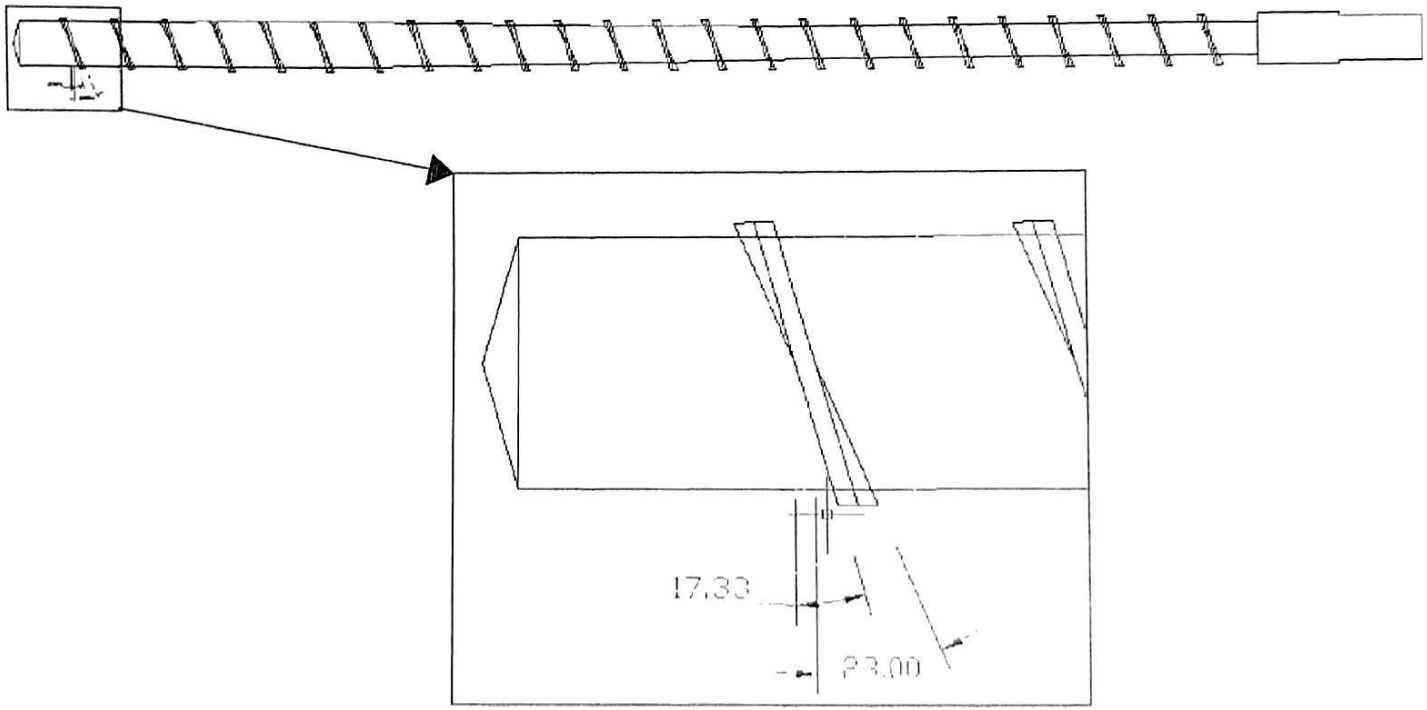
MATERIA PRIMA		CONDICIONES DE PROCESAMIENTO				
MI	ρ	Die Gap	FLUJO	FH	DDR	BUR
(g 10 min, 2.16 Kg)	(g cm⁻³)	(mm)	(g s)	(cm)	(V_L V_o)	($\phi_{burbuja}$ ϕ_{cuello})
[illegible]	0.943	[illegible]	44.14	65	1.83	1.73

APÉNDICE R

CONDICIONES DE PROCESAMIENTO DE MUESTRAS QUE NO ENTRARON AL ANÁLISIS

	FLUJO (g/s)	Die Gap (mm)	FH (cm)	ϕ_{cuello} (cm)	$\phi_{burbuja}$ (cm)	BUR	V_0 (cm/s)	V_L (cm/s)	DDR
A	3,53	0,75	40,64	10,00	14,61	1,46	2,97	159,70	53,73
B	4,08	0,75	81,28	10,00	34,29	3,43	3,67	72,58	19,80
C	11,31	1,25	80,00	10,16	71,12	7,00	8,09	21,50	3,53
D	11,25	1,00	110,00	10,16	81,28	8,00	7,58	162,17	21,40

PLANO



PLANO No.	FIMCP - ESPOL
1	TORNILLO DE EXTRUSORA (PE)
	SIZE / FSCM NO. / DIBUJADO POR: ING. JOE VANOVER / REV
	ESCALA 1:5 / MATERIAL: ACERO / FECHA: 28 DE AGOSTO DE 2004

BIBLIOGRAFÍA

1. S. SELKE, J. CUTER AND R. HERNÁNDEZ; "Plastics Packaging", 2nd Edition, Carl Hanser Verlag, Munich, 2004.

2. T. KANAI AND G.A. CAMPBELL; "Film Processing", 1st Edition, Carl Hanser Verlag, Munich, 1999.

3. O. SCHWARZ; "Ciencia de los Plásticos", 1ra Edición, Editorial Costa Nogal, Montevideo – Uruguay, 2002.

4. O. SCHWARZ, F-W. EBELING Y B. FURTH; "Procesamiento de los Plásticos", 1ra Edición, Editorial Costa Nogal, Montevideo – Uruguay, 2003.

5. W.G. TODD; "Variables that Affect/Control High-density Polyethylene Film Oxygen-Moisture Barrier", Journal of Plastic Film and Sheeting, Vol. 19-July 2003.

6. U.S.I. CHEMICALS; "Petrothene Polyolefins – Processing Guide", 4th Edition.