

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

**“Evaluación De Polietilenos De Alta Densidad Reciclados Para
Aplicaciones En Mobiliario Urbano”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Andrés Roberto Bravo Quezada

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2007

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Andrés Rigail por el tiempo prestado en la elaboración del trabajo de tesis. A ASEPLAS y a la Ing. Jenny Venegas, por la paciencia prestada en la elaboración de los ensayos. A Polimallas, por el préstamo del Tensómetro para las pruebas realizadas. A Plásticos Ecuatorianos por la donación de material. Al Señor Carlos Correa A., por la ayuda valiosa y continua en el desarrollo y finalización del trabajo.

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres y hermanos por ser la fuente de mi inspiración y ejemplo de superación

A mi abuelita Graciela y familia por apoyarme todos estos años de estudios

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Omar Serrano V.
DELEGADO DECANO FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Andrés Rigail C.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Bolívar Albán C.
VOCAL

Ing. Ernesto Martínez L.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Andrés Roberto Bravo Quezada

RESUMEN

En la actualidad, se considera al plástico como un material novedoso debido a la amplia gama de utilización y aplicaciones en diversas áreas. La reciclabilidad de productos plásticos es importante para la disminución de desperdicios; su procesamiento y evaluación de propiedades determinarán las potenciales aplicaciones.

El producto debe de ser capaz de cumplir con las características de desempeño requeridas para su aplicación final. Conociendo sus propiedades inherentes y su virtual desempeño aplicando herramientas como la Ingeniería asistida por computadora (CAE), se pueden mejorar los productos finales para determinadas aplicaciones de acuerdo a la demanda o necesidades del mercado.

A nivel mundial, diversas empresas han comenzado a desarrollar muchos productos elaborados de materiales reciclados, logrando nuevas alternativas utilizando materiales considerados como desechos. En Ecuador, los productos que se fabrican con este tipo de materiales son muy escasos, lo cual es perjudicial para la economía del país ya que Ecuador carece de

industria petroquímica, pero sobre todo, es dañino para el ecosistema debido a que, como es conocido, el plástico tarda mucho en descomponerse.

En esta tesis se compararán las propiedades mecánicas de un HDPE virgen con distintas mezclas desde un 60% a 90% de HDPE reciclados. Se determinarán las aplicaciones del compuesto que mejor se desempeñe en el aspecto mecánico y, adicionalmente se desarrollará el diseño de una aplicación para la industria mobiliaria urbana utilizando herramientas CAD y CAE para simular el desempeño del producto con las propiedades mecánicas encontradas en el compuesto de reciclados desarrollado.

La presente tesis está dividida en 6 capítulos. En el primer capítulo se plantean los objetivos que se obtendrán al finalizar la tesis. En el segundo capítulo se trata todo lo relacionado con los materiales termoplásticos con énfasis en HDPE, proceso de extrusión, tipos de reciclajes, degradación de plásticos y aditivos necesarios. En el capítulo 3, se describe los materiales utilizados, equipos, condiciones de procesamiento y ensayos a realizarse. En el capítulo 4 se discutirá y comparará los resultados obtenidos de las diferentes mezclas obtenidas y se escogerá la mezcla que muestre las mejores propiedades mecánicas para posteriormente, en el capítulo 5, desarrollar el diseño de una aplicación para mobiliario urbano.

Mediante esta investigación se determinará las propiedades mecánicas y reológicas de polietilenos de alta densidad reciclados, sin considerar la estabilización de estos reciclados. Esta investigación también pretende conocer la eficiencia de mezclado utilizando HDPE reciclados en una extrusora con un tornillo con un diseño especial de zonas de distribución y dispersión. Esta innovación tecnológica permitirá demostrar como un tornillo puede mejorar la capacidad de mezcla de plásticos reciclados de una extrusora de menor tecnología. Al final se desarrollarán las posibles aplicaciones comerciales de estos HDPE reciclados y se dará una metodología de desarrollo de producto mediante herramientas computacionales. Esto incentivará a los manufactureros locales a desarrollar nuevos productos con plásticos reciclados logrando un ahorro en materia prima y conciencia ambiental.

2.1.1.4 Usos y aplicaciones.....	35
2.1.2 Otros plásticos de importancia en el ecuador	38
2.2 Proceso de extrusión.....	39
2.3 Mezclado en extrusión.....	47
2.3.1. Mezclado distributivo	47
2.3.2. Mezclado dispersivo	47
2.4. Reciclaje de termoplásticos.....	49
2.4.1. Reciclaje químico	50
2.4.2. Reciclaje mecánico.....	52
2.4.2.1. Separación	52
2.4.2.2. Lavado y secado	53
2.4.2.3. Peletizado.....	54
2.4.3. El problema inherente en el reciclaje de termoplásticos.....	54
2.4.3.1. Degradación térmica	55
2.4.3.2. Degradación mecánica.....	56
2.4.3.3. Degradación por radiaciones uv	57
CAPÍTULO 3	
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	59
3.1 Descripción de mezclas.....	59
3.2 Equipos y accesorios necesarios	61
3.3 Preparación de probetas	63
3.4 Ensayos y pruebas a realizarse	68
3.4.1 Resistencia y módulo a la tracción ASTM D638	68
3.4.2 Resistencia al impacto ASTM D256.....	76
3.4.3 Índice de fluidez (Melt Flow Index) ASTM D1238.....	86
3.4.4 Temperatura de ablandamiento (VICAT) ASTM D1525	94
CAPÍTULO 4	
4. DISCUSION Y RESULTADOS	102

4.1 Resistencia y módulo a la tracción ASTM D638	102
4.2 Resistencia al impacto ASTM D256	111
4.3 Índice de Fluidez (Melt Flow Index) ASTM D1238	115
4.4 Temperatura de Ablandamiento (VICAT) ASTM D1525	132

CAPITULO 5

5. DISEÑO DEL PRODUCTO	134
5.1. Metodología de Diseño	135
5.2. Diseño mecánico y optimización de masa	137
5.3. Análisis básico de Inyección	160

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	170
6.1 Conclusiones	170
6.2 Recomendaciones	172

APENDICE

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

HDPE	High density Polyethylene
ASTM	American Society for Testing materials
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PELBD	Polietileno Lineal de Baja Densidad
PMMA	Polimetilmetacrilato
PS	Poliestireno
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PVC	Polivinil cloruro
PP	Polipropileno
PBT	Polibutadieno estireno
PET	Polietileno tereftalato
FRR	Flow Rate Ratio
MFI	Melt Flow Index
MI	Melt Index

SIMBOLOGÍA

atm	Unidades de compresibilidad
g/10 min	Unidades de Índice de Fluidez
g/cm ³	Unidades de Densidad
rpm	Unidades de Velocidad Angular

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Estructura de molécula eteno	13
Figura 2.2	Secciones en un tornillo extrusor simple	40
Figura 2.3	Geometría preferida para una abertura de alimentación en la garganta del alimentador	41
Figura 2.4	Buen diseño del depósito (izquierda) y diseño del depósito no óptimo (derecha)	42
Figura 2.5	Ejemplo de alimentador compactador	43
Figura 2.6	Extrusora con calentadores de barril y ventiladores para enfriamiento.....	44
Figura 2.7	Ejemplo de un plato divisor de mezclado	46
Figura 3.1	Extrusora de tornillo simple.....	62
Figura 3.2	Control de temperatura de 3 secciones del barril de extrusora.....	63
Figura 3.3	Aplicación del mezclado en el alimentador de la extrusora.....	64
Figura 3.4	Salida del material extruido.....	65
Figura 3.5	Inserción del material extruido en la prensa	66
Figura 3.6	Cierre de la prensa hidráulica	66
Figura 3.7	Desconexión de terminales del enchufe	67
Figura 3.8	Placa resultante.....	68
Figura 3.9	Tensómetro Qtest I.....	71
Figura 3.10	Espécimen de prueba y medidas.....	72
Figura 3.11	Designación de velocidad de prueba.....	73
Figura 3.12	Relación del tornillo de sujeción, espécimen, y borde de impacto entre sí para métodos de pruebas IZOD A y C	77
Figura 3.13	Péndulo de Impacto Tinius Olsen	80
Figura 3.14	Posicionamiento de un espécimen en el banco de sujeción ...	81
Figura 3.15	Dimensiones de un espécimen de prueba tipo IZOD	82
Figura 3.16	Arreglo general del Plastómetro de extrusión.....	89
Figura 3.17	Tabla de condiciones, temperatura y carga estándar para la prueba ASTM D1238.....	91
Figura 3.18	Aparato para la determinación de la temperatura de ablandamiento	97
Figura 4.1	Troqueladora manual	103
Figura 4.2	Probeta troquelada de acuerdo a la norma ASTM D638.....	103

Figura 4.3	Una probeta ensayada en el tensómetro Qtest I	104
Figura 4.4	Probeta ensayada con plástico desconocido en su interior...	108
Figura 4.5	Probetas dimensionadas según la norma ASTM D256	112
Figura 4.6	Comparación entre valores de pruebas IZOD en mezclas de reciclado post-consumo	113
Figura 4.7	Comparación entre valores de pruebas IZOD en mezclas de reciclado post-industrial.....	114
Figura 4.8	Muestras de 0.35 g resultantes de la operación en el plastómetro de extrusión	115
Figura 4.9	Constantes físicas del plastómetro de extrusión	119
Figura 4.10	Comparación de valores teóricos y experimentales de MFI..	121
Figura 4.11	Curva unificada de los polietilenos con la mezcla de HDPE reciclado de post-consumo y HDPE virgen	125
Figura 4.12	Curva unificada de los polietilenos de mezclas de HDPE reciclados post-industriales y HDPE virgen.	130
Figura 4.13	Probetas para ensayo VICAT	131
Figura 5.1	Algoritmo para el desarrollo de un producto	135
Figura 5.2	Medidas del perfil de la silla	137
Figura 5.3	Vista lateral del perfil extruido	137
Figura 5.4	Extrusión del perfil de la silla.....	138
Figura 5.5	Vista frontal del apoyo de la silla con sus respectivas cotas.	139
Figura 5.6	Vista lateral del apoyo acotado	140
Figura 5.7	Apoyo terminado	141
Figura 5.8	Silla armada	142
Figura 5.9	Colocación de pernos en los puntos de sujeción con los apoyos	143
Figura 5.10	Perfil rectangular acotado. Vista frontal	144
Figura 5.11	Vista lateral de perfil rectangular extruido y acotado	144
Figura 5.12	Vista frontal del apoyo de la mesa acotado	145
Figura 5.13	Apoyo extruido	146
Figura 5.14	Vista frontal y lateral del soporte.....	147
Figura 5.15	Vista frontal de la placa	147
Figura 5.16	Mesa finalizada con soporte y placas colocadas y empernadas.....	148
Figura 5.17	Propiedades físicas de la silla a ensayar	149
Figura 5.18	Mallado de la silla	150
Figura 5.19	Análisis de deformación de la silla	151
Figura 5.20	Análisis de tensiones de la silla	151
Figura 5.21	Cotas de perfil reducido de espesor	152
Figura 5.22	Propiedades físicas de silla optimizada	153
Figura 5.23	Análisis de deformación de silla optimizada	154
Figura 5.24	Análisis de tensión de silla optimizada	154
Figura 5.25	Análisis de deformación en la mesa	155
Figura 5.26	Análisis de tensión en mesa	156

Figura 5.27	Cambio de ancho en perfil de la mesa	156
Figura 5.28	Análisis de deformación de la mesa optimizada.....	157
Figura 5.29	Análisis de tensión de la mesa optimizada	158
Figura 5.30	Cuadro de diálogo de Mold Xpress.....	162
Figura 5.31	Selección de punto de inyección.....	162
Figura 5.32	Selección de material a inyectar	163
Figura 5.33	Selección de temperaturas y tiempo de inyección	164
Figura 5.34a	Proceso de llenado.....	165
Figura 5.34b	Indicación del tiempo de llenado del molde	165
Figura 5.35a	Selección del punto de inyección en el molde	166
Figura 5.35b	Inicio de operación de moldeo	167
Figura 5.35c	Tiempo de llenado del molde con material fundido y sugerencia del programa.....	167
Figura 5.36	Modelo renderizado en ambiente exterior	168

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Ramificación de la cadena y cristalinidad	16
Tabla 2	Propiedades de polietileno líquido	18
Tabla 3	Propiedades físicas y mecánicas	19
Tabla 4	Relación entre las propiedades que están o no en función del peso molecular	21
Tabla 5	Propiedades de polietilenos	23
Tabla 6	Variedad de densidades de polietileno	28
Tabla 7	Propiedades de polietileno en función de la densidad.....	29
Tabla 8	Propiedades moleculares básicas del HDPE.....	32
Tabla 9	Propiedades de HDPE Lutene-h FE0070 sin procesar	60
Tabla 10	Mezcla de 10% virgen y 90% reciclado de polietileno de alta densidad A.....	105
Tabla 11	Mezcla de 20% virgen y 80% reciclado de polietileno de alta densidad A.....	106
Tabla 12	Mezcla de 30% virgen y 70% reciclado de polietileno de alta densidad A.....	106
Tabla 13	Mezcla de 40% virgen y 60% reciclado de polietileno de alta densidad A.....	107
Tabla 14	Valores promedios de ensayo de tensión	108
Tabla 15	Mezcla de 10% virgen y 90% reciclado de polietileno de alta densidad B.....	109
Tabla 16	Mezcla de 20% virgen y 80% reciclado de polietileno de alta densidad B.....	109
Tabla 17	Mezcla de 30% virgen y 70% reciclado de polietileno de alta densidad B.....	110
Tabla 18	Mezcla de 40% virgen y 60% reciclado de polietileno de alta densidad B.....	110
Tabla 19	Valores promedios de las pruebas con el reciclado Petrothene.	111
Tabla 20	Resultados promedios de pruebas IZOD realizadas	112
Tabla 21	Resultados promedios de pruebas IZOD realizadas	114
Tabla 22	Resultados de la prueba ASTM 1238 con 2.16 kg.....	116

Tabla 23	Resultados de la prueba ASTM 1238 con 10 kg.....	116
Tabla 24	Resultados de valores n y el índice de consistencia k.....	118
Tabla 25	Valores de caudal calculado	120
Tabla 26	Valor de MI teórico	120
Tabla 27	Cálculos obtenidos con mezcla de 10%-90%	122
Tabla 28	Cálculos obtenidos con mezcla de 20%-80%	123
Tabla 29	Cálculos obtenidos con mezcla de 30%-70%	123
Tabla 30	Cálculos obtenidos con mezcla de 40%-60%	124
Tabla 31	Resultados de la prueba ASTM 1238 con 2.16 kg.....	126
Tabla 33	Resultados de valores n y el índice de consistencia k.....	127
Tabla 34	Valores de caudal calculado	127
Tabla 35	Valor del MI teórico.....	127
Tabla 36	Cálculos obtenidos con mezcla de 10%-90%	128
Tabla 37	Cálculos obtenidos con mezcla de 20%-80%	128
Tabla 38	Cálculos obtenidos con mezcla de 30%-70%	129
Tabla 39	Cálculos obtenidos con mezcla de 40%-60%	129
Tabla 40	Resultados de las pruebas realizadas	132
Tabla 41	Determinación de factor de diseño.....	159
Tabla 42	Selección de inyectora a utilizar y tiempo de inyección resultante	160

INTRODUCCIÓN

El presente estudio permite el análisis de mezclas de plásticos reciclados, específicamente polietileno de alta densidad, en dos tipos característicos de materiales reciclados: materiales de post-consumo y materiales post-industriales. Este análisis permitirá determinar un procedimiento crítico si es que se desea trabajar con dichos materiales reciclados que es la separación, ya sea física o química, de los diversos componentes que se encuentran infiltrados en un material reciclado, lo que influenciará en proporciones considerables en las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla de plástico. Dentro de los ensayos se aplicarán:

- Ensayo de Tracción ASTM D638
- Ensayo de Impacto ASTM D-256
- Ensayo de Determinación de la Temperatura de Ablandamiento (VICAT) ASTM D1525
- Ensayo de Determinación del Índice de Fluidez, MFI, ASTM D1238

Gracias a los diversos ensayos de laboratorio que fueron realizados, todos de acuerdo a las normas establecidas por organizaciones como la ASTM, que tiene vigente procedimientos de calidad de materiales a condiciones

varias de trabajo, permitirán establecer cuales de las mezclas presentan propiedades eficientes, considerando que un producto reciclado tiende a disminuir las propiedades mecánicas.

Con la selección correcta establecida se procederá a realizar el diseño de un mobiliario urbano, mediante herramientas CAD y CAE y argumentos de elaboración de un diseño ingenieril. Se tomará en cuenta, fundamentalmente, el concepto de requerimiento funcional como un limitador y punto optimizador de material a utilizar en el mencionado diseño.

Es así, que con los datos obtenidos y posterior diseño, se plantea una solución ecológicamente funcional para las empresas plásticas en el Ecuador, invitándolas a participar de procesos más amigables con el medio ambiente mediante la re-utilización de dichos productos.

CAPÍTULO 1

1 INFORMACIÓN GENERAL

Dentro de la historia del desarrollo industrial mundial, los plásticos fueron vistos como un material que aunque originalmente fue creado para desempeñar funciones dieléctricas a medida que ha transcurrido el tiempo y con el desarrollo de variadas técnicas, han permitido expandirse como producto de novedad trascendental en dicho sector, ya que puede reemplazar con facilidad a materiales como por ejemplo la madera y puede desempeñar infinidad de usos.

Pero en la actualidad lo que se busca es, aparte del ahorro económico, encontrar una alternativa rentablemente ecológica. Es así que en esta tesis se presenta como posibilidad el trabajo con plásticos reciclados mediante la evaluación de mezclas de polietileno de alta densidad virgen con polietilenos de alta densidad reciclados de varios productos como

envases, galones de agua, jabas, maceteros y otra mezcla de polietilenos de alta densidad virgen con polietilenos de alta densidad reciclados solo de envases de cierto producto.

Es muy conocido que los productos reciclados pierden ciertas propiedades mecánicas y reológicas, dependiendo del tipo de reciclado y del proceso por el cual hayan pasado. Por esta razón se busca realizar la mezcla con el material virgen para ayudar a incrementar de cierta forma dichas propiedades. Se conoce como material virgen a aquel material el cual no ha sido procesado o utilizado en algún proceso industrial.

Es así que es fundamental encontrar aquella dosis que sea satisfactoria y que se encuentre dentro de los parámetros establecidos por las Normas ASTM que serán aplicadas para su evaluación.

En esta tesis se compararan material reciclado post-industrial y material reciclado post-consumidor normalmente utilizado por transformadores de plásticos para establecer datos propiedades mecánicas y grado de confiabilidad de concentración de reciclados.

El desarrollo en el aspecto ingenieril de este tipo de materiales reciclados y reprocesados como un producto final elaborado es un problema subsecuente del proceso de evaluación de la mezcla trabajada en el laboratorio. Los programas de diseño a utilizar serán herramientas fundamentales para la elaboración de un sinnúmero de formas. Para nuestro caso utilizaremos nuestros datos en el diseño de mobiliario urbano para su utilización en parques.

1.1 Objetivos de la tesis

En la actualidad se habla mucho de los problemas ambientales por las cuales atraviesa el planeta, debido a las malas técnicas de trabajo de las industrias. Ya se está dando una falta de materia prima generada por el consumo global del plástico. Por estos motivos, es imprescindible la reutilización del plástico para contrarrestar la escasez de materia prima y el impacto ambiental de los desechos plásticos.

Es así, que en los países industrializados del primer mundo han canalizado sus esfuerzos a la investigación para desarrollar nuevas técnicas de procesamiento y reciclado que busquen garantizar un proceso más ecológico y rentable para obtener productos que a la final sean reutilizables o reciclables.

El problema de la investigación de los plásticos en el Ecuador ha quedado solo restringido a la industria y no a medios investigativos académicos como lo son las universidades. Por lo tanto, esta tesis presenta la investigación y evaluación de mezclas de plásticos reciclados de productos ecuatorianos como solución tecnológica, económica y medio ambiental.

1.1.1 Objetivo general de la tesis

Desarrollar un enfoque ecológicamente sustentable de la elaboración de nuevos materiales mediante la combinación de polietilenos de alta densidad (HDPE) vírgenes y reprocesados de polietilenos de alta densidad utilizados en envases de bebidas y por otro lado HDPE vírgenes con materiales molidos o reciclado de envases post-consumidor de HDPE utilizados como los utilizaría un procesador en la industria. La finalidad es obtener las propiedades reológicas útiles para el procesamiento y las propiedades mecánicas útiles para el diseño.

Además se busca obtener un producto del cual se puedan determinar varias aplicaciones posteriores que, una vez evaluadas y aprobadas sus propiedades, se garantice un producto de calidad comprobada especificando así también sus condiciones de uso.

1.1.2 Objetivos específicos de la tesis

Evaluar físicamente las mezclas de polietilenos de alta densidad vírgenes con polietilenos de alta densidad reciclados/reprocesados, mediante ensayos ASTM para determinar Tracción ASTM D 638, Resistencia al Impacto ASTM D 256, Temperatura de Ablandamiento ASTM D 1525 e Índice de Fluidez ASTM D 1238. Estas pruebas, que son especificadas a lo largo de la presentación de la tesis, partirán de probetas resultantes del mezclado en una extrusora con un tornillo de diseño especial de zonas de distribución y dispersión. Este diseño facilita la dispersión de mezclas de polietilenos y permite la mezcla de elevadas cantidad de reciclado o reprocesados pigmentados o con cargas inorgánicas.

Posteriormente, se trabajará en el diseño estructural de un mobiliario urbano, en este caso una silla para parque, el cual se lo realizará en una herramienta computacional CAD y la posterior evaluación del diseño previo se lo realizará en una herramienta computacional CAE, para así poder encontrar y obtener el diseño que será el indicado en el punto de vista mecánico y monetario.

1.2 Antecedentes

En la industria de Plásticos se ha presenciado un desarrollo acelerado en cuanto a tecnología de materiales, procesamiento y nuevas aplicaciones. A inicios del siglo XX se desarrolló el primer plástico sintético, lo que hoy conocemos como baquelita, en un ensayo de laboratorio en el cual, se usaba como materia base al petróleo, este nuevo material sintético se encontraba compuesto de macromoléculas llamadas actualmente polímeros. Así se puede observar que los plásticos son la 3era aplicación más extendida del petróleo, después de la energía y el transporte, y constituye casi todo lo que consumimos, aproximadamente unas 200 millones de toneladas al año en todo el planeta, desde coches y computadoras hasta envases y productos de higiene. El descubrimiento de este material marcó una revolución en la industria, fue el punto de partida para la creación de otros materiales muy conocidos como el Polietileno, el nylon, el PVC, etc.

Actualmente en la industria ecuatoriana de los polímeros, en el caso especial de los plásticos, han tenido un gran desarrollo en los últimos 10 años debido a la infinidad de aplicaciones en los diversos campos como por ejemplo, en la industria de la construcción para la creación de cañerías de PVC, espumas aislantes de poliestireno, etc., en la industria de consumo para la elaboración de vasos, tarrinas, botellas para

diferentes bebidas, platos, cucharas y demás cubiertos, también para elaboración de juguetes, portarretratos, baldes, maceteros, etc.

Por lo tanto, debido las múltiples aplicaciones que se le puede dar a los materiales plásticos se ha producido una contaminación acelerada en los últimos 50 años alrededor del mundo. A inicios del siglo XX los materiales que se usaban comúnmente eran productos biodegradables, es decir, que se degradaban de forma natural debido a su envejecimiento normal, pero, estos productos por ser derivados de petróleo, presenta una dificultad de grandes magnitudes cuando son considerados como desperdicios, llamándolos así productos no biodegradables. Estos tipos de materiales tardan aproximadamente 500 años en degradarse, así que se han considerado diversos métodos para la preservación del ecosistema, como lo es la recolección, limpieza, selección de materiales y la fundición de dichos materiales plásticos y pueden ser usados como materia prima adicional, alternativa o sustituta para el moldeado de otros productos.

1.3 Materiales y métodos

El desarrollo principal en la tesis se basa en el trabajo con polietilenos de alta densidad (HDPE) vírgenes, reprocesados y reciclados, que tienen muchas aplicaciones en diversos productos en el Ecuador.

El resto de procedimientos de elaboración de probetas y evaluación con las respectivas normas está descrito en el Capítulo 3 de este documento en donde se explica detalladamente los pasos a seguir.

Además, en el Capítulo 5 se explican las consideraciones y fundamentos mecánicos que se aplicarán para el desarrollo del producto y su optimización con las herramientas computacionales CAD y CAE.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTOS DE TERMOPLÁSTICOS Y SU RECICLAJE

2.1 Termoplásticos

Un termoplástico es un material polimérico deformable que puede adquirir cualquier forma determinada mediante la adición de calor. Muchos de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular cuyas cadenas se asocian a través de las débiles fuerzas de van der Waals (Polietileno); interacciones fuertes polo-polo y unión de hidrógeno (nylon); o incluso apilamiento de anillos aromáticos (poliestireno). Los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables (baquelita, caucho vulcanizado) en que los primeros pueden ser remezclados y remodelados, es decir, son reciclables, mientras que los segundos una vez que adquieren una forma determinada, no es posible reprocesarlos.

Los termoplásticos pueden pasar a través de numerosos ciclos de calentamiento/formado/enfriamiento; y el hecho de que puedan ser reformados en recalentamiento es lo que les da su nombre. Esta cualidad hace a los termoplásticos reciclables. El proceso requerido para el reciclamiento varía con el termoplástico. Los plásticos usados para botellas de bebidas carbonatadas, son un ejemplo común de termoplásticos que pueden ser y son ampliamente reciclados. Un cuerno de animal, hecho de la proteína alfa-queratina, se suaviza en calentamiento, es algo reformable, y puede ser considerada como un material natural cuasi-termoplástico.

Algunos termoplásticos normalmente no se cristalizan: ellos son denominados plásticos amorfos y son útiles a temperaturas por debajo de T_g . Son frecuentemente usados en aplicaciones donde la claridad es importante. Algunos ejemplos típicos de termoplásticos amorfos son PMMA (Polimetilmetacrilato), PS (Poliestireno) y PC (Policarbonato). Generalmente, los termoplásticos amorfos son menos resistentes químicamente y puede ser sujeto de agrietamiento por fatiga. Los termoplásticos que se cristalizan hasta cierto punto, son llamados "semicristalinos" por dicha razón. Los termoplásticos semicristalinos típicos son PE (Polietileno), PP (Polipropileno), PBT (Polibutadieno estireno) y PET (Polietileno Tereftalato) [1][2].

2.1.1 Descripción general de los Polietilenos

El Polietileno es un polímero conformado de largas cadenas del monómero etileno. El nombre científico recomendado “polieteno” es sistemáticamente derivado del nombre científico del monómero. En ciertas circunstancias es útil usar la nomenclatura de la estructura base. En otros casos IUPAC recomienda polimetileno. La diferencia es debido a la expansión de las cadenas dobles de monómeros en la polimerización.

La molécula eteno (conocida casi universalmente como etileno), C_2H_4 es $CH_2 = CH_2$. Dos grupos CH_2 conectados por cadenas dobles, como se muestra a continuación en la figura 2.1:

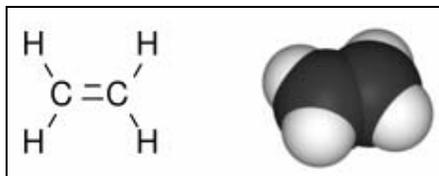


FIGURA 2.1. ESTRUCTURA DE MOLÉCULA ETENO

El polietileno es el plástico más ampliamente usado alrededor del mundo y, dentro de esta clase de materiales, el Polietileno de alta densidad (PEAD) es el más usado. Tiene una densidad de entre

0.935 o 0.955 g/cm³. Esto incluye homopolímeros etilenos y también copolímeros de etileno y alfa-olefinas tal como 1-buteno, 1-hexeno, 1-octano, o 4-metil-1-penteno [3].

El polietileno (PE) es un material termoplástico blanquecino, transparente o translúcido en el caso del de baja densidad y opaco con apariencia de cera en el caso de los polietilenos de alta densidad. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados.

Por la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado. Este tipo de polímero se creó para usarlo como aislamiento eléctrico, pero después ha encontrado muchas aplicaciones en otros campos, especialmente como película y para envases [4].

2.1.1.1 Estructura química y física de los Polietilenos

Estructura química

El polietileno es un material formado por cadenas ramificadas del monómero etileno (CH_2). Puede contener también otros grupos químicos derivados del catalizador usado en su fabricación o de impurezas en el etileno, pero éstas representan generalmente mucho menos de 0.1% en peso del polímero. La condición ramificada de la cadena del polímero influye profundamente en las propiedades físicas tanto del polietileno sólido como del polietileno fundido. En consecuencia, las propiedades físicas que se indican más adelante se refieren no sólo a un intervalo de pesos moleculares, sino también a cierto tipo de polímeros de cadena ramificada. Variando las condiciones en que se realiza la polimerización, es posible variar el grado de ramificación entre límites amplios y producir gran número de tipos de polímeros. Como en la mayoría de los polímeros, una muestra normal tiene una distribución amplia de pesos moleculares, y el fraccionamiento del polietileno indica que una muestra de un peso molecular medio numérico de 15000 contiene material de peso molecular inferior a 1000 y también superior a 80000. Es decir, el indicativo de peso molecular en las tablas de propiedades de los polietilenos se refiere a una distribución de pesos moleculares y no a uno solo fijo en particular.

Estructura física del sólido

El carácter más importante de la estructura física del polietileno es la cristalinidad parcial del sólido. Un polietileno tiene una estructura parcialmente cristalina, parcialmente amorfa, y muestra un cambio gradual, a medida que aumenta la temperatura, hasta el estado completamente amorfo fundido. El grado de cristalinidad depende del peso molecular, de la cantidad de comonomero presente y del tratamiento térmico aplicado. El intervalo de cristalinidad del PEAD normalmente abarca de un 50 a un 80%. El grado de cristalinidad dependerá ampliamente del grado de ramificación de las cadenas de un material.

TABLA 1.

RAMIFICACIÓN DE LA CADENA Y CRISTALINIDAD

Ramificación (CH3 por 100 CH2)	Densidad a 20 ° C [g/cm³]	Cristalinidad (%)
0 (polimetileno)	0.99	95
1	0.96	80
2	0.94	72
3	0.92	60
4	0.91	55

De la observación de la tabla 1 se deduce que al aumentar la ramificación de la cadena, disminuye la densidad del polietileno y su grado de cristalinidad. Varias propiedades son directamente afectadas por la cristalinidad y, en consecuencia por el grado de ramificación. Son ejemplo la dureza, el punto de reblandecimiento y el punto de cedencia por la tracción. Otras propiedades, como la resistencia a la tracción, la flexibilidad a temperaturas bajas y la resistencia al choque, son principalmente funciones del peso molecular medio. Debido a que el grado de cristalinidad del PEAD es variable, se lo puede considerar como un polímero amorfo con una cantidad variable de carga cristalina.

El gran número de tipos de polietileno es una consecuencia de la extensa variación en el peso molecular y en el grado de ramificación, y por consiguiente en la cristalinidad, propiedades que varían según las condiciones de polimerización [5].

2.1.1.2 Propiedades del Polietileno

Polietileno líquido

El movimiento del polietileno líquido es no newtoniano. La velocidad disminuye a medida que aumenta la presión y con ésta la velocidad de paso. Por la sensibilidad de la viscosidad de la masa fundida al peso molecular, y en virtud de que el polietileno se maneja

normalmente en estado fundido en operaciones de extrusión, moldeo o vaciado, los diferentes polímeros del comercio se caracterizan por la viscosidad del producto fundido. En el intervalo 20000-30000 del peso molecular, un aumento de 10% del peso molecular dobla aproximadamente la viscosidad del producto fundido. La viscosidad del polietileno fundido disminuye a medida que aumenta la temperatura; se reduce aproximadamente a la mitad por un aumento de 25 ° C, en la temperatura.

Otras propiedades del líquido se pueden observar en la tabla 2:

TABLA 2
PROPIEDADES DE POLIETILENO LÍQUIDO

Densidad a T=120 ° C	0,80 g/cm ³
Coefficiente de dilatación cúbica	0,0007 por ° C.
Calor Específico	2.3 kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹

Birrefringencia en corriente

Cuando fluye el polietileno líquido por un orificio, como por ejemplo durante la extrusión o el moldeo, existe una orientación apreciable de las moléculas, que pasan al estado no orientado si el material se mantiene en el estado líquido, pero permanecen orientadas en el sólido si, como es normal en la fabricación, el material fundido se enfría rápidamente. El grado de esta orientación es una función de

la longitud media de la cadena y del grado de ramificación. Los polietilenos de alto peso molecular muestran más orientación que los materiales de peso molecular bajo, y la orientación disminuye a medida que sube la temperatura.

Polietileno sólido: En la tabla 3 se muestran algunas de las propiedades típicas del polietileno sólido:

TABLA 3
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Peso molecular medio	25.000 g/mol
Viscosidad intrínseca (en tetranidronaftaleno a 75 ° C)	1,0 dlts/gr
Punto de Fusión	110 ° C
Densidad	
a 20 ° C	0,92 g/cm ³
a 50 ° C	0,90 g/cm ³
a 80 ° C	0,87 g/cm ³
a 110 ° C	0,81 g/cm ³
Coefficiente de dilatación lineal entre 0 y 40 ° C	0,0002 °C ⁻¹
Aumento de volumen por calentamiento desde 20 a 110 ° C	14%
Compresibilidad a 20 ° C	5,5 x 10 ⁻⁵ atm
Calor específico	
a 20 ° C	0,55 kcal/kg °C
a 50 ° C	0,70 kcal/kg °C
a 80 ° C	0,90 kcal/kg °C
Índice de refracción	1,52

Módulo de Young (0-5% de extensión)	1.600 Kg./ cm ²
Resistencia a la tracción a 20 ° C.	150 Kg./ cm ²
Resistencia al choque (barra con muesca de 0,5 plg. en cuadro)	+2,07 Kg.-m
Dureza Brinell (bola de 2 mm de diámetro., 3 Kg).	2
Conductividad térmica	0,0007 cal/ (seg.) (cm ²) (° C/cm.)
Alargamiento en la ruptura	500 %

Estas propiedades se refieren a un producto con peso molecular aproximado de 25.000. Algunas de las propiedades son relativamente insensibles al peso molecular, entre ellas la densidad, el punto de fusión, el calor específico, la dureza y el módulo de Young; otras, como la resistencia a la tracción, la resistencia al choque, la resistencia al desgarramiento, el alargamiento en la rotura por tracción y la flexibilidad a temperaturas bajas, son sensibles al peso molecular. La elección del peso molecular necesario para diferentes usos significa, en general, una transacción entre las propiedades mecánicas mejoradas del material de alto peso molecular y la mayor facilidad para fabricar artículos con el material de peso molecular más bajo. En la tabla 4 se puede observar dichas propiedades:

TABLA 4

RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES QUE ESTÁN O NO EN FUNCIÓN DEL PESO MOLECULAR

Propiedad = f(peso molecular)	Propiedad NO es f(peso molecular)
Resistencia a la tracción Resistencia al choque Resistencia al desgarramiento Alarg. en la rotura por tracción Flexibilidad a bajas Temperaturas	Densidad Punto de fusión Calor específico Dureza Módulo de Young

La tensión en el punto de ruptura depende del peso molecular; pero para un material con peso molecular de 25.000 puede ser el doble de la tensión en el punto cedente. La forma de la curva general de esfuerzo-deformación depende de la temperatura y de la rapidez de aplicación del esfuerzo. A medida que aumenta la temperatura, baja el punto cedente; mientras que un aumento en la rapidez con que aplica la tracción da como resultado un aumento del punto cedente y de la resistencia final, y también en la perfección de la orientación del ejemplar estirado en frío. A medida que se reduce la temperatura por debajo de las temperaturas ordinarias, se reduce el alargamiento en la ruptura y se alcanza una temperatura en la cual no se produce estirado en frío, rompiéndose el ejemplar bruscamente con sólo un alargamiento de 10%. Esta temperatura es aproximadamente aquella en que un ejemplar no puede ser doblado más que en un grado muy limitado sin que se rompa como si fuera un material quebradizo.

Una propiedad bastante extraordinaria del polietileno de peso molecular inferior a 20.000 es su sensibilidad al agrietamiento cuando se somete a tensiones en contacto con ciertos líquidos, en especial líquidos orgánicos polares. Los rasgos moleculares que rigen esta propiedad son semejantes a los que regulan la flexibilidad a baja temperatura, y si es necesaria la resistencia a esta forma de ataque, debe usarse polietileno de alto peso molecular.

Todas las propiedades mecánicas del polietileno son sensibles a la historia térmica del ejemplar. Si el material se enfría rápidamente desde el estado fundido, el sólido tiene densidad y cristalinidad menores; por consiguiente es más blando y más flexible y, por lo menos al principio, es más resistente al agrietamiento a bajas temperaturas y al agrietamiento en presencia de líquidos orgánicos. Por otro lado, es probable que contenga más tensiones internas. El enfriamiento lento partiendo del estado fundido o el recocido de la muestra, por ejemplo, por tratamiento en agua hirviendo, da un producto más cristalino, más duro y algo más quebradizo; pero el sólido puede estar sometido a menos tensiones y es menos probable que se produzcan cambios lentos en las dimensiones al elevarse después la temperatura.

El polietileno sólido sufre deslizamiento en frío, como sucede a muchos otros polímeros; pero en virtud de su naturaleza cristalina, este corrimiento es muy

pequeño a temperaturas ordinarias, salvo bajo cargas que se aproximan al punto de cedencia. Sin embargo, a temperaturas más altas, el corrimiento en frío es apreciable. Cuando se somete una muestra a tracción, esfuerzo cortante o compresión, al principio se deforma rápidamente; pero la rapidez con que varían las dimensiones disminuye a medida que pasa el tiempo; por lo menos durante un cierto tiempo, la deformación es aproximadamente una función lineal del logaritmo del tiempo de aplicación. A temperaturas más altas y con tensiones mayores se produce una deformación permanente de la muestra.

Algunas propiedades de los PEBD y PEAD están descritas en la tabla 5:

TABLA 5

PROPIEDADES DE POLIETILENOS

PROPIEDAD	PEBD	PELBD	PEAD
Densidad, g/cm ³	0,92-0,93	0,922-0,926	0,95-0,96
Resistencia a la tracción x 1000 psi	0,9-2,5	1,8-2,9	2,9-5,4
Elongación, %	550-600	600-800	20-120
Cristalinidad, %	65	95
Rigidez dieléctrica, V/mill.	480	480
Máxima temperatura de uso, ° C	82-100	480	80-120

Solubilidad e hinchazón: A temperaturas inferiores a 60 ° C, el polietileno, si se exceptúan las muestras de peso molecular muy bajo, es muy poco soluble en los disolventes, pero a temperaturas más altas es fácilmente soluble en hidrocarburos e hidrocarburos halogenados, aunque sigue siendo muy poco soluble en líquidos más polares, como alcoholes, ácidos, ésteres, aminas, fenoles y nitrocompuestos. La rapidez con que varía la solubilidad en función de la temperatura es frecuentemente tan grande que da el aspecto de casi una temperatura crítica por debajo de la cual el polímero es insoluble y por encima de la cual es fácilmente soluble. La solubilidad del polietileno depende hasta cierto punto del peso molecular; las variedades más solubles son las de peso molecular más bajo; pero a temperaturas inferiores a 110 ° C, tiene también mucha importancia el grado de ramificación de la cadena y, por consiguiente, la capacidad del polímero sólido para cristalizar. De dos polímeros con el mismo peso molecular, pero con diferentes grados de ramificación, el más soluble es el más ramificado.

Cuando se pone polietileno sólido en contacto con un disolvente, se produce absorción apreciable del líquido por polímero sólido e hinchazón apreciable del sólido, incluso a temperaturas en las cuales no se produce disolución apreciable del polímero. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la cantidad y la rapidez de la absorción. La absorción del líquido es afectada por el peso molecular y por la estructura molecular y disminuye a medida que

aumenta el peso molecular y a medida que el polímero tiene una estructura más cristalina y menos ramificada. El polietileno es insoluble en agua y sólo absorbe ésta en un grado muy limitado. La absorción de agua aumenta con la temperatura.

Permeabilidad: Una propiedad importante del polietileno es su pequeña permeabilidad al vapor de agua. Por otro lado, el polietileno tiene una permeabilidad elevada a los vapores orgánicos y al oxígeno. La permeabilidad aumenta con la temperatura.

Propiedades eléctricas: Como podía esperarse de su composición química, el polietileno tiene una conductividad eléctrica pequeña, baja permitividad, un factor de potencia bajo (9,15) y una resistencia dieléctrica elevada. Las propiedades eléctricas no son especialmente sensibles a la humedad en virtud de la absorción muy pequeña de agua por el polietileno; pero el factor de potencia es probable que aumente si se somete el polietileno a la oxidación.

Propiedades químicas: El polietileno es uno de los polímeros más estables e inertes, como podía esperarse de su estructura sustancialmente parafínica. Sin embargo, tiene algunas reacciones que limitan sus usos y que exigen adoptar ciertas precauciones durante su tratamiento.

En ausencia completa de oxígeno, el polietileno es estable hasta 290° C. Entre 290 y 350° C, se descompone y da polímeros de peso molecular más bajo, que son normalmente termoplásticos o ceras, pero se produce poco etileno. A temperaturas superiores a 350° C, se producen productos gaseosos en cantidad creciente, pero el producto principal no es el etileno, sino el butileno. En este aspecto, el polietileno difiere del poliestireno y del metilacrilato de metilo, que dan el monómero como producto principal de la pirólisis. En presencia de oxígeno, el polietileno es mucho menos estable. Se han observado cambios en las propiedades físicas y químicas que indican oxidación y degradación de las moléculas del polímero a 50° C, y en presencia de la luz se produce una degradación incluso a las temperaturas ordinarias.

La oxidación térmica del polietileno es importante en el estado fundido, porque influye sobre el comportamiento en los procesos de tratamiento, y en el estado sólido porque fija límites a ciertos usos. Los principales efectos de la oxidación del polietileno son variaciones en el peso molecular que se manifiestan primero por cambios en la viscosidad y, cuando son más intensos, por deterioro en la resistencia mecánica, variación en las propiedades eléctricas (especialmente aumento en el factor de potencia), desarrollo de olor rancio y cambio de color al amarillo, pardo y, en casos extremos, al negro. Una oxidación intensa, especialmente a temperaturas

elevadas, conduce a la degradación de la cadena y a la pérdida de productos volátiles: monóxido de carbono, agua y ácidos grasos, y el producto se hace quebradizo y parecido a la cera.

El proceso de la oxidación es autocatalítico; aumenta la rapidez de la oxidación a medida que aumenta la cantidad de oxígeno absorbido. La velocidad de oxidación varía de una muestra a otra y es mayor cuando la ramificación de cadena es grande y también si el contenido inicial de grupos que contienen oxígeno es grande.

La oxidación térmica del polietileno puede reducirse o suprimirse durante algún tiempo incorporándole antioxidantes; en general, éstos son los mismos tipos que se usan para el caucho, y muchos son fenoles o aminas. Al elegir el antioxidante, se prestará atención a puntos como la ausencia de color y olor y a la baja volatilidad para evitar pérdidas durante el tratamiento a temperaturas altas [6].

2.1.1.3 Relación entre la Estructura y las propiedades del Polietileno

Tres propiedades moleculares básicas: densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular son las que afectan a la mayoría de las propiedades esenciales en el uso de polietileno para obtener productos de buena calidad. Pequeñas variaciones en la

estructura molecular pueden mejorar o afectar algunas de estas propiedades considerablemente. Las propiedades eléctricas de las resinas de polietileno, por otra parte, son poco afectadas por estos tres factores moleculares básicos (ya que la composición química de los diversos polietilenos es idéntica; esto es, $[\text{CH}_2]_n$).

Efectos producidos por variaciones en la densidad

Una clasificación general basada en tres clases distintas de densidad es ahora generalmente aceptada en la industria (tabla 6).

TABLA 6

VARIEDAD DE DENSIDADES DE POLIETILENO

Baja densidad	0,910 a 0,925 g./cm ³
Mediana densidad	0,926 a 0,940 g./cm ³
Alta densidad	0,941 a 0,965 g./cm ³

Los polietilenos más densos son lógicamente más pesados, pero aún los artículos fabricados con los polietilenos de alta densidad flotarán en agua. Esta es una ventaja para el moldeador pues le permitirá obtener más volumen por cada kilogramo de polietileno que usando cualquier otro plástico (tabla 7).

TABLA 7

PROPIEDADES DE POLIETILENO EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD

Densidad [g/cm ³]	0,915- 0,918	0,924	0,929- 0,938
Punto de ablandamiento		más elevado	máximo
Resist. al estiramiento		más elevada	máxima
Resist. a la tracción	máxima	más elevada	
Elongación en rotura	máxima	más elevada	
Rigidez		más elevada	máxima
Resistencia a la contracción	máxima	más elevada	
Resistencia a la deformación	máxima	más elevada	
Resistencia al impacto	máxima	más elevada	
Resistencia a la desgarradura		máxima	máxima
Resistencia a la fragilidad a bajas temperaturas	máxima	más elevada	
Resistencia al cuarteo bajo tensiones ambientales	máxima	más elevada	
Impermeabilidad a gases y líquidos		más elevada	máxima
Transparencia		más elevada	máxima
Ausencia de opacidad		más elevada	máxima
Brillo		más elevado	máximo
Tiraje		más elevado	máximo
Resistencia a la desgarradura en caliente		más elevada	máxima
Resistencia al pegado entre sí y al molde		más elevada	máxima
Ciclo de inyección		menor	más corto

Efectos producidos por variaciones en el peso molecular promedio

Cada resina de polietileno consiste en una mezcla de cadenas cortas y largas, esto es moléculas de alto y bajo peso molecular. El promedio de estos pesos moleculares es la segunda propiedad molecular básica. Dentro de ciertas limitaciones el peso molecular promedio es inversamente proporcional al índice de fusión, es decir si el peso molecular promedio aumenta, el índice de fusión disminuye y viceversa.

El índice de fusión describe la fluencia de una resina de polietileno a una determinada temperatura (190° C) y a una determinada presión. Si el índice de fusión de una resina es bajo, su viscosidad es elevada y viceversa, siendo viscosidad de fusión la resistencia de la resina fundida a fluir durante la formación de película, tubería o recipientes. Por lo tanto, las resinas de mayor índice de fusión fluyen más fácilmente en el estado de fusión que aquellas con menor índice. La fluencia del polietileno fundido es afectada por condiciones de procesado tales como presión, temperatura, y estas condiciones pueden variar extensamente. El índice de fusión debe ser utilizado juntamente con otras normas para describir la fluencia y otras propiedades de las resinas. En lugar del índice de fusión, los moldeadores por inyección se refieren a resinas de PE de mediana, alta o muy alta fluencia. Los moldeadores por extrusión se referirán a polímeros de baja, mediana o alta velocidad de extrusión.

Generalmente las resinas de polietileno más indicadas para aplicaciones tales como extrusión de película, y soplado de botellas deben tener un peso molecular promedio un tanto mayor que aquellas resinas indicadas para otras aplicaciones, tales como moldeo por inyección.

Efectos producidos por variaciones en la distribución del peso molecular

La distribución del peso molecular da una idea general sobre la proporción de las cadenas moleculares grandes, medianas o pequeñas de la resina. La distribución del peso molecular se considera estrecha si la resina está formada por cadenas de un largo cercano al promedio, y se considera amplia si la resina está formada por cadenas de longitud muy variada.

Las resinas de PE con una distribución del peso molecular estrecha son superiores en algunas propiedades esenciales, mientras que aquellas con una amplia distribución son mejores con respecto a otras propiedades.

Efecto producido por las tres propiedades moleculares básicas

TABLA 8

PROPIEDADES MOLECULARES BÁSICAS DEL HDPE

PROPIEDADES FÍSICAS	Si se aumenta la densidad (Cristalinidad) entre 0,915 y 0,938)	Si se aumenta el peso molecular promedio o se disminuye el índice de Fusión (Fluidez)	Si se hace más estrecha la distribución del peso Molecular
Viscosidad de la masa fundida	más elevada	más elevada	ligeramente mayor
Punto de ablandamiento	mucho mayor	ligeramente mayor	ligeramente mayor
Resist. al estiramiento	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Resist. a la tracción en rotura	ligeramente menor	más elevada	ligeramente mayor
Elongación en rotura	menor	más elevada	...
Resist. al escurrimiento	más elevada	Ligeramente mayor	más elevada
Rigidez a la flexión	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Flexibilidad	menor
Dureza	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Resistencia a la abrasión	más elevada	ligeramente mayor	...
Contracción	más elevada	más elevada	...

Deformación	ligeramente mayor	más elevada	más elevada
Resist. al impacto (Tenacidad)	menor	más elevada	...
Resist. a la fragilidad	menor	ligeramente mayor	ligeramente mayor
Resist. a la desgarradura	Depende del proceso de fabricación de la película y dirección de la rotura.		
Resist. a la fragilidad a bajas temperaturas	menor	más elevada	más elevada
Resist. al cuarteo bajo tensión ambiental	menor	más elevada	ligeramente mayor
Impermeabilidad a la absorción de grasas y aceites.	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Transparencia	más elevada	menor	...
Ausencia de opacidad	más elevada	menor	...
Brillo	más elevada	menor	...
Tiraje	ligeramente mayor	mucho menor	menor
Resist. al pegado entre sí y al molde	más elevada	ligeramente mayor	...
Propiedades eléctricas.	ligeramente mayor	no afecta	no afecta

Como se observa en la tabla 8, las relaciones entre estas tres propiedades moleculares básicas y otras propiedades físicas del PE no siempre son sencillas y claras. Otras características estructurales aparte de las tres nombradas, ejercen con frecuencia su influencia sobre las propiedades físicas de la resina. Las condiciones de operación pueden alterar la orientación (alineamiento) de las moléculas y por lo tanto afectar las propiedades de dicha resina.

Con un incremento en la densidad se mejoran propiedades tan importantes como el punto de ablandamiento, impermeabilidad a gases y líquidos, claridad de la película (transparencia y ausencia de opacidad) y brillo, pero afectando a la flexibilidad y tenacidad.

Un aumento en el peso molecular promedio puede hacer a la resina más apropiada para usos en que se requiera mayor tenacidad. Un artículo fabricado con una resina de polietileno de mayor peso molecular promedio, tendrá mayor resistencia al cuarteo bajo tensión ambiental, o sea a cuartearse cuando es sometido a esfuerzos en presencia de líquidos tales como detergentes, aceites o solventes. Dado que la viscosidad (la propiedad de fluir más lentamente en estado de fusión) aumenta con el peso molecular, las resinas de PE de más alto peso molecular son más difíciles de extruir y, por lo tanto, requieren temperaturas más elevadas. Por otra parte, las

resinas de PE de menor peso molecular se utilizan para aplicaciones tales como moldeo por inyección a menores temperaturas y ciclos más cortos.

Las resinas de PE tienen una estrecha distribución del peso molecular son particularmente resistentes al cuarteo bajo tensión ambiental y a la fragilidad a bajas temperaturas.

Debido a que un número muy variado de resinas pueden ser producidas controlando las tres propiedades moleculares básicas mencionadas, el productor puede determinar la resina y las propiedades del producto terminado [7].

2.1.1.4. Usos y Aplicaciones

El polietileno ha encontrado amplia aceptación en virtud de su buena resistencia química, falta de olor, no toxicidad, poca permeabilidad para el vapor de agua, excelentes propiedades eléctricas y ligereza de peso. Se emplea en tuberías, fibras, películas, aislamiento eléctrico, revestimientos, envases, utensilios caseros, aparatos quirúrgicos, juguetes y artículos de fantasía.

Las primeras aplicaciones del polietileno se basaron en sus excelentes propiedades eléctricas, y hasta el año 1945 su uso como aislante en los cables submarinos y otras formas de recubrimiento de conductores absorbió la mayor parte del material fabricado. Recientemente, han adquirido mayor importancia los usos que se basan en su inercia y su resistencia al agua, y hoy se usa el polietileno en grado cada vez mayor para hacer botellas y otros envases, tuberías para agua y película para envolver, usos que consumen más de la mitad del polietileno producido. A continuación se estudian con más detalles algunos de los usos más importantes.

Cables

Como aislante para los cables submarinos. En esta aplicación, la escasa permitividad y la resistencia al agua son de especial utilidad. En 1940, era usado como aislante en los cables de alta frecuencia usados especialmente en las instalaciones de radar, y en este caso es el factor de potencia el que tiene la máxima importancia. Muchos otros tipos de cables para usos militares y civiles han empleado también el PE como aislante.

Envases, vasijas y tubos

El PE se usa muchos en forma de botellas, vasos y otros recipientes, tanto en la industria para la manipulación de materias corrosivas como en el hogar para diversos líquidos. En esas aplicaciones, las principales ventajas son la

inercia, el poco peso y menor probabilidad de que se rompa, comparado al vidrio. El PE se utiliza en frascos lavadores de laboratorio y en frascos para la pulverización de cosméticos. El PE se usa mucho para cierres de diversos tipos.

Revestimiento del papel

Otro uso del polietileno en forma de película es el revestimiento del papel para reducir la permeabilidad al vapor de agua y mejorar las propiedades mecánicas. Un uso semejante del PE es el mejoramiento de las propiedades del revestimiento de parafina aplicado al papel.

Filamentos

El bajo punto de fusión del polietileno limita seriamente su uso como fibra textil; pero se han hecho tejidos para tapicería de automóviles con monofilamentos de polietileno. El PE no se tiñe fácilmente. Los filamentos se usan en el estado estirado en frío, y una limitación a la utilidad de este material es el aflojamiento que se produce a temperaturas elevadas. El deterioro mecánico a la luz solar es también un problema [8].

2.1.2. Otros plásticos de importancia en el Ecuador

En el Ecuador se han desarrollado muchos productos en cuanto a las diversas actividades que se pueden realizar cotidianamente. Es así que existen empresas especializadas que, como se menciona en un artículo presentado por ASEPLAS [9], se fueron desarrollando industrialmente, tal es el ejemplo de Pica que desde el inicio se dedicó a la fabricación de artículos para el hogar y de zapatos en base de plásticos. Productos Latinoamericanos, ahora llamado Plastigama, fabricaba e importaba films de celofán y tuberías de polietileno, para luego de unos años dedicarse, hasta ese entonces a un mercado no explorado, como lo es la comercialización de tuberías de PVC; lo que en la actualidad es la empresa número uno en el Ecuador en desarrollar dichos productos.

Otra de las empresas pioneras en el Ecuador es Plásticos Soria, que producía zapatos, películas, fundas y productos descartables; Celoplast que producían envases flexibles a partir de lámina de celofán y película de polietileno de baja densidad; y Plásticos Ecuatorianos que producían envases de medio litro hasta 40 litros.

En la actualidad, las empresas Ecuatorianas plásticas desempeñan un porcentaje alto del PIB de la nación, ya que sus productos gozan de una aceptación realmente importante, debido a la calidad que les precede a estos materiales, que orgullosamente se puede mencionar que son fabricados en Ecuador.

2.2. Proceso de Extrusión

La función principal de una extrusora es de desarrollar la suficiente presión en el material para forzar el material hacia el dado. La presión necesaria para forzar al material hacia el dado depende de la geometría del dado, las propiedades de flujo del material y la tasa de flujo. Básicamente, una extrusora es una máquina capaz de desarrollar presión. Por otra parte, se puede decir que una extrusora es una bomba. Una extrusora plástica es una bomba para materiales plásticos. Sin embargo, no tiene que ser confundido con una extrusora plastificante, la cual es una máquina que no solo extruye sino que también plastifica o mezcla el material. Una extrusora plastificante es alimentada con partículas sólidas plásticas y llevadas a un plástico completamente fundido al dado. De otra forma, una máquina que extruye plástico fundido sin mezclarlo es llamado extrusora mezcladora-alimentadora.

Componentes de una extrusora

El tornillo extrusor.- el corazón de la extrusora es el tornillo extrusor. Este es un cilindro largo con una helicoidal alrededor de ella. El tornillo es muy importante debido a que la transportación, el calentamiento, la fundición y la mezcla de los plásticos son mayormente determinadas por el tornillo (figura 2.2).

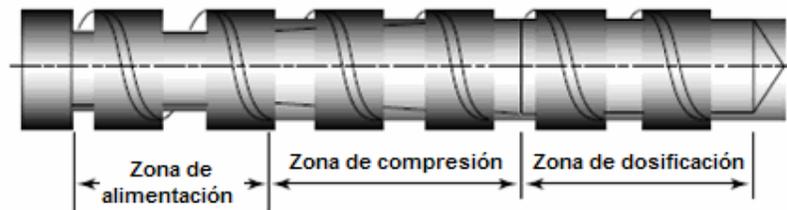


FIGURA 2.2. SECCIONES EN UN TORNILLO EXTRUSOR SIMPLE

La estabilidad del proceso y la calidad del producto extruido son muy dependientes del diseño del tornillo. El tornillo rota en un cilindro que encaja cercanamente alrededor de este.

El barril extrusor.- El cilindro es llamado el barril extrusor. El barril es un cilindro recto usualmente equipado con un forro bimetálico; este forro es una capa dura e integral con alta resistencia al desgaste. En muchos casos, la resistencia al desgaste del barril puede ser mejor que el del tornillo. La razón es que el tornillo es mucho más fácil de reconstruir y reemplazar que el barril.

El alimentador.- el alimentador está conectado al barril; este contiene el orificio de alimentación por la cual el material plástico es introducido a la extrusora. La garganta del alimentador usualmente tiene capacidad de enfriado por agua porque la temperatura de la garganta es mantenida lo suficientemente baja para prevenir que las partículas de plástico se impregnen en las paredes. Para incrementar la capacidad de aspiración de la garganta del alimentador, el orificio de alimentado puede ser desplazado como se muestra en la figura 2.3 y tener una forma alargada. La longitud del orificio de alimentado puede estar alrededor de 1,5 veces el diámetro del barril y ancho de $3/4$ de veces el diámetro, como se muestra.

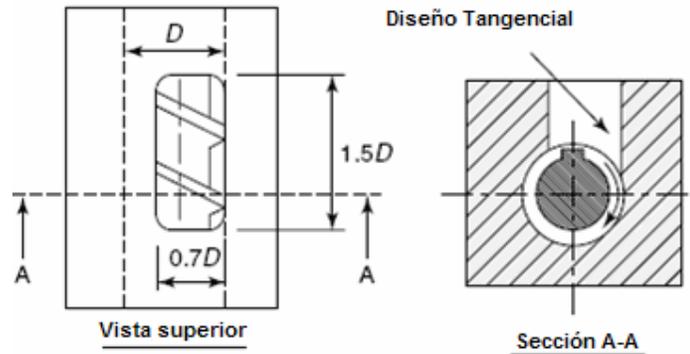


FIGURA 2.3. GEOMETRÍA PREFERIDA PARA UNA ABERTURA DE ALIMENTACIÓN EN LA GARGANTA DEL ALIMENTADOR

El depósito del alimentador.- La garganta del alimentador es conectado al depósito del alimentador y al barril de la extrusora. El depósito sostiene los pellets plásticos o polvos y descarga el material en la garganta de

alimentación. El depósito puede ser diseñado para permitir el flujo constante del material hacia el depósito. Se puede conseguir un flujo constante óptimo con un depósito circular con una transición gradual en la sección cónica del depósito.

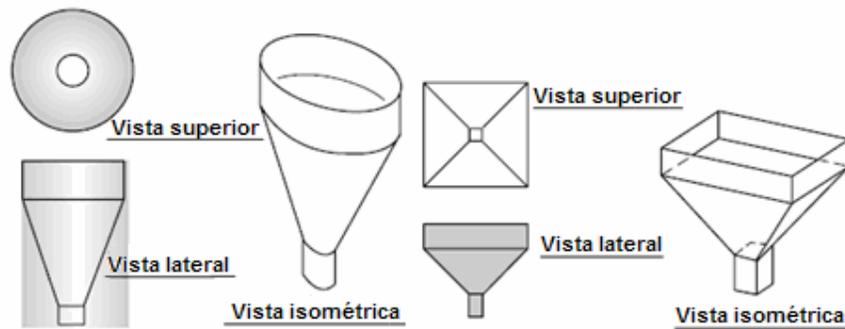


FIGURA 2.4. BUEN DISEÑO DEL DEPÓSITO (IZQUIERDA) Y DISEÑO DEL DEPÓSITO NO ÓPTIMO (DERECHA)

Para materiales de volúmenes complejos, formas especiales, etc., pueden usarse almohadillas vibrantes (vibrating pads), agitadores, limpiadores e incluso tornillos de compactación, como se muestra en la figura 2.5, para promover el flujo constante hacia el depósito y forzar el material a la descarga.

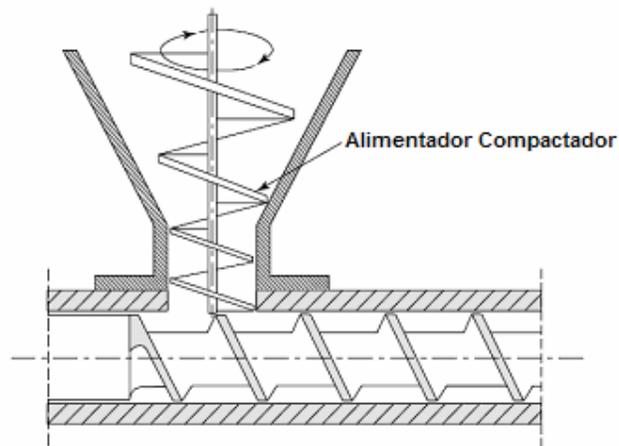


FIGURA 2.5. EJEMPLO DE ALIMENTADOR COMPACTADOR

Calentamiento y Enfriamiento del Barril.- el barril de la extrusora típicamente tiene capacidad de calentamiento y de enfriamiento. El calentamiento es usualmente realizado con calentadores de abrazaderas eléctricas localizadas a lo largo de la longitud de la extrusora. El calentamiento por inducción y radiación no son comúnmente usadas; a nivel industrial, el calentamiento del fluido es usado en algunas operaciones de extrusión de caucho y en algunas extrusoras de plásticos envejecidos.

Muchas de las extrusoras tienen al menos 3 zonas de temperaturas a lo largo de la longitud del barril. Cada zona tiene su propia capacidad de calentamiento y enfriamiento y al menos un sensor de temperatura para sentir la temperatura de la zona. La temperatura es usualmente medida en el barril.

El barril tiene que ser enfriado si la generación interna de calor en el plástico incrementa las temperaturas de barril arriba del punto fijado. Esto es común que ocurra cuando se está extruyendo plásticos de alta viscosidad y cuando se está corriendo a velocidades altas del tornillo. El enfriamiento en extrusoras de tornillo simple es usualmente realizado con aire. Una serie de ventiladores son localizados bajo el barril de la extrusora y las zonas de temperatura son particionadas, para que así cada uno de los ventiladores enfríe solo una zona de temperatura, como se muestra en la figura 2.6.

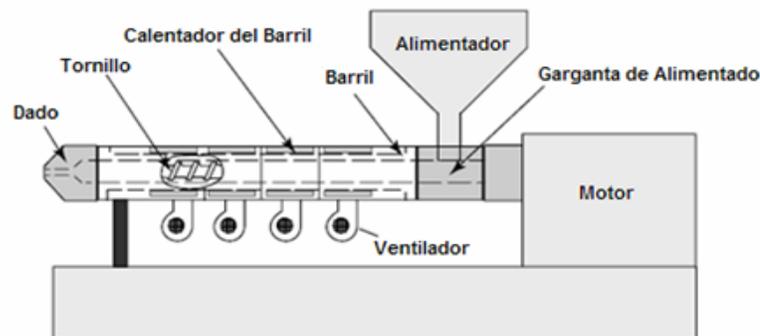


FIGURA 2.6. EXTRUSORA CON CALENTADORES DE BARRIL Y VENTILADORES PARA ENFRIAMIENTO

Pueden ser usados enfriadores de agua, particularmente si grandes cantidades de calor necesitan ser removidos. El proceso de extrusión normalmente va mejor cuando el tornillo proporciona más de la energía necesitada en el proceso, tal que se necesite un adicional calentamiento o enfriamiento para ser llevado hasta el barril.

Enfriamiento y calentamiento del tornillo.- el tornillo de una extrusora usualmente no es calentado ni enfriado; tal que un tornillo es llamado tornillo neutral. Sin embargo, es posible que el tornillo se caliente o enfríe quitando el tornillo (haciendo a este cóncavo) y circulando un fluido que transfiera calor hacia la sección cóncava. El tornillo puede incluso ser calentado mediante un calentador de cartucho. Si el calentador de cartucho está equipado con un sensor de temperatura, la potencia al calentador puede ser controlada para mantener una temperatura constante.

Plato divisor.- El plato divisor está localizado al final del barril. Este es un disco metálico fino con agujeros espaciados cercanamente. El propósito principal del plato divisor es soportar un número de pantallas localizadas justo al frente del plato divisor. La otra función de éste es de frenar el movimiento en espiral de la mezcla como si viniera hacia afuera del tornillo. El plato divisor fuerza a la mezcla a fluir en una línea recta diseñada en el dado. Esto permite incorporar la capacidad de mezclado en el plato divisor, por lo tanto le permite actuar como un mezclador estático. Este plato divisor de mezclado (MIXING BREAKER PLATE MBP) tiene muchos canales grabados que separan el fluido y exponen al plástico mezclado a la elongación del fluido. Esto promueve la mezcla dispersiva y distributiva. Un ejemplo de MBP es mostrado en la figura 2.7.

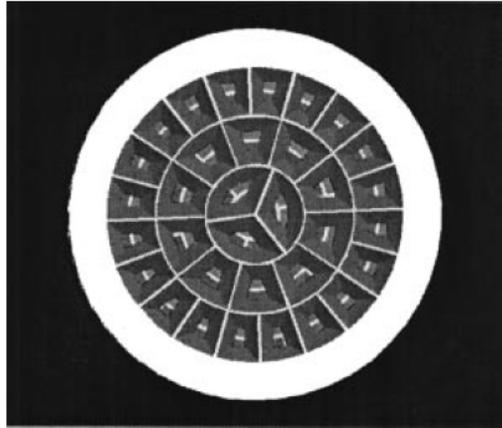


FIGURA 2.7. EJEMPLO DE UN PLATO DIVISOR DE MEZCLADO

Las pantallas son usadas para atrapar contaminantes, así que estos no pueden dar el acabado en el producto extruido.

El dado extrusor.- el dado es localizado al final de la extrusora. Su función es formar un plástico fluyente en la forma deseada con el producto extruido. Los dados pueden ser categorizados por la forma del producto que ellos producen, como por ejemplo: dados anulares son usados para hacer tuberías, tubos y revestimientos de alambres, dados con hendidura son usados para hacer films planos y hojas, dados circulares son usados para hacer fibras y barras, dados de perfil son usados para hacer formas diferentes del anular, circular y rectangular [10][11].

2.3. Mezclado en extrusión

Antes de estudiar cada mezcla, se debe determinar qué se pretende lograr con ellas. Sin embargo, hay dos funciones básicas para mezclar los procedimientos individuales ideados para llevar a cabo una u otra de éstas, considerando materiales y condiciones.

2.3.1. Mezclado Distributivo

También llamado mezcla extensiva y homogeneización, consiste básicamente en revolver todos los ingredientes. Con frecuencia, esto significa combinar una cantidad de sólidos, por ejemplo, polvo de polipropileno, pigmento, antioxidante. El resultado es una mezcla de polvos; los polvos originales permanecen sin cambio y, en teoría, pueden separarse, aunque en la práctica esto podría ser difícil. Al inspeccionar con una lupa, es posible observar las partículas individuales de polvo.

2.3.2. Mezclado Dispersivo

También llamado mezcla intensiva o formación de compuestos. Con la mezcla dispersiva se logra la mejor dispersión de los aditivos en el seno del polímero. Por lo común, se requiere:

- Un cambio físico en los componentes;
- Altas fuerzas cortantes para provocar el cambio;
- Que el polímero esté en el estado fundido o en estado gomoso para mezclarlo

¿Cuándo se usan las “mezclas de homogeneización” y cuándo la “formación de compuestos”?

En la mayoría de los casos, es necesario lograr distribución y dispersión aceptables para obtener un producto satisfactorio. Se usa la mezcla de homogeneización o distributiva:

- Cuando el proceso de fabricación tiene alguna etapa de formación de compuestos. Por ejemplo, pueden revolverse pigmentos con los gránulos o el polvo de polímero antes del moldeo por inyección o la extrusión para dar algún color al producto.
- En el caso de polvos de materiales termoestables, los cuales son a menudo mezclas homogéneas de resinas pulverizadas y cargas que se dispersan al fundirse la resina durante el moldeo.
- Como una etapa preliminar de un proceso en que se forman de compuestos separados.
- La formación de compuestos o mezcla dispersiva es necesaria como un proceso individual:

- Cuando se requiere distribución precisa y dispersión de los ingredientes interactivos.
- Cuando se usan grandes cantidades de ingredientes modificadores, por ejemplo, carga, plastificantes, otros polímeros, etc.
- Cuando el proceso de fabricación tiene una función de formación de compuestos insuficiente o escasa [11].

2.4. Reciclaje de termoplásticos

Considerar el problema de los residuos sólidos y la contaminación ambiental que originan los materiales termoplásticos ha llevado a pensar en técnicas idóneas para economizar, en todos los aspectos, siendo este el objetivo primordial del sector industrial así como de la sociedad, por lo que cada vez es más necesaria la recolección y reutilización de los desechos plásticos. Debido a que el reciclado de los materiales termoplásticos es cada vez más aceptado en la industria, la tendencia principal está dirigida a lograr la calidad de los materiales reciclados.

Existen dos categorías generales de los plásticos residuales:

- Residuos industriales o de manufactura.- Generados como parte de un proceso de fabricación de un producto plástico que no fueron

utilizados como un producto terminado por fallas o por considerarse fuera de especificaciones.

- Residuos post-consumo.- Han cumplido con el servicio para el cual fueron destinados, sin considerar el tipo de consumidor y pueden ser tanto botellas (para contener bebidas gaseosas, leche, aceite, etc.), contenedores de mayor tamaño, y partes automotrices.

El reciclado, involucra la recolección, reprocesado, mercado y uso de los materiales recuperados de la corriente de residuos sólidos. Considerándose como material factible de ser reciclado, todo aquel que posea propiedades físicas y químicas útiles, después de ser utilizados para su propósito original y que puede ser reutilizado en productos nuevos [12].

2.4.1. Reciclaje químico

Se trata de diferentes procesos mediante los cuales las moléculas de los polímeros son craqueadas (rotas) dando origen nuevamente a materia prima básica que puede ser utilizada para fabricar nuevos plásticos.

El reciclado químico comenzó a ser desarrollado por la industria petroquímica con el objetivo de lograr las metas propuestas para la

optimización de recursos y recuperación de residuos [13]. Algunos métodos de reciclado químico ofrecen la ventaja de no tener que separar tipos de resina plástica, es decir, que pueden tomar residuos plásticos mixtos reduciendo de esta manera los costos de recolección y clasificación. Dando origen a productos finales de muy buena calidad.

Principales procesos existentes:

- Pirólisis: Es el craqueo de las moléculas por calentamiento en el vacío.
- Hidrogenación: En este caso los plásticos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en un petróleo sintético que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas.
- Gasificación: Los plásticos son calentados con aire o con oxígeno.
- Chemolysis: Este proceso se aplica a poliésteres, poliuretanos, poliacetales y poliamidas.
- Metanólisis: Es un avanzado proceso de reciclado que consiste en la aplicación de metanol en el PET [12].

2.4.2. Reciclaje mecánico

El reciclado mecánico es un proceso físico mediante el cual el plástico post-consumo o el industrial (scrap) es recuperado, permitiendo su posterior utilización. Los plásticos que son reciclados mecánicamente provienen de dos grandes fuentes:

- Los residuos plásticos proveniente de los procesos de fabricación, es decir, los residuos que quedan al pie de la máquina, tanto en la industria petroquímica como en la transformadora. A esta clase de residuos se la denomina scrap. El scrap es más fácil de reciclar porque está limpio y es homogéneo en su composición, ya que no está mezclado con otros tipos de plásticos.
- Los residuos plásticos proveniente de la masa de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).
- Estos se dividen a su vez en tres clases:
- Residuos plásticos de tipo simple
- Residuos mixtos
- Residuos plásticos mixtos combinados con otros residuos: papel, cartón, metales.

2.4.2.1. Separación

El primer paso para un eficiente reciclado de los materiales plásticos es la separación de los diferentes tipos y su

identificación; esto, que parece simple, es uno de los principales problemas que existen, y de su solución depende lograr una producción de materiales reciclados que mantengan características como contaminación mínima y una homogenización en su composición para su posterior utilización [12].

Los métodos utilizados están basados en las diferencias entre sus propiedades físicas, es así que se toma en cuenta: el tamaño de partícula, densidad, electromagnetismo y color.

Así tenemos como métodos de separación:

- Separación manual
- Separación por Densidad
- Separación Magnética
- Separación Electrostática
- Separación Óptica

2.4.2.2. Lavado y Secado

A continuación del proceso de separación sigue el proceso de lavado del material, ya que existen todavía ciertos elementos que pueden generar discordancias en el material resultante,

afectando de esta manera óptima procesabilidad. Consiste en sumergir al plástico en una ducha de agua y otros agentes que permiten limpiar las impurezas que se encuentran contenidas en ella. Posterior a este proceso se tiene el secado, que como su nombre lo dice, consiste en exponer al material limpio a una corriente de aire caliente para ayudar al proceso de secado de dicho material.

2.4.2.3. Peletizado

Luego del proceso de lavado y secado, el material granulado es dirigido a la zona de fundición, para que el material sea calentado y posteriormente fundido hasta cierta temperatura. A continuación es llevado por un tubo delgado para tomar una forma cilíndrica como un hilo al enfriarse en un baño de agua. Una vez enfriado el material es cortado en pedazos pequeños conocidos como pellets.

2.4.3. El problema inherente en el reciclaje de termoplásticos

En la actualidad el uso tanto de plásticos de pre-consumo como de post-consumo para la manufactura de productos inyectados se ha incrementado significativamente. Mientras que los aspectos positivos del reciclado de los materiales termoplásticos son numerosos,

asimismo se presentan consideraciones especiales que deberán ser tomadas en cuenta cuando son utilizados materiales plásticos reciclados.

Algunos de los problemas fundamentales asociados con el reciclado de los materiales plásticos incluye la disponibilidad, consistencia en la calidad, procesabilidad. También se debe de tomar el cuenta la aplicación final del material, la fuente de resina reciclada, relación virgen / reciclado, consideraciones de peso molecular promedio, estructura del material así como su morfología y las consideraciones para los aditivos [12].

2.4.3.1. Degradación Térmica

La degradación térmica ocurre cuando un polímero es expuesto a una elevada temperatura en una atmósfera inerte en ausencia de otros compuestos. La resistencia contra tal degradación depende en la naturaleza y la estabilidad térmica inherente de la cadena polimérica. Hay 3 tipos principales de degradación térmica: depolimerización, corte aleatorio de la cadena y decompresión de grupos sustituyentes.

Depolimerización y decomprensión involucran una reducción en la longitud de la cadena principal por eliminación secuencial de unidades de monómeros. Polímeros tales como polimetilmetacrilato, poliformaldeido y poliestireno se degradan de esta forma.

Es también difícil distinguir entre degradación termomecánica y térmica porque los polímeros son raramente puros químicamente. Impurezas y aditivos pueden reaccionar con la matriz polimérica a temperaturas suficientemente altas.

2.4.3.2. Degradación Mecánica

Se refiere a la incisión molecular inducida por esfuerzos mecánicos. Estos esfuerzos pueden ser esfuerzos de corte o esfuerzos de elongación o una combinación de los dos. La degradación mecánica de polímeros puede ocurrir en el estado sólido, en el estado fundido, y en solución. En una extrusora, los esfuerzos mecánicos son aplicados mayormente a los polímeros fundidos.

Varios estudios se han efectuado, uno de ellos menciona que en un campo lineal cortante de macromoléculas son extendidas en la dirección del movimiento. La tensión en la molécula es primariamente concentrada en la mitad de la cadena. No es

esperada degradación cuando el grado de polimerización es menor a un cierto valor crítico. Otro científico predijo que las mezclas generan tensión preferencial en la sección media de las macromoléculas. Así, la incisión de la cadena es más probable que ocurra en el centro de la cadena. Dice también que la ruptura de la cadena principal puede incrementarse dramáticamente con el incremento del peso molecular. Estas consideraciones teóricas sugieren que la degradación mecánica en mezcla o soluciones de polímeros es un proceso no aleatorio [14].

2.4.3.3. Degradación por radiaciones UV

La mayoría de los materiales plásticos sufren un envejecimiento que lleva asociado una merma en sus propiedades cuando son sometidos durante largos periodos de tiempo a la radiación luminosa. Es el caso de los filmes de polietileno utilizados en la agricultura que con el tiempo pierden elasticidad, haciéndose frágiles, quebradizos, llegando a rasgar fácilmente. Este envejecimiento se atribuye a una reacción de foto-oxidación térmica en cadena producida por la radiación luminosa de mayor energía correspondiente a una longitud de onda comprendida entre 290 y 350 nanómetros, en la que se generan grupos

carbonilo. Estos grupos son los que desencadenan las reacciones degradativas del plástico [15].

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Descripción de Mezclas

El producto que se desea desarrollar está en función principalmente de un material reciclado, como un planteamiento de solución medio ambiental en las industrias de plásticos en Ecuador. Existirán dos clases de mezclas:

- Mezcla de Polietileno de alta densidad Reciclado de post-consumo -tal como es usado directamente en el procesamiento de plásticos- con Polietileno de Alta densidad virgen
- Mezcla de Polietileno de Alta Densidad Petrothene 735 molido post-industrial con Polietileno de alta densidad virgen.

Las mezclas que se van a realizar para analizar las propiedades mecánicas y reológicas proceden de un material de Polietileno de

alta densidad virgen, es decir, sin procesar, marca LG HDPE Lutene-H FE0070, mostrando sus propiedades en la tabla 9.

TABLA 9
PROPIEDADES DE HDPE LUTENE-H FE0070 SIN PROCESAR

Propiedades				
Físicas	Método	Condición	Unidad	Valor
Indice de Fluidez	ASTM D1238	190°C/2.16kg	g/10min	0.05
Densidad	ASTM D1505	-	g/cm ³	0.953
Temperatura de Mezclado	DSC	10°C/min	°C	133
Mecánicas	Método	Condición	Unidad	Valor
Esfuerzo de Tensión a la Fluencia	ASTM D882	-	kg/cm ²	380, 360
Esfuerzo de Tensión a ruptura	ASTM D882	-	kg/cm ²	610, 590
Elongación a la ruptura	ASTM D638	-	%	400, 500
Esfuerzo de rasgadura	ASTM D1922	-	kg/cm ²	22, 100

La primera mezcla con reciclado de Polietileno de alta densidad de post-consumo es un producto mezclado pigmentados de diferentes colores, principalmente proveniente de envases de bebidas, maceteros, y otros productos de consumo. Son molidos a una cierta medida, no específica o especificada por una norma, ya que el distribuidor es el que realiza este proceso, pero se puede recomendar un tamaño no más grande de 1 cm.

La segunda mezcla con reciclado post-industrial de Polietileno de alta densidad Petrothene 735 color natural o transparente, proveniente principalmente del molido de envases de 1 litro de una cierta marca. El tamaño del molido se considerará como el caso anterior.

El objetivo de esta sección es encontrar la dosis que mejor desempeño presente ante los ensayos mecánicos y reológicos estipulados por las Normas a aplicar. De esta manera se han tomado en cuenta ciertas dosis de mezcla entre el elemento reciclado y el elemento virgen, cuyas distribuciones serán las siguientes:

- 10% VIRGEN – 90% RECICLADO
- 20% VIRGEN – 80 % RECICLADO
- 30% VIRGEN – 70 % RECICLADO
- 40% VIRGEN – 60 % RECICLADO

3.2. Equipos y accesorios necesarios

Fundamentalmente se desarrollará el proceso de mezclado en la Extrusora, la cual, a pesar de presentar un modo de operación y una tecnología muy básica, mostrada en la figura 3.1.



FIGURA 3.1. EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE

Además, se utilizará una prensa diseñada para calentarse mediante unas placas que poseen cables para conectarse y por resistencia eléctrica iniciar el calentamiento, esta permitirá desarrollar las probetas, con determinado espesor. Posee una cavidad que tiene como medidas 19.5 cm de largo y 6.85 cm de ancho. Posteriormente se indicará la cantidad de producto que se debe de introducir para desarrollar la probeta en sí.

El resto de equipos son principalmente utilizados en la elaboración de los ensayos de laboratorio, mencionados de manera específica en cada una de las normas que se aplicarán para los respectivos ensayos.

3.3. Preparación de Probetas

Para iniciar el proceso de elaboración de las probetas se debe de tener encendida la extrusora por lo menos por 30 min para que las zonas de calentamiento se encuentren en la temperatura especificada por el operador.



FIGURA 3.2. CONTROL DE TEMPERATURA DE 3 SECCIONES DEL BARRIL DE EXTRUSORA

También se debe de haber conectado los terminales de la prensa a un enchufe, para así lograr que en 45 min. la prensa alcance una temperatura de 120° C.

Como está mencionado en el sub-capítulo 3.1 se trabajarán con ciertos porcentajes de material virgen y reciclado. La cantidad base a colocar en la extrusora es de 500 g de elementos mezclados, distribuido de acuerdo al porcentaje que se desea obtener, como por

ejemplo, en la dosis 10% virgen – 90% reciclado se tendrá 50 g de virgen y 450 g reciclado, y así para el resto de mezclas. Como son partículas relativamente grandes, el mezclado se lo puede realizar de forma manual, tomando en cuenta que todos los elementos estén correctamente distribuidos.

Una vez mezclada la dosis correspondiente y teniendo la extrusora a punto para trabajar, se procede a encender el motor para darle movimiento al tornillo, aproximadamente se llega a 150 rpm. para realizar el mezclado. Luego se introduce cierta cantidad de preparado en el alimentador, observando que no se rebose el material del alimentador, para no desperdiciar material, como se indica en la figura 3.3.



FIGURA 3.3. APLICACIÓN DEL MEZCLADO EN EL ALIMENTADOR DE LA EXTRUSORA

En unos instantes observar que el producto mezclado va saliendo por el cabezal de la extrusora, lo recomendable es no coger el primer metro o metro y medio de producto para no encontrar impurezas o restos de algún ensayo anterior que se pudo haber efectuado. La longitud que se escoja para la elaboración de las probetas no debe de ser contaminada en lo posible por algún agente externo, ya sea por el contacto de los guantes con el producto caliente u otro factor.



FIGURA 3.4. SALIDA DEL MATERIAL EXTRUIDO

Previo a introducir en la prensa, se debe de pesar la cantidad de 50 g en la balanza electrónica, esto se lo hace para obtener una probeta de un espesor aproximado entre 3 a 4.5 mm.



FIGURA 3.5. INSERCIÓN DEL MATERIAL EXTRUIDO EN LA PRENSA

Luego de introducir el producto en la cavidad de la prensa, se procede a elevar la sección hembra de la prensa, más o menos hasta cuando la gata hidráulica indique una presión de 200 psi.

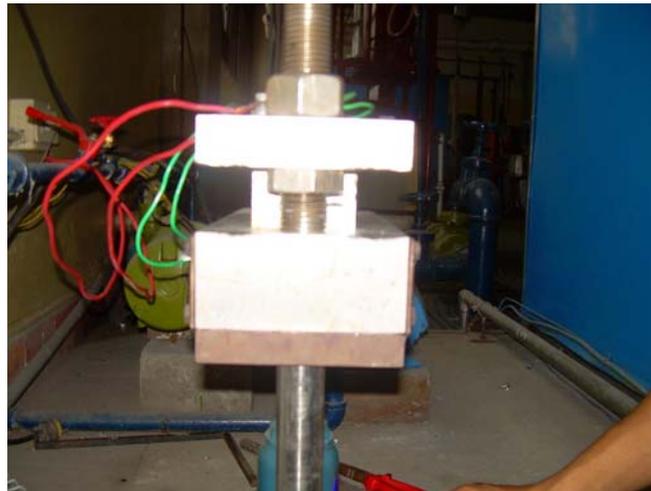


FIGURA 3.6. CIERRE DE LA PRENSA HIDRÁULICA

Después de esto se debe de desconectar las terminales de las placas de la prensa del enchufe para enviar un sobrecalentamiento de la prensa y por ende del material. Dejar en este estado aproximadamente por 45 min, dejándolo reposar con un ventilador para ayudar al enfriamiento uniforme de la prensa.

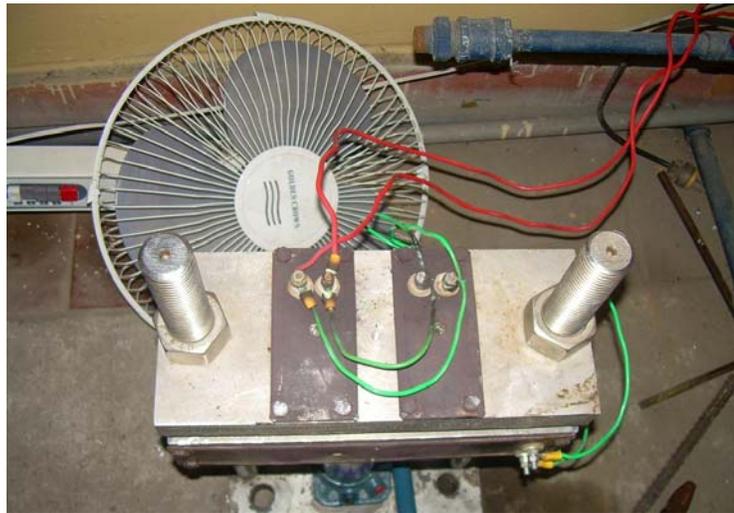


FIGURA 3.7. DESCONEXIÓN DE TERMINALES DEL ENCHUFE

Luego de transcurrido el tiempo de enfriamiento de la prensa, se procede a retirar la placa y se observa el producto deseado.

Para realizar todos los ensayos propuestos se elaboraron 3 placas de cada mezcla, 12 en total para la mezcla de Reciclado post-consumo y virgen. Para la mezcla de Reciclado de Petrothene y virgen se elaboraron 2 placas de cada mezcla, 8 en total para la posterior aplicación en los ensayos y pruebas a realizarse.



FIGURA 3.8. PLACA RESULTANTE

3.4. Ensayos y Pruebas a realizarse

3.4.1. Resistencia y Módulo a la tracción ASTM D-638

Este método cubre la determinación de las propiedades tensoras de plásticos reforzados y no reforzados mediante la elaboración de especímenes de prueba estándar en forma de pesas y probados bajo condiciones definidas de pretratamiento, temperatura, humedad, y comprobación de velocidad de máquina.

Este método de prueba puede ser usado para probar materiales de cualquier espesor superior a 14 mm [0.55 in.]. Sin embargo, para probar especímenes en la forma de hojas delgadas,

incluyendo films menores de 1.0 mm. [0.04 in.] en espesor, el Método de prueba D 882 es el método de prueba preferido. Para materiales con un espesor mayor que 14 mm [0.55 in.] deberán ser reducidos mediante mecanizado. Los datos de prueba obtenidos por el método de prueba son relevantes y apropiados para uso en diseño en ingeniería. Los valores dados en unidades SI serán considerados como estándar.

Uso y significado

Es visto que un material no puede ser probado sin también probar el método de preparación de aquel material. Ahora, cuando pruebas comparativas de materiales son deseadas, el más grande cuidado será ejecutado para asegurar que todas las muestras son preparadas en exactamente la misma manera, a menos que la prueba incluya los efectos de preparación de las muestras.

Las propiedades de tensión pueden proveer datos útiles de propósitos de diseño en ingeniería de plásticos. Sin embargo, debido que el alto grado de sensibilidad exhibido por muchos plásticos a tasas de fatiga y condiciones del medio, los datos obtenidos por este método de prueba no pueden ser considerados válidos para aplicaciones que involucren escalas

de tiempo-carga o medios ampliamente diferentes desde aquellos de este método de prueba.

Aparatos

Una máquina de pruebas del tipo de movimiento del cabezal a velocidad constante y comprenden esencialmente lo siguiente:

- Miembro Fijo.- Un miembro fijo o esencialmente estacionario portando una muela de sujeción.
- Miembro Móvil.- Un miembro móvil portando una segunda muela de sujeción.
- Muela de sujeción.- Para sostener el espécimen de prueba entre el miembro fijo y el miembro móvil de la máquina de prueba. Cuando este tipo de muela es usada se debe tener extremo cuidado para asegurar que el espécimen de prueba es insertado y agarrado de tal manera que el eje largo del espécimen de prueba coincida con la dirección de estiramiento para que un movimiento de no rotación que puede inducir desprendimiento pueda ocurrir en las muelas. La superficie de las muelas que son profundamente dentadas con un patrón similar a aquellos de una lima basta, las endentaduras de 2.4 mm [0.09 in.] a un lado y de 1.6 mm

[0.06 in.] de profundidad, han sido encontradas satisfactorias para muchos termoplásticos. Las endentaduras deben de ser mantenidas limpias y afiladas.

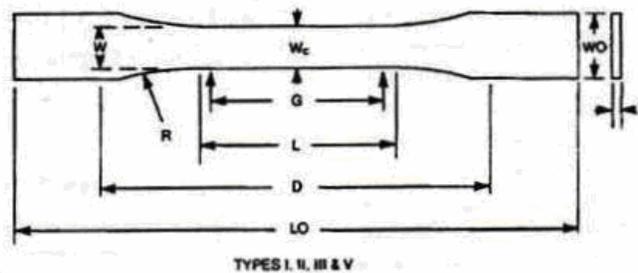
Mecanismo conductor.- Un mecanismo conductor para impartir al miembro movable una velocidad uniforme, controlada con respecto al miembro estacionario.



FIGURA 3.9. TENSÓMETRO QTEST I

Espécimen de Prueba

Plásticos rígidos y semirígidos.- El espécimen de prueba será conformado con las dimensiones mostradas en la Figura 3.10. El espécimen tipo I es el espécimen preferido y será usado donde el material tenga un espesor de 7 mm o menor es permitido.



Dimensiones de Especimen por espesor, T, mm [in.]

Dimensiones (ver dibujo)	7 [0.28] o menor	
	Tipo I	Tolerancias
W - Ancho de sección angosta	13 [0.50]	± 0.5 [± 0.02]
L - Longitud de sección angosta	57 [2.25]	± 0.5 [± 0.02]
WO - Ancho Global, min	19 [0.75]	+6.4 [+0.25]
WO - Ancho Global, min	...	+ 3.18 [+0.125]
LO - Longitud global, min	165 [6.5]	no max [no max]
G - Longitud calibrada	50 [2.00]	± 0.25 [± 0.010]
G - Longitud calibrada	...	± 0.13 [± 0.005]
D - Distancia entre extremos de sujeción	115 [4.5]	± 5 [0.2]
R - Radio de Filete	76 [3.00]	± 1 [± 0.04]
RO - Radio Exterior (tipo IV)	...	± 1 [± 0.04]

FIGURA 3.10. ESPÉCIMEN DE PRUEBA Y MEDIDAS

Preparación

Los especímenes de prueba serán preparados por operaciones de maquinado, o corte de dado, desde materiales en hojas, platos, planchas o formas similares. Los especímenes pueden también ser preparados mediante moldeo.

Número de Especímenes de prueba

Probar al menos 5 especímenes por cada muestra en el caso de materiales isotrópicos.

Velocidad de Ensayo

La velocidad de las pruebas será la velocidad relativa de movimiento de las muelas o instalación de prueba durante la prueba. Escoja la velocidad de prueba de la figura 3.11. Determinar que la velocidad de prueba escogida por la especificación del material a ser probado, o por acuerdo entre estas consideraciones. Cuando la velocidad no es especificada, use la más baja velocidad mostrada en la Tabla por la geometría del espécimen a ser usada, la cual dará una ruptura dentro de ½ a 5 minutos de tiempo de prueba.

Designaciones de Velocidad de Prueba			
Clasificación	Tipo de Especimen	Velocidad de prueba mm/min [in./min]	Tasa de Esfuerzo Nominal al empezar la prueba mm/mm·min [in/in·min]
Rígido y Semirígido	barras y tubos I, II, III	5 [0.2] ± 25%	0.1
		50 [2] ± 10%	1
		500 [20] ± 10%	10
	IV	5 [0.2] ± 25%	0.15
		50 [2] ± 10%	1.5
		500 [20] ± 10%	15
	V	1 [0.05] ± 25%	0.1
		10 [0.5] ± 25%	1
		100 [5] ± 25%	10
	No rígido	III	50 [2] ± 10%
500 [20] ± 10%			10
IV		50 [2] ± 10%	1.5
		500 [20] ± 10%	15

Seleccione la velocidad más baja que produzca ruptura en 1/2 a 5 min para la geometría del espécimen a ser usada.

Observe la terminología D 883 para definiciones.

La tasa inicial de estiramiento no puede ser calculado exactamente para especímenes en forma de pesa debido a su extensión, ambos en la sección reducida de la longitud calibrada y en los filetes. Esta tasa de esfuerzo inicial puede ser medida de la inclinación inicial del diagrama de esfuerzo de tensión versus tiempo

FIGURA 3.11. DESIGNACIÓN DE VELOCIDAD DE PRUEBA

Procedimiento

Medir el ancho y el espesor de cada espécimen casi a 0.025 mm [0.001 in.] usando el Método de prueba aplicable en D 5947.

Medir el ancho y el espesor de los especímenes de falla al centro de cada espécimen y dentro de 5 mm del final de cada longitud calibrada.

Las dimensiones de los especímenes moldeados por inyección pueden ser determinadas por la medición efectiva de solo un espécimen de cada muestra cuando ha sido previamente demostrado que la variación de espécimen y espécimen en ancho y espesor es menos del 1 %.

Tomar el ancho de especímenes producidos por el dado tipo IV como la distancia entre los ejes cortados del dado en la sección angosta.

Coloque el espécimen en las muelas de la máquina de prueba, teniendo en cuenta de alinear el eje largo del espécimen y las muelas con una línea imaginaria juntando los puntos de unión de las muelas de la máquina. La distancia entre los finales de las superficies de sujeción, cuando se usa especímenes de fallas, será la especificada en la Figura 3.10.

Reporte

Reportar la siguiente información:

- Complete la identificación del material probado, incluyendo el tipo, fuente, código numérico del fabricante, forma, dimensiones principales, historia previa, etc.,
- Método de preparación de los especímenes de pruebas,
- Tipo de espécimen de prueba y dimensiones,
- Condicionamiento de procedimiento usado,
- Condiciones atmosféricas en el cuarto de pruebas,
- Número de especímenes a ser probados
- Velocidad de prueba,
- Clasificación del extensómetro usado. Una descripción de técnica de medición y cálculos empleados en lugar del sistema de extensómetro Clase C,
- Fuerza de tensión a la cedencia o al quiebre, valor promedio y desviación estándar,
- Esfuerzo de Tensión a la cedencia o al quiebre, si es aplicable, valor promedio y desviación estándar,
- Porcentaje de elongación a la cedencia o al quiebre, o esfuerzo nominal al quiebre, o los tres, son aplicables, valor promedio y desviación estándar,

- Módulo de elasticidad o módulo secante, valor promedio y desviación estándar,
- Si es medido, tasa de Poisson, valor promedio, desviación estándar y afirmación si hay proporcionalidad con el rango de tensión,
- Dato de prueba, y
- Revisión de datos de método de Prueba D 638.

3.4.2. Resistencia al Impacto ASTM D-256

Estos métodos de pruebas cubren la determinación de la resistencia de los plásticos a tipo de péndulos-martillos estandarizados, montados en máquinas estandarizadas, de especímenes estándar fracturados con una oscilación del péndulo. Las pruebas estándares para estos métodos de pruebas requieren especímenes hechos con una hendidura aserrada. En los métodos de prueba A, C, y D, la hendidura produce una concentración de esfuerzos que incrementa la probabilidad de una fractura, más bien dúctil, vidriosa.

Los resultados de todos los métodos son reportados en términos de energía absorbida por unidad de ancho de espécimen o por unidad de área transversal bajo la hendidura.

Tipos de pruebas

En el Método de prueba A, el espécimen es sostenido como una viga en cantiliver vertical y es rota mediante una simple oscilación del péndulo. La línea de contacto inicial está a una distancia fijada desde el sujetador del espécimen y desde el centro de la hendidura y en la misma cara de la hendidura.

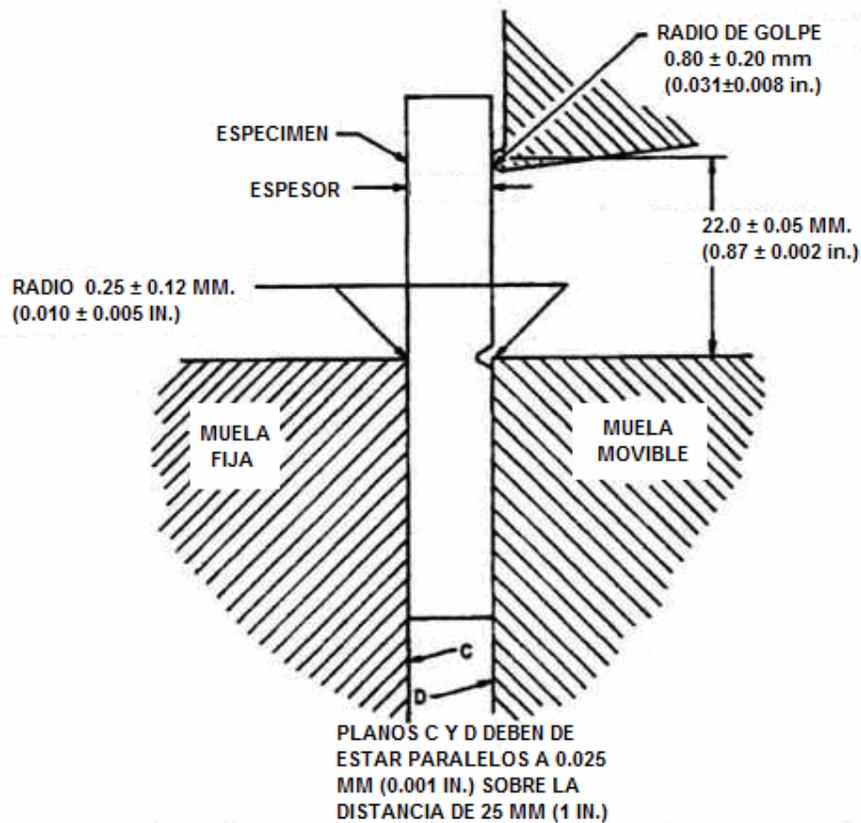


FIGURA 3.12. RELACIÓN DEL TORNILLO DE SUJECIÓN, ESPÉCIMEN, Y BORDE DE IMPACTO ENTRE SÍ PARA MÉTODOS DE PRUEBAS IZOD A Y C

Significado y uso

Antes de proceder con los métodos de prueba, una breve referencia puede ser hecha a la especificación del material que será probado. Cualquier preparación del espécimen de prueba, condicionamiento, dimensiones y parámetros de prueba cubiertos en las especificaciones de los materiales pueden tomarse con anterioridad sobre aquellos mencionados en estos métodos de pruebas. Si no hay especificaciones del material, entonces se aplican condiciones por default.

Las pruebas de impacto del péndulo indican la energía para romper un espécimen de prueba estándar de un tamaño específico bajo parámetros estipulados de montaje, ranurado y velocidad de impacto del espécimen. La energía perdida por el péndulo durante la rotura del espécimen es la suma de:

- Energía para iniciar la fractura del espécimen
- Energía para propagar la fractura a través del espécimen.
- Energía para lanzar el extremo o extremos libres del o de los especímenes rotos.
- Energía para curvar el espécimen
- Energía para producir vibración en el brazo del péndulo

- Energía para producir vibración libre o movimiento horizontal en la armadura o en la base de la máquina.
- Energía para superar la fricción en el rodamiento del péndulo y en el mecanismo indicado, y superar el arrastre de aire del péndulo.
- Energía para deformar plásticamente al espécimen en la línea de impacto y
- Energía para superar la fricción causada por el roce del golpeador (u otra parte del péndulo) sobre la cara de la inclinación del espécimen.

El tipo de falla para cada espécimen será grabado o anotado como uno de las cuatro categorías listadas como siguen:

- C= Rompimiento completo.- un rompimiento donde el espécimen se separa en dos o más piezas.
- H= Rompimiento tipo Bisagra.- un rompimiento incompleto, como que una parte del espécimen no puede soportarse a si mismo sobre la horizontal cuando la otra parte es sostenida verticalmente (menos que 90° incluido el ángulo).
- P= rompimiento Parcial.- Un rompimiento incompleto que no entra en la definición del rompimiento tipo Bisagra, pero tiene fracturado al menos 90% de la distancia entre el vértice de la hendidura y el lado opuesto.

- NB= No rompimiento.- Un rompimiento incompleto donde la fractura se extiende menos del 90% de la distancia entre el vértice de la hendidura y el lado opuesto.

Prueba de la viga en cantiliver – Método de Prueba A

Aparatos

La máquina consistirá de una base maciza en la cual es montado un tornillo de sujeción para agarrar al espécimen y al cual será conectado, a través de una armadura rígida y rodamientos, un martillo tipo péndulo. La máquina tiene también que tener un mecanismo para agarrar y lanzar el péndulo y un mecanismo para indicar la energía de rompimiento del espécimen.



FIGURA 3.13. PÉNDULO DE IMPACTO TINIUS OLSEN

El péndulo consistirá de una simple o multi-brazos con un rodamiento en el final y en la cabeza, conteniendo al golpeador, en la otra. El brazo tiene que ser lo suficientemente rígido para mantener el apropiado CLEARANCE y las relaciones geométricas entre las partes de la máquina y el espécimen y para minimizar las pérdidas de energía vibracional que son siempre incluidos en la resistencia al impacto medida. La posición del mecanismo de agarrado y soltado podrá ser tal que la altura vertical de caída del golpeador podrá ser 610 ± 2 mm. [24.0 ± 0.1 in.]. Este producirá una velocidad del golpeador al momento del impacto de aproximadamente 3.5 m [11.4 ft]/s. El mecanismo estará entonces construido y operado que este soltará el péndulo sin impartir la aceleración o vibración a este.



FIGURA 3.14. POSICIONAMIENTO DE UN ESPÉCIMEN EN EL BANCO DE SUJECIÓN

Especímenes de prueba

Los especímenes de pruebas se realizarán conforme a las dimensiones y geometría de la figura, excepto como se modifica en los siguientes puntos. Para asegurar el correcto contorno y condiciones de la hendidura especificada, todos los especímenes serán hechos de acuerdo a lo indicado a continuación.

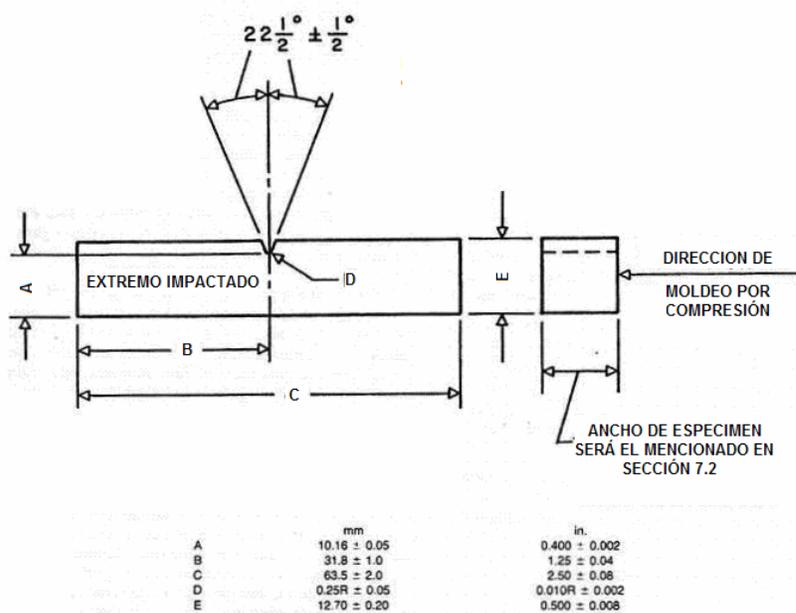


FIGURA 3.15. DIMENSIONES DE UN ESPÉCIMEN DE PRUEBA TIPO IZOD

Estudios han mostrado que, para algunos materiales, la localización de la hendidura en el espécimen y la longitud del impacto final pueden tener un efecto ligero en la medida de resistencia al impacto. Por consiguiente, a menos que sea especificada de otra forma, medidas de cuidado deben ser tomadas para asegurar que el espécimen esté hecho con las dimensiones

mostradas en la figura 3.15 y que esté posicionado como se muestra en la figura 3.14.

Hendidura de los especímenes

La hendidura será realizada en una máquina moledora, en un torno o en otra máquina herramienta apropiada. La velocidad de recorrido y la velocidad de corte serán constantes a lo largo de la operación. Para este caso es recomendado usar un líquido o gas refrigerante para el enfriamiento del espécimen. Pero de preferencia se puede usar sierras debido a la comodidad de corte del perfil del espécimen y además por ser un corte suavizado en comparación a los otros métodos.

El perfil de los dientes de corte serán como producir una hendidura del contorno y la profundidad en el espécimen de prueba. El ángulo de la hendidura será de $45 \pm 1^\circ$ con un radio de curvatura en la cúspide de 0.25 ± 0.05 mm [0.010 ± 0.002 in].

Condicionamiento

Los especímenes de prueba deberán estar a $23 \pm 2^\circ$ C [$73 \pm 3.6^\circ$ F] y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa por no menos de 40 horas antes de hacer la hendidura y previo a la prueba en concordancia con el Procedimiento A de la Práctica D618, a menos que este pueda ser documentado (entre el

proveedor y el cliente) que un tiempo de acondicionamiento más corto es suficiente para un material dado para alcanzar el equilibrio de resistencia de impacto.

Procedimiento

Al menos 5 y preferiblemente 10 o más determinaciones individuales de resistencia al impacto deberán ser realizadas de cada muestra a ser probada bajo las condiciones de prueba, mencionadas anteriormente.

Si la máquina está equipada por un sistema indicador digital, seguir las instrucciones del fabricante para corregir la fricción y el windage. Si fricción excesiva es indicada, la máquina será ajustada antes de comenzar la prueba. Medir y anotar el espesor de cada espécimen después de realizar la hendidura cercanamente a 0.025 mm [0.001 in]. Medir el espesor en un lugar adyacente a la muesca centrada sobre el plano antes de fracturar.

Medir y anotar la profundidad del material restante en el espécimen bajo la hendidura de cada espécimen cercanamente a 0.025 mm [0.001 in]. El espécimen estará aproximadamente vertical entre los yunques. Posicionar el espécimen precisamente de manera que quede rígido pero no apretado, agarrado en el tornillo de sujeción. Poner especial atención de asegurarse que el “extremo impactado” del espécimen como se muestra en la figura 3.12 es el extremo proyectado sobre el tornillo de sujeción. Suelte el péndulo y

anote la energía de quiebre indicada del espécimen junto con una descripción de la apariencia del espécimen roto.

Reporte

Reportar la siguiente información:

- El método de prueba usado (Método A, B, C, D o E),
- Completar la identificación del material probado, incluyendo fuente, número de código del fabricante e historia previa,
- Una descripción de cómo fueron preparados los especímenes, la condiciones de uso utilizadas, el número de horas en que los especímenes fueron condicionados después de hacer la hendidura o muesca,
- La capacidad del péndulo en Joules,
- El espesor y profundidad bajo la hendidura de cada espécimen probado,
- El número total de especímenes probados por muestra de material,
- El tipo de falla
- La resistencia al impacto debe ser reportada en J/m; la unidad opcional de kJ/m² también pueden ser requeridas,
- El número de aquellos especímenes que resultaron en fallas que se encuentran en una de las categorías de requerimientos,

- La resistencia al impacto promedio y desviación estándar (en J/m²) para aquellos especímenes en cada categoría de falla, excepto cuando no se rompe,
- El porcentaje de especímenes que fallaron en cada categoría subfijada por el correspondiente código en letra.

3.4.3. Índice de Fluidez (Melt Flow Index) ASTM D1238

Estos Métodos de pruebas cubren mediciones de la tasa de extrusión de resinas fundidas a través de un dado de una longitud y diámetro específico bajo condiciones prescritas de temperatura, carga, y posición de pistón en el barril, así como la medición cronometrada del tiempo de salida de cierta longitud de material fundido.

El Procedimiento A es una operación manual de corte basada en el tiempo usado para materiales que tienen tasas de flujo aproximadas entre 0.15 y 50 g/10 min. El Procedimiento B es una medición de la tasa de flujo cronometrada automáticamente usada para materiales con flujos desde 0.50 hasta 900 g/10 min. Mediante ambos procedimientos, la carrera del pistón es generalmente la misma durante la medición cronometrada; el pie del pistón está entre 46 y 20.6 mm (1.81 y 0.81 in.) sobre el dado.

Los valores expuestos en unidades SI serán considerados como estándar. Los valores en paréntesis serán dados solo por información.

Significado y uso

Este método de prueba es particularmente útil para pruebas de control de calidad en termoplásticos.

Este método sirve para indicar la uniformidad de la tasa de flujo de polímero asemejando que fue fabricado mediante un proceso individual y, en este caso, puede ser indicativo de uniformidad de otras propiedades. Sin embargo, la uniformidad de la tasa de flujo entre varios polímeros como si fueran hechos mediante varios procesos no pueden, en ausencia de otras pruebas, indicar uniformidad de otras propiedades.

La tasa de flujo obtenida con el plastómetro de extrusión no es una propiedad fundamental del polímero. Este es un parámetro definido empíricamente, críticamente influenciado por las propiedades físicas y estructura molecular del polímero y las condiciones de medición.

Las características reológicas de mezclas de polímeros dependen de un cierto número de variables.

Aparato

Plastómetro.- El aparato será un plastómetro de pistón de peso muerto consistente de un cilindro de acero calentado y controlado termostáticamente, con un dado en la parte más baja y un pistón pesado operando dentro del cilindro.

Cilindro.- el cilindro de acero tendrá un diámetro de 50.8 mm (2 in.), 162 mm (6 3/8 in.) en longitud con un agujero recto de diámetro 9.5504 ± 0.0076 mm (0.3760 ± 0.0003 in.), desplazado 4.8 mm (3/16 in.) desde el eje del cilindro. Los agujeros para un sensor térmico (termorregulador, termistor, etc.) y un termómetro estarán provistos según lo indicado en la figura 3.16.

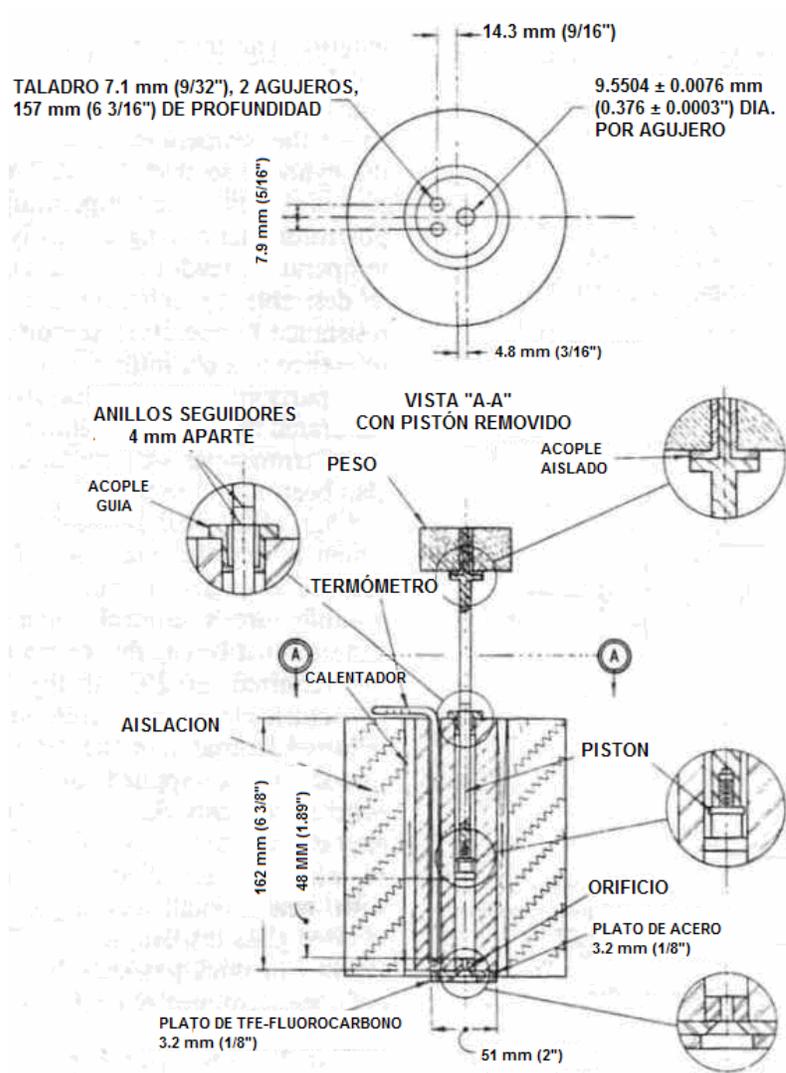


FIGURA 3.16. ARREGLO GENERAL DEL PLASTÓMETRO DE EXTRUSIÓN

Un plato de 3.2 mm (1/8 in.) será añadido al final del cilindro para retener el dado. Un agujero en este plato, centrado bajo el dado y avellanado desde abajo, permitiendo el libre paso de lo extruido. El cilindro puede ser soportado por al menos dos tornillos de alta dureza de 6.4 mm (1/4 in.) en la parte superior (posicionado radialmente en ángulos rectos con respecto a las

cargas aplicadas) o por al menos dos barras roscadas de 10 mm de diámetro dentro del lado del cilindro para añadirlo a un soporte vertical. Las dimensiones esenciales para un cilindro satisfactorio están mencionadas en la figura 3.16. El perforado del cilindro deberá ser acabado por técnicas conocidas para producir aproximadamente 12 rms o mejor, en concordancia con la norma ANSI B46.1.

Dado.- el exterior del dado de acero tendrá como un diámetro tal que este caiga libremente al final del agujero de 9.5504 mm (0.3760 in.) de diámetro en el cilindro. El dado tendrá un taladrado recto y fino de 2.0955 ± 0.0051 mm (0.0825 ± 0.0002 in.) de diámetro y tendrá 8.000 ± 0.025 mm (0.315 ± 0.001 in.) de longitud. El taladrado y su acabado son críticos. Este no tendrá marca visible de perforado u otra marca de herramientas y no tiene que tener excentricidad detectable. El taladrado del dado será finalizado por técnicas conocidas para producir aproximadamente 12 rms o mejor en concordancia con la ANSI B46.1.

Espécimen de Prueba

El espécimen de prueba puede ser en cualquier forma que puede ser introducida en la hueco del cilindro, por ejemplo, polvo, gránulos, strips o film, o slugs moldeados. Esto puede ser deseable para preformar o peletizar un polvo.

Condiciones

Muchos materiales termoplásticos no requieren preparación previa a la prueba.

Condiciones de procedimiento

Condiciones estándar de prueba están dadas en la tabla 1. El sistema alfabético usado previamente para designar las condiciones de prueba son mostradas en la Figura 3.17, solo para referencia. Las condiciones de prueba son mostradas así: Condición ___ / ___, donde la temperatura es en grados Celsius es mostrada primero, seguida por el peso en kilogramos.



Tabla 1 Condiciones de prueba de Temperatura y Carga estándar

Condición		Temperatura, °C	Carga total incluida incluido el pistón, kg	Presión Aproximada	
Solo para referencia	Designación Estándar			kPa	psi
A	125/0.325	125	0.325	44.8	6.5
B	125/2.16	125	2.16	298.2	43.25
C	150/2.16	150	2.16	298.2	43.25
D	190/0.325	190	0.325	44.8	6.5
E	190/2.16	190	2.16	298.2	43.25
F	190/21.60	190	21.60	2982.2	432.5
G	200/5.0	200	5.0	689.5	100.0
H	230/1.2	230	1.2	165.4	24.0
I	230/3.8	230	3.8	524.0	76.0
J	265/12.5	265	12.5	1723.7	250.0
K	275/0.325	275	0.325	44.8	6.5
L	230/2.16	230	2.16	298.2	43.25
M	190/1.05	190	1.05	144.7	21.0
N	190/10.0	190	10.0	1379.0	200.0
O	300/1.2	300	1.2	165.4	24.0
P	190/5.0	190	5.0	689.5	100.0
Q	235/1.0	235	1.0	138.2	20.05
R	235/2.16	235	2.16	298.2	43.25
S	235/5.0	235	5.0	689.5	100.0
T	250/2.16	250	2.16	298.2	43.25
U	310/12.5	310	12.5	1723.7	250.0
V	210/2.16	210	2.16	298.2	43.25
W	285/2.16	285	2.16	298.2	43.25
X	315/5.0	315	5.0	689.5	100.0

FIGURA 3.17. TABLA DE CONDICIONES, TEMPERATURA Y CARGA ESTÁNDAR PARA LA PRUEBA ASTM D1238

Si más de una condición es usada y el material es polietileno, la determinación del Radio de tasa de Flujo (FRR) ha sido encontrada muy útil. FRR es un número adimensional derivado mediante la división entre la tasa de Flujo en condiciones de 190/10 y la tasa de flujo a condiciones de 190/2.16. ⁽¹⁾⁽²⁾

Procedimiento

- Chequee el dado, el cilindro y las dimensiones de posición
- Refiérase a la tabla 1 para selección de condiciones de temperatura y carga en concordancia con las especificaciones del material.
- Fije la temperatura del plastómetro como la requerida para el material que será probado y con el voltaje aplicado a los calentadores como está detallado en la norma.
- Asegure que el agujero del plastómetro de extrusión está apropiadamente alineado en la dirección vertical.

Nota (1).- cuando se determina dicho radio de tasas de flujos para un material a la misma temperatura bajo diferentes cargas, ha sido determinado que la precisión es maximizada cuando un operador usa el Procedimiento (A o B), el mismo plastómetro, y el mismo dado para ambas mediciones (el dado no necesita ser removido del plastómetro entre las 2 determinaciones).

Nota (2).- la sensibilidad a la humedad puede significativamente influenciar los resultados de tasa de flujo para algunos materiales.

- Limpie el aparato a fondo previamente para cada prueba. La posición del pistón y el dado en el cilindro se deben asentar firmemente en la base del plato. Mantenga la temperatura por al menos 15 minutos antes de empezar la prueba. Cuando el equipo sea usado repetidamente, no será necesario calentar el pistón y el dado por 15 minutos.
- Coloque el pistón cargado en su lugar, y de inicio al reloj o el precalentamiento.
- Una vez colocado el pistón cargado, estar atento a que la alarma programada suene para cortar una porción del material.
- Las próximas alarmas serán continuas, por lo tanto, se obtendrá porciones de material fundido del mismo peso. En cada una de las alarmas cortar las porciones indicadas.
- Descargar cualquier resina remanente y limpie el dado y el cilindro.

Reporte

Reportar la siguiente información:

- Informe indicando la forma normal y física del material cargado al cilindro
 - Temperatura y carga a la cual la prueba fue realizada será reportada.
- Los resultados y las condiciones de la prueba pueden ser referidas tal

como las condiciones FR, donde la designación estándar para la condición de la Tabla 1 es mostrada.

- Tasa de flujo reportado así como la tasa de extrusión en gramos/10 minutos.
- Procedimiento usado (A o B)
- Cualquier comportamiento inusual de los especímenes de pruebas así como la decoloración, pegajoso, superficie irregular del extruido o rugosidad, etc.
- Detalles de condicionamiento, si la hubiera.

3.4.4. Temperatura de ablandamiento (VICAT) ASTM D1525

Este método de prueba cubre la determinación de la temperatura a la cual una penetración especificada de una aguja ocurre cuando un espécimen es sujeto a condiciones de prueba específicas. Este método de prueba es útil para muchos materiales termoplásticos.

Este método de prueba no es recomendado para etilcelulosa, polivinil cloruro no rígido, poli vinilidene cloruro, u otros materiales teniendo un amplio rango de ablandamiento VICAT.

Los valores establecidos en unidades SI serán considerados como estándar. Los valores dados en paréntesis son solo para información.

Terminología

Punto de Ablandamiento VICAT.- la temperatura a la cual una aguja de acabado llano de 1 mm² de sección transversal circular penetrará un espécimen termoplástico a una profundidad de 1 mm bajo una carga especificada usando una tasa de incremento uniforme de temperatura seleccionada.

Sumario de Método de Prueba

Una aguja de acabado llano cargada con una masa específica es localizada en contacto directo con el espécimen de prueba. El espécimen y la aguja son calentados a dos tasas permisibles:

Tasa A.- $50 \pm 5^\circ \text{C/h}$

Tasa B.- $120 \pm 12^\circ \text{C/h}$

La temperatura a la cual la aguja ha penetrado a una profundidad de 1 mm es grabada como la Temperatura de ablandamiento VICAT. ⁽³⁾

Nota 3.- Tasa A puede ser usada para conformar ambos el Procedimiento Recomendado ISO R306 y previas ediciones de este método de prueba.

Uso y significado

Los datos obtenidos mediante este método de prueba pueden ser usados para comparar las cualidades de ablandamiento al calor de materiales termoplásticos.

Este método es útil en las áreas de control de calidad, desarrollo y caracterización de materiales.

Aparato

El equipo será construido esencialmente como está mostrado en la figura y consistirá de lo siguiente:

Baño de inmersión.- El baño para líquido de transferencia de calor con agitador, termómetro y calentadores. Los calentadores deberían tener controles para permitir un control manual o automático de la tasa de incremento de la temperatura del baño.

Líquido de Transferencia de calor.- Algunos líquidos, como aceites de silicona, glicerina, etilen glicol y aceite mineral, han sido usados eficazmente para varios plásticos. El líquido usado será conocido por no tener efecto de corta duración a elevadas temperaturas en los materiales que será probados, y tendrán una baja viscosidad a temperatura ambiente.

Soporte del espécimen.- Un soporte apropiado para el espécimen será localizado en el baño. Los miembros verticales que adhieren el soporte del espécimen a la parte superior serán hechos de un material teniendo el mismo coeficiente de expansión así como el usado para la barra sobre la cual la carga es aplicada en orden que la lectura del dial gage causada por la expansión diferencial sobre el rango de temperatura proyectada no exceda 0.02 mm cuando el espécimen es reemplazado por un pieza de material resistente al calor.

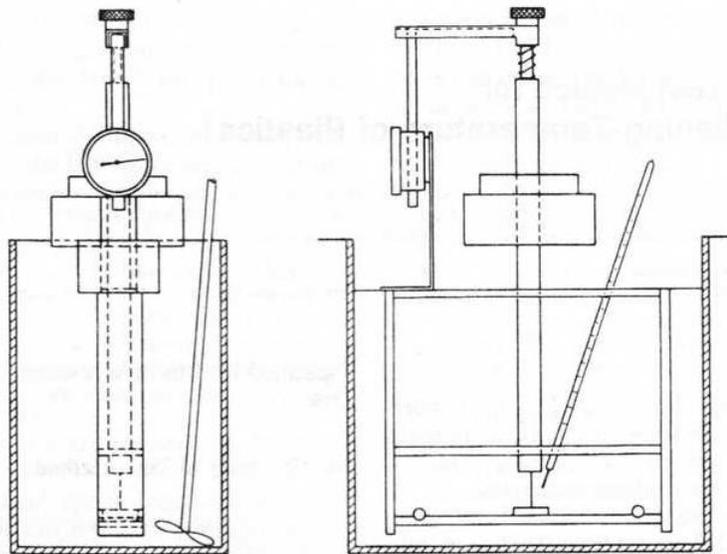


FIGURA 3.18. APARATO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO

Dispositivo de Medición de Penetración.- permitido para medición de profundidad de penetración de al menos 1 mm. El dispositivo de medición debe ser un dial gage u otro dispositivo de indicación o de grabación que

incluya un aparato sensor electrónico de desplazamiento que es capaz de medir diferencias de 0.01 mm (0.0005 in) o mejor.

Pesos.- Una gama de pesos de tamaños permitidos de manera que la carga neta en la punta de la aguja sea igual a 1000, +40, - 0 g, cuando el aparato es ensamblado. La carga consistirá del peso de la barra aguja, la carga (si hubiera) provocada por el resorte del indicador de penetración, y el peso extra será aplicado al ensamble de la barra para balancearlo, si es requerido.

Dispositivo de medición de temperatura.- Una termocupla o termómetro adecuado para cubrir el rango a ser probado. El termómetro tendrá algo de lo siguiente, o su equivalente, como se prescribe en la especificación E1; termómetro 1C o 2C, teniendo rangos desde -20 hasta 150° C, o -5 a 300° C, respectivamente, dependiendo del rango a probar. La termocupla y equipos electrónicos relacionados tendrán una certeza de al menos $\pm 0.5^\circ \text{C}$.

Aguja.- Acabado llano, sección transversal circular de $1, + 0.05, - 0.02 \text{ mm}^2$ con la punta llana libre de rebabas y en ángulo recto al eje de la barra aguja. Cable de acero inoxidable, diámetro $1.143 \pm 0.025 \text{ mm}$ ($0.045 \pm 0.001 \text{ in.}$), es permitido y sugerido para las agujas. La longitud será de 5 a 12.5 mm.

Especímenes de prueba

Use al menos dos especímenes para probar cada muestra. El espécimen será llano y tendrá un ancho mínimo de 12 mm (0.50 in.) y un espesor mínimo de 3 mm (0.12 in). Cuando sea necesario, las dos capas del material que serán probadas pueden ser apiladas para mejorar el espesor mínimo. Los especímenes pueden ser cortados desde hojas o material moldeado.

Procedimiento

- Comenzar la prueba a temperatura ambiente. ⁽⁴⁾⁽⁵⁾
- Coloque el espécimen, el cual está a temperatura ambiente, en el soporte del espécimen de manera que esté aproximadamente centrado bajo la aguja, y un poco debajo de la barra de la aguja (sin el peso adicional) de manera que la aguja descansa en la superficie del espécimen y mantenga esta en posición.

Nota 4.- Métodos de determinación del empuje aportado por el resorte del indicador de penetración (dial gauge) son dados en el Apéndice del Método de prueba D 648.

Nota 5.- Es deseable tener un enrollamiento de enfriamiento en el baño del líquido en orden de reducir el tiempo requerido para bajar la temperatura de determinaciones previas. Esto puede ser removido o drenado antes de comenzar la prueba como la ebullición del refrigerante pueda afectar la tasa de incremento de temperatura.

- La vulva del termómetro o la termocupla deberá estar tan próxima como sea posible al espécimen. El baño debe estar bien revuelto.
- Cuidadosamente bajar el ensamble en el baño, teniendo cuidado de no chocar de ninguna manera que pueda dañar el espécimen. Aplicar la carga, fijar el indicador de penetración en cero, y empieza el incremento de temperatura. La tasa de incremento de temperatura será $50 \pm 5^\circ \text{ C/h}$ (Tasa A) o $120 \pm 12^\circ \text{ C/h}$ (Tasa B) y permanece uniforme a lo largo de la prueba. La tasa A de tasa de calentamiento será considerado para ser encontrado si sobre cada intervalo de 12 minutos durante la prueba, la temperatura del baño se incrementa $10 \pm 1^\circ \text{ C}$ en cada lugar del espécimen. Tasa B será considerada para ser encontrada si sobre cada intervalo de 5 minutos durante la prueba, la temperatura del baño se incrementa $10 \pm 1^\circ \text{ C}$ en cada lugar del espécimen. Selección de la tasa será como lo acordado por los interesados.
- Grabar la temperatura cuando el indicador lea una penetración de 1 mm. Deberá de tener cuidado con la lectura de 1 mm desde la penetración porque se incrementará rápidamente a ese punto.

Reporte

Reportar la siguiente información:

- Completar identificación del material probado.

- Método de preparación del espécimen de prueba.
- Tasa de incremento de temperatura, Tasa A, 50° C/h, o tasa B, 120° C/h.
- Temperatura de ablandamiento, ° C, promedio de 2 valores.
- Líquido de transferencia de calor usado, y
- Espesor de espécimen probada e indicar cuando dos capas son usadas.

CAPÍTULO 4

4. DISCUSION Y RESULTADOS

Una vez especificados los procedimientos en la sección anterior se procederá a realizar las operaciones necesarias para la evaluación con las normas respectivas.

4.1 Resistencia y Módulo a la tracción ASTM D638

Luego de haber preparado las placas en la prensa, se requiere trabajar con las probetas como se encuentran especificadas en la norma, así lo indica la figura 3.10.

Para efectuar el diseño de las probetas como lo indica la norma, se procede a perfilar las placas en la Troqueladora manual Marca Rayran (figura 4.1).



FIGURA 4.1. TROQUELADORA MANUAL

Dicho procedimiento se lo realiza calentando un poco la placa y calentando también el molde que servirá para hacer el modelo de probeta que se utilizará, como lo indicado en la figura 4.2.



FIGURA 4.2. PROBETA TROQUELADA DE ACUERDO A LA NORMA ASTM D638

Posteriormente, se realizan las pruebas de tensión respectivas.



FIGURA 4.3. UNA PROBETA ENSAYADA EN EL TENSÓMETRO QTEST I

Para las mezclas de 10% virgen y 90% reciclado de post-consumo de polietileno de alta densidad se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la tabla 10.

TABLA 10

MEZCLA DE 10% VIRGEN Y 90% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD A

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm²]	% Elongación a la ruptura
3,17	306,46		
3,17	296,54	201,59	40
3,17	306,81	305,75	16
3,4	252,5	239,77	12
3,73	229,11		
4,01	237,13	236,14	14

En la tabla 10 se puede apreciar el número de ensayos que se efectuaron con las probetas, en total 6 por mezcla, y los distintos valores que se obtuvieron. Se observa que a medida que aumenta el espesor de la probeta el esfuerzo máximo disminuye. De las tablas se pueden apreciar que existen celdas que se encuentran marcadas con color plomo, esto se debe a que el tensómetro no obtuvo dichos valores de la probeta expuesta a la prueba. El esfuerzo de cedencia es similar al esfuerzo máximo, esto quiere decir que el material pasado este valor límite ya no recuperará su forma original, y por consiguiente, pasa a la zona plástica. A continuación se exponen los datos obtenidos para los otros porcentajes.

TABLA 11

MEZCLA DE 20% VIRGEN Y 80% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD A

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm²]	% Elongación a la ruptura
3,61	252,93		
3,4	258,44	76,34	36
3,91	247,6	99,21	66
3,35	257,33	145,77	32
3,81	246,23		
3,71	242,06	213,54	25

TABLA 12

MEZCLA DE 30% VIRGEN Y 70% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD A

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm²]	% Elongación a la ruptura
4,01	220,31	87,31	23
3,91	237,1		
3,61	244,2		
3,45	238,04		
3,51	244,7		
3,76	241,93		

TABLA 13

MEZCLA DE 40% VIRGEN Y 60% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD A

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación a la ruptura
4,11	235,64		
3,51	245,5		
3,91	234,74		
3,51	247,9		
4,01	234,74	83,67	24,1
3,71	242,21		

También se puede apreciar como fluctúa el valor del esfuerzo máximo en cada prueba, no mantiene un rango específico, esto es claramente observable en la mezcla 10-90 cuyos valores fluctúan desde 229 hasta 306 Kg/cm², Este comportamiento mecánico de las mezclas es ocasionado debido al deficiente proceso de selección del material reciclado molido que se utilizó, se encontraron porciones de otros tipos de plásticos insertados en las probetas como se puede observar en la figura 4.4. Este problema se observó también en otras mezclas por lo cual pudo constatar las deficiencias en los procesos usados en la industria del reciclaje de plásticos en Guayaquil.



FIGURA 4.4. PROBETA ENSAYADA CON PLÁSTICO DESCONOCIDO EN SU INTERIOR

Una vez expuestos los valores por ensayo y por cada porcentaje de mezcla, se procederá a exponer los valores promedios en la tabla 14.

TABLA 14

VALORES PROMEDIOS DE ENSAYO DE TENSIÓN

Porcentaje de Mezclas	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]
10%-90%	271,43
20%-80%	250,77
30%-70%	237,71
40%-60%	240,12

De la tabla 14 se puede observar como varia el valor de 271.43 hasta 240.12 Kg/cm², debido a que la inclusión de mayores porcentajes de material reciclado hace que las propiedades mecánicas del material resultante sean afectadas.

Ahora se procederá a evaluar la mezcla de material virgen y de reciclado de Petrothene; las condiciones de ensayo y condiciones de elaboración de las probetas fueron las mismas que el caso anterior. A continuación se observarán los resultados de Esfuerzo máximo y Módulo de Young para los porcentajes de prueba en las mezclas extruidas, desde la tabla 15 hasta la tabla 18.

TABLA 15

MEZCLA DE 10% VIRGEN Y 90% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD B

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm²]
4,29	279,08	20,6	4261,47
4,29	274,36	21,9	2535,06
4,32	276,66	22,3	3089,61
7,01	244,37	22,1	2777,59
6,93	231,97	20,1	2615,07
6,81	236,8	21,5	3013,31

TABLA 16

MEZCLA DE 20% VIRGEN Y 80% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD B

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm²]
3,91	257,09	21,4	1753,59
4,01	253,94	21,2	3179,61
4,09	253,61	20,5	3841,14
3,4	250,35	22,2	2118,21
3,43	253,91	21,9	2216,53
3,45	253,99	20,7	3525,88

TABLA 17

MEZCLA DE 30% VIRGEN Y 70% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD B

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm²]
5	267,74	19,2	3918,00
5,36	245,36	19,3	3862,17
5,23	250,88	19,8	2725,46
4,37	245,89	21,2	3869,27
4,34	247,33	20	4003,80
4,37	251,3	20,1	3775,60

TABLA 18

MEZCLA DE 40% VIRGEN Y 60% RECICLADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD B

Método de prueba de Tensión ASTM-D638			
Espesor [mm]	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm²]
6,05	240,41	19,7	3685,58
6,15	261,32	20,8	3426,16
6,1	250,03	21,8	1684,95
4,39	249,84	19,9	3410,06
4,37	245,63	21,4	3166,53
4,32	251,13	21,6	1740,37

En estos ensayos se puede observar de mejor manera la uniformidad en los datos que se exponen, por ejemplo, en la Mezcla 20-80 se puede observar que los valores varían desde 250 hasta 257 Kg/cm². En cierta forma los valores serán cercanos debido a que el material ha sido recuperado correctamente para su reciclaje. Las mezclas 10-90 y 20-80 tienen valores similares de porcentaje de elongación a la fluencia, valores que fluctúan entre 20.1 hasta 22.3; mientras que también en la máquina Qtest se obtuvo el

porcentaje de elongación a la ruptura pero solo para ciertos valores, como por ejemplo para la mezcla de 20-80, pero por considerarse un valor de diseño solo se presentan los datos relacionados a la fluencia. Como resultado final se muestran los valores promedios de las pruebas realizadas en la tabla 19.

TABLA 19
VALORES PROMEDIOS DE LAS PRUEBAS CON EL RECICLADO
PETROTHENE

Método ASTM D638			
Porcentaje de las mezclas	Esfuerzo máximo [Kg/cm²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm²]
10%-90%	257,21	21,42	3048,69
20%-80%	253,82	21,32	2772,49
30%-70%	251,42	19,93	3692,38
40%-60%	249,73	20,87	2852,27

4.2 Resistencia al Impacto ASTM D256

Para realizar la prueba de Impacto es requerido trabajar con probetas cuyas dimensiones y fabricación se encuentran detalladas en la respectiva norma, lo cual se observa en la figura 3.15.

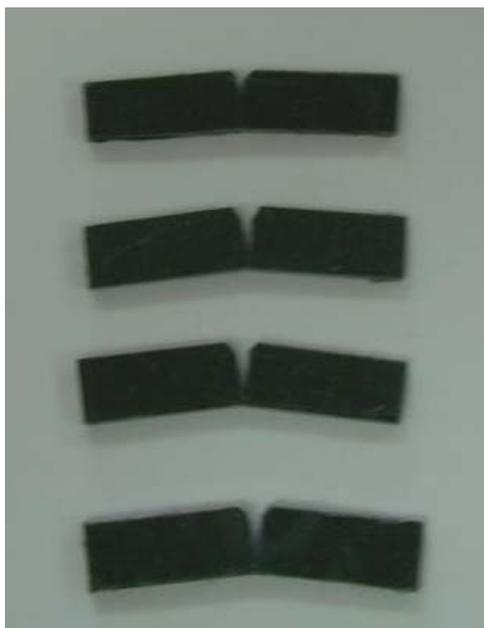


FIGURA 4.5. PROBETAS DIMENSIONADAS SEGÚN LA NORMA ASTM D256

Las pruebas de impacto fueron realizadas, así mismo, para los dos tipos de reciclados que se analizarán, por consiguiente, se mostrarán los datos obtenidos de ambas muestras.

TABLA 20

RESULTADOS PROMEDIOS DE PRUEBAS IZOD REALIZADAS

Método A de Prueba ASTM D256			
Porcentaje de Mezclas	Energía de fractura [J]	Deformación por unidad de longitud [J/m]	Tipo de Ruptura
10%-90%	0,26	71,31	H
20%-80%	0,35	98,70	H
30%-70%	0,35	87,33	H
40%-60%	0,34	83,99	H

Cabe acotar que todas las probetas presentaron una fractura tipo Hinge o bisagra, como se encuentra estipulado en la norma, se debe de mencionar dicha fractura. Se observa de la tabla 20 que la mezcla de 20-80 absorbe más energía que las demás mezclas, teniendo un valor de 98.7 J/m; así también se observa que la energía de fractura es de 0.35 J, lo que indica que es una mezcla un poco más resistente que las demás. Este análisis también se puede observar de igual forma en la figura 4.6.

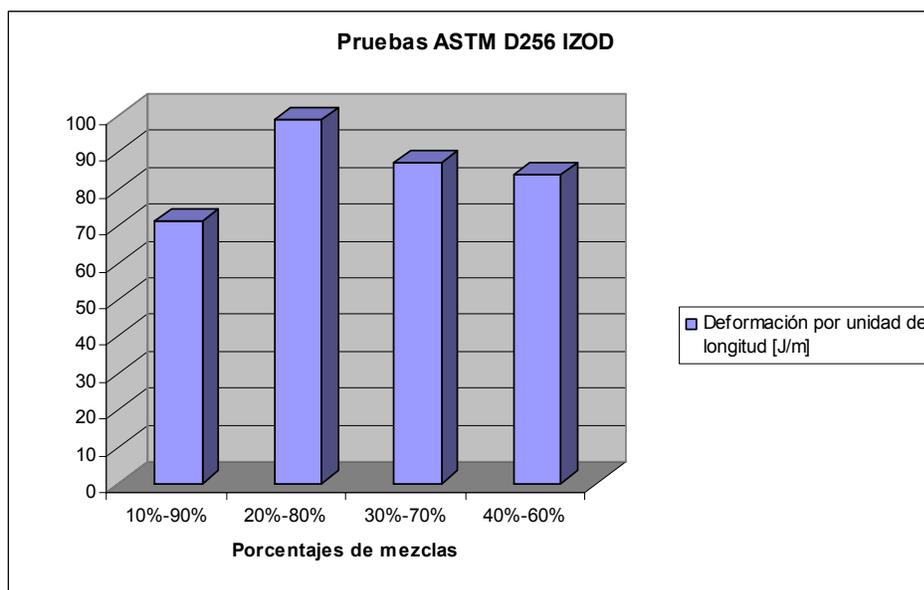


FIGURA 4.6. COMPARACIÓN ENTRE VALORES DE PRUEBAS IZOD EN MEZCLAS DE RECICLADO POST-CONSUMO

Posteriormente se realizaron las pruebas para la mezcla de plástico virgen con el plástico reciclado de Petrothene, con las condiciones de trabajo anterior y estipulado en la norma.

TABLA 21

RESULTADOS PROMEDIOS DE PRUEBAS IZOD REALIZADAS

Prueba ASTM D256			
Porcentaje de Mezclas	Energía de fractura [J]	Deformación por unidad de longitud [J/m]	Tipo de Ruptura
10%-90%	0,478	114	H
20%-80%	0,47875	121,125	H
30%-70%	0,4983	96,97	H
40%-60%	0,4985	108,5	H

Es así que observando la tabla 21 se determina que la mezcla 20-80 tiene una mejor absorción de energía con un valor de 121.13 J/m y 0.48 J.

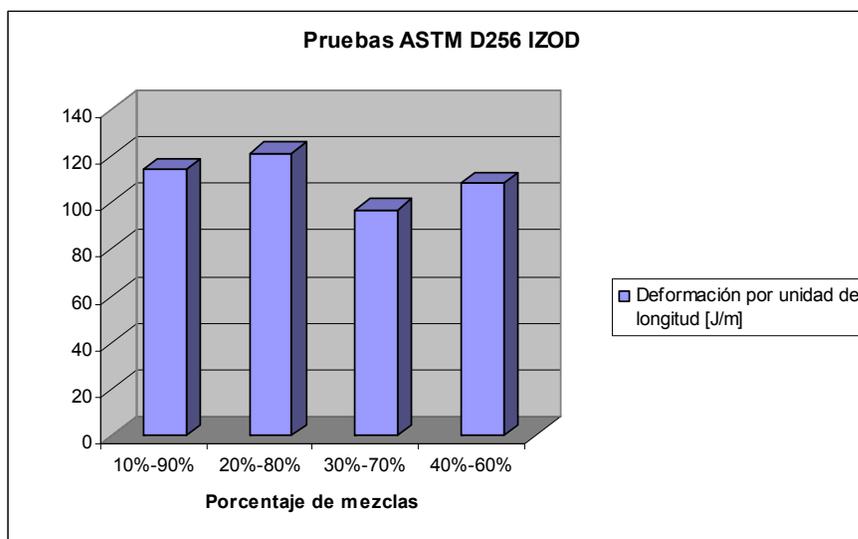


FIGURA 4.7. COMPARACIÓN ENTRE VALORES DE PRUEBAS IZOD EN MEZCLAS DE RECICLADO POST-INDUSTRIAL

Se puede indicar que los valores en todas las pruebas aumentaron de forma considerable con respecto a los datos obtenidos por la prueba de Impacto, valores que subieron de 98.70 a 121.15 KJ/m² en la mezcla de 20-80.

Entonces se puede hablar en el reciclado de Petrothene de una uniformidad general en sus propiedades debido a la presencia de un solo tipo de material, mientras que en el caso de los reciclados de post-consumo la distribución de diferentes materiales causa puntos de inclusión débiles que producen concentraciones de esfuerzo haciendo menos resistentes las mezclas.

4.3 Índice de Fluidez (Melt Flow Index) ASTM D1238

Este método es aplicable para la determinación del Índice de Fluencia, el esfuerzo de corte, viscosidad y densidad de la fundición en condiciones de trabajo de 190° C y con pesos de 2.16 y 10 Kg. Esto permitirá hallar el FRR (Flow Rate Ratio), como se encuentra estipulado en la norma es la relación entre el MFI con 10 Kg y el MFI con 2.16 Kg. En la figura 4.8 se puede observar los resultantes del plastómetro de extrusión, se deben de hacer cortes cuando la máquina haga sonar una alarma y pesar dicho corte, que aproximadamente está entre los 0.34 y 0.35 gramos.



FIGURA 4.8. MUESTRAS DE 0.35 G RESULTANTES DE LA OPERACIÓN EN EL PLASTÓMETRO DE EXTRUSIÓN

En la tabla 22 se muestran los valores de densidad, tasa de corte, viscosidad y MFI obtenidos en el Plastómetro para una carga de 2.16 Kg y en la tabla 23 para una carga de 10 Kg.

TABLA 22

RESULTADOS DE LA PRUEBA ASTM 1238 CON 2.16 KG.

Método de Prueba ASTM 1238				
Porcentaje de mezclas	ρ [g/cm³]	Tasa de corte [s⁻¹]	Viscosidad [Pa-seg]	MFI [g/10 min]
10%-90%	0,776	0,68	28810,68	0,29
20%-80%	0,776	0,55	35616,93	0,23
30%-70%	0,776	0,5475	35791,93	0,23
40%-60%	0,776	0,45	43565,23	0,19

TABLA 23

RESULTADOS DE LA PRUEBA ASTM 1238 CON 10 KG.

Método de Prueba ASTM 1238				
Porcentaje de mezclas	ρ [g/cm³]	Tasa de corte [s⁻¹]	Viscosidad [Pa-seg]	MFI [g/10 min]
10%-90%	0,776	13,67	1437,57	5,80
20%-80%	0,776	10,53	1892,38	4,47
30%-70%	0,776	11,60	1690,60	4,92
40%-60%	0,776	12,51	1250,35	5,31

El FRR nos permite determinar un valor adimensional, n, mostrado en la fórmula 1:

$$\frac{MFI_{10}}{MFI_{2.16}} = \left(\frac{10Kg}{2.16Kg} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

Donde:

MFI_{10} = valor de MFI con carga de 10 Kg.

$MFI_{2.16}$ = valor de MFI con carga de 2.16 Kg.

n = cantidad adimensional

de esta fórmula se despeja n y se determina dicho valor para cada mezcla, así como se observa en la tabla 24. Posteriormente se determina el índice de consistencia del material, k , despejándolo de la fórmula (2):

$$\eta^* MFI = K \left[\frac{\dot{\gamma}}{MFI} \right]^{n-1} \quad (2)$$

Donde:

η = Viscosidad no newtoniana modificada

$\dot{\gamma}$ = Tasa de corte modificada

, en el cual se usará el valor de MFI obtenido con la carga de 2.16 Kg. Los resultados del índice de consistencia se pueden ver en la tabla 24

TABLA 24

RESULTADOS DE VALORES N Y EL ÍNDICE DE CONSISTENCIA K

Porcentaje de mezclas	n	k	
		2,16	10
10%-90%	0,51	12624,06	12687,56
20%-80%	0,52	12532,62	12780,53
30%-70%	0,50	12737,06	12749,61
40%-60%	0,46	13212,38	10531,36

De la tabla 24 se nota de que el índice de consistencia determinado para los valores de carga de 2.16 y 10 Kg es muy cercano en todas las mezclas, teniendo como valor más alto el de 40-60 debido a la presencia de más material virgen. El valor n aparte de ser un valor que es útil para determinar el índice de consistencia, nos permite describir el grado de comportamiento no-newtoniano de un plástico.

Así mismo, con los valores experimentales y con las dimensiones del plastómetro, que son expuestas en la figura 4.9, se puede determinar un valor de MFI teórico.

Constante	Valor
Masa (m,kg)	2.16 , 10
Longitud de barril (L_b ,m)	0.048162
Radio de barril (R_b , m)	0.004775
Largo de capilaridad (L_c , m)	0.008
Radio de capilaridad (R_c , m)	0.001048
Radio de piston (R_p ,m)	0.004737
$\Delta P = mg/\pi * R_p^2$ m=2.16 kg	3.01E+05
m=10 kg	1.39E+06

FIGURA 4.9. CONSTANTES FÍSICAS DEL PLASTÓMETRO DE EXTRUSIÓN

Se procede a aplicar la fórmula (3), todos los valores mostrados en la figura 4.9:

$$Q = \frac{Mg}{8R_p^2\eta} \left[\frac{L_b}{R_b^4} + \frac{L_c}{R_c^4} \left(\frac{\sqrt{6}}{3} \frac{R_c}{L_c + 1} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

Así se procede a determinar el caudal para las cargas de 2.16 y de 10.

Teniendo la fórmula (4) para el peso de 2.16:

$$Q = \frac{0.00012664}{\eta} \quad (4)$$

Y la fórmula (5) para el peso de 10:

$$Q = \frac{0.00058631}{\eta} \quad (5)$$

se reemplaza el valor de viscosidad y se obtiene el caudal, mostrado en la tabla 25.

TABLA 25
VALORES DE CAUDAL CALCULADO

Q				
	10%-90%	20%-80%	30%-70%	40%-60%
2,16	4,40E-09	3,56E-09	3,54E-09	2,91E-09
10	8,81E-08	6,69E-08	7,49E-08	1,75E-08

Posteriormente aplicamos la fórmula (6) para determinar el MI teórico:

$$MI[gr/10min] = Q[m^3 / seg] * \rho_{fund}[g/cm^3] * \frac{(100cm)^3}{1m^3} * \frac{600s}{10min} \quad (6)$$

Con el valor de densidad determinado en la prueba por el Plastómetro de Extrusión y con los valores obtenidos de Q para cada carga se procede a hallar el MI, dando como resultado lo expuesto en la tabla 26:

TABLA 26
VALOR DE MI TEÓRICO

MI teórico				
	10%-90%	20%-80%	30%-70%	40%-60%
2,16	0,20	0,17	0,16	0,14
10	4,10	3,12	3,49	4.72

Si se observa detenidamente los valores de MFI experimental y MFI teórico no están tan lejanos, así se puede observar en la figura 4.10.

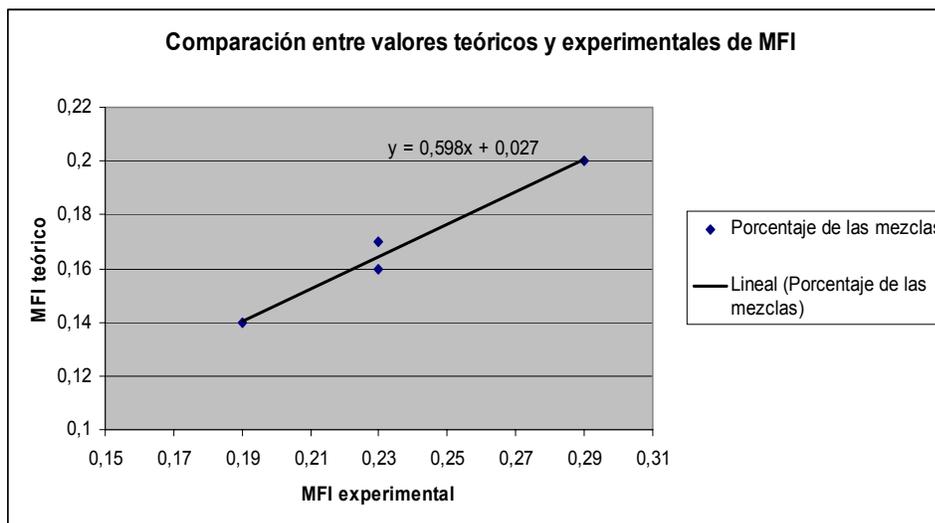


FIGURA 4.10. COMPARACIÓN DE VALORES TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES DE MFI

Los valores de MFI experimentales están un tanto elevados con respecto a los teóricos, también se destaca que los valores de MFI no pasan de 0,29 gr/10 min, que es un valor considerablemente bueno para un material procesado mediante la extrusión. Además esta variación se debe al comportamiento heterogéneo del material reprocesado, como reciclado de post-consumo tiende a variar algunas de sus propiedades, debido a que se desconoce de alguna forma la historia térmica de los materiales que conformaba el reciclado o al tipo de material que conforma el reciclado, por eso se observa esa pequeña diferencia entre los valores teóricos y experimentales.

Ahora se procede a realizar y analizar la Curva Unificada de los Polietilenos, el cual se construye tomando varios valores de tasa de cortante, γ , para posteriormente construir una tabla de η^*MFI y γ/MFI , así como se encuentra estipulado en la referencia 16. A continuación se observan los resultados obtenidos en las tablas siguientes.

TABLA 27

CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 10%-90%

Mezcla 10%-90%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	3473,259048	13,9251523
7	2640,27116	24,3690165
10	2216,90239	34,8128808
20	1578,490141	69,6257615
30	1294,068175	104,438642
40	1123,924597	139,251523
50	1007,514417	174,064404
100	717,3755513	348,128808
150	588,114456	522,193211
300	418,752253	1044,38642
450	343,2989221	1566,57963
600	298,1621139	2088,77285
750	267,2800553	2610,96606
900	244,4374486	3133,15927

TABLA 28

CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 20%-80%

Mezcla 20%-80%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	3197,32317	17,2166428
7	2444,15234	30,1291248
10	2059,56418	43,0416069
20	1476,66143	86,0832138
30	1215,50606	129,124821
40	1058,73321	172,166428
50	951,195371	215,208034
100	681,985797	430,416069
150	561,373006	645,624103
300	402,491884	1291,24821
450	331,309069	1936,87231
600	288,577675	2582,49641
750	259,266213	3228,12052
900	237,541189	3873,74462

TABLA 29

CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 30%-70%

Mezcla 30%-70%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	3067,49076	17,2413793
7	2318,80506	30,1724138
10	1940,0515	43,1034483
20	1371,82357	86,2068966
30	1120,08926	129,310345
40	970,02575	172,413793
50	867,617407	215,517241
100	613,498152	431,034483
150	500,919143	646,551724
300	354,203323	1293,10345
450	289,205802	1939,65517
600	250,459572	2586,2069
750	224,017851	3232,75862
900	204,499384	3879,31034

TABLA 30

CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 40%-60%

Mezcla 40%-60%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	2558,19392	20,9150327
7	1891,00604	36,6013072
10	1559,71719	52,2875817
20	1072,72811	104,575163
30	861,787878	156,862745
40	737,791187	209,150327
50	654,036606	261,437908
100	449,827351	522,875817
150	361,37373	784,313725
300	248,542339	1568,62745
450	199,669211	2352,94118
600	170,94019	3137,2549
750	151,534938	3921,56863
900	137,326675	4705,88235

Con estos datos se grafica la Curva unificada de los polietilenos y se observa entre la curva 10-90 y la curva 20-80 existe relativo paralelismo. El valor n nos revela cual fue el grado de comportamiento newtoniano o no de un fluido, como se observa en la tabla 24 los valores oscilan entre 0.49 y 0.52. La figura 4.11 indica el comportamiento reológico que tiene cada una de las mezclas efectuadas en el laboratorio. Se puede observar como se dispersan las curvas, al no conocer la historia térmica del material que se usó como reciclado, no se conoce, por consiguiente, cual es el estado de las moléculas dentro de ella. Se puede mencionar que existe un entrecruzamiento de las moléculas debido a la degradación, la cual forma cadenas en su interior aumentando así la viscosidad del plástico.

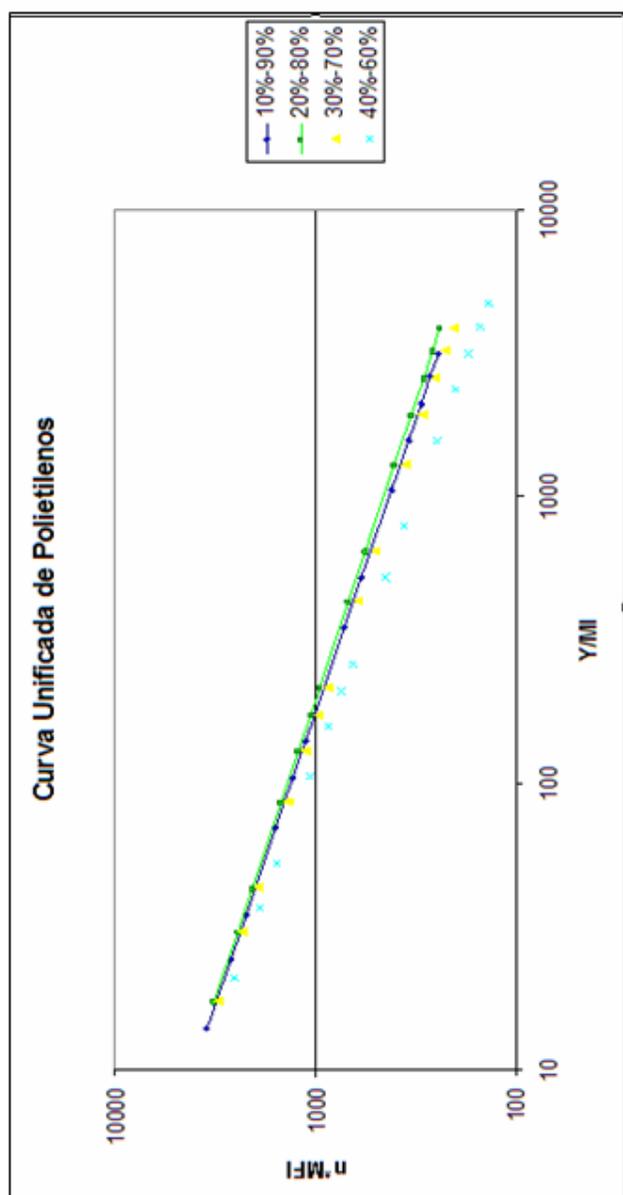


FIGURA 4.11. CURVA UNIFICADA DE LOS POLIETILENOS CON LA MEZCLA DE HDPE RECICLADO DE POST-CONSUMO Y HDPE VIRGEN

Ahora se procederá a evaluar la mezcla de material virgen y de reciclado de Petrothene; las condiciones de ensayo y condiciones de elaboración de las probetas fueron las mismas que el caso anterior.

TABLA 31

RESULTADOS DE LA PRUEBA ASTM 1238 CON 2.16 KG.

Método de Prueba ASTM 1238				
Porcentaje de mezclas	ρ [g/cm³]	Tasa de corte [s⁻¹]	Viscosidad [Pa-seg]	MFI [g/10 min]
10%-90%	0,75	0,65	30137.9	0,27
20%-80%	0,75	0,56	35291.15	0,23
30%-70%	0,75	0,47	38188.23	0,21
40%-60%	0,75	0,37	40929.6	0,19

TABLA 32

RESULTADOS DE LA PRUEBA ASTM 1238 CON 10 KG.

Método de Prueba ASTM 1238				
Porcentaje de mezclas	ρ [g/cm³]	Tasa de corte [s⁻¹]	Viscosidad [Pa-seg]	MFI [g/10 min]
10%-90%	0,75	13,58	1433,75	5.6
20%-80%	0,75	11.57	1729,5	4,77
30%-70%	0,75	11,26	1660,58	4.55
40%-60%	0,75	10,04	1577,40	4.29

Y se vuelven a repetir los cálculos que se realizaron para las pruebas anteriores, a continuación se adjuntan las tablas con los valores que se necesitan determinar.

TABLA 33**RESULTADOS DE VALORES N Y EL ÍNDICE DE CONSISTENCIA K**

Porcentaje de mezclas	n	k	
		2,16	10
10%-90%	0,5	12515,03	12461,53
20%-80%	0,5	12528,55	12790,87
30%-70%	0,5	11897,92	11927,44
40%-60%	0,49	10867,51	10437,62

TABLA 34**VALORES DE CAUDAL CALCULADO**

Q				
	10%-90%	20%-80%	30%-70%	40%-60%
2,16	4,202E-09	3,5884E-09	3,3162E-09	3,0941E-09
10	8,8328E-08	7,3223E-08	7,6263E-08	8,0284E-08

TABLA 35**VALOR DEL MI TEÓRICO**

MI teórico				
	10%-90%	20%-80%	30%-70%	40%-60%
2,16	0,19	0,16	0,15	0,14
10	4,00	3,31	3,45	3,63

De la tabla 35 se observan los datos obtenidos con la ecuación de R-J de MI teórico. Los valores obtenidos experimentalmente son ligeramente mayores a los teóricos, debido seguramente a que el plastómetro de Extrusión está basado en un modelo newtoniano simple. Se prosigue con los cálculos y se obtiene valores de η^*MFI y γ/MFI , presentados en las tablas 36 hasta la 39, para construir la curva unificada de los polietilenos.

TABLA 36
CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 10%-90%

Mezcla 10%-90%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	3279,83	14,81
7	2479,32	25,93
10	2074,35	37,04
20	1466,78	74,07
30	1197,62	111,11
40	1037,17	148,15
50	927,68	185,19
100	655,97	370,37
150	535,59	555,56
300	378,72	1111,11
450	309,23	1666,67
600	267,80	2222,22
750	239,52	2777,78
900	218,66	3333,33

TABLA 37
CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 20%-80%

Mezcla 20%-80%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	3027,14396	17,3913043
7	2288,30575	30,4347826
10	1914,53395	43,4782609
20	1353,77994	86,9565217
30	1105,35669	130,434783
40	957,266973	173,913043
50	856,20561	217,391304
100	605,428793	434,782609
150	494,330539	652,173913
300	349,544477	1304,34783
450	285,40187	1956,52174
600	247,16527	2608,69565
750	221,071338	3260,86957
900	201,809598	3913,04348

TABLA 38
CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 30%-70%

Mezcla 30%-70%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	2739,51609	20
7	2059,32291	35
10	1716,81876	50
20	1205,58866	100
30	980,375865	150
40	846,591406	200
50	755,526582	250
100	530,547718	500
150	431,437518	750
300	302,965106	1500
450	246,369005	2250
600	212,748895	3000
750	189,864254	3750
900	173,005843	4500

TABLA 39
CÁLCULOS OBTENIDOS CON MEZCLA DE 40%-60%

Mezcla 40%-60%		
γ	η^*MFI	γ/MFI
4	2668,78074	21,0526316
7	2006,1504	36,8421053
10	1672,48985	52,6315789
20	1174,4599	105,263158
30	955,062185	157,894737
40	824,732092	210,526316
50	736,018596	263,157895
100	516,848773	526,315789
150	420,297636	789,473684
300	295,142431	1578,94737
450	240,007663	2368,42105
600	207,255637	3157,89474
750	184,961886	3947,36842
900	168,538766	4736,84211

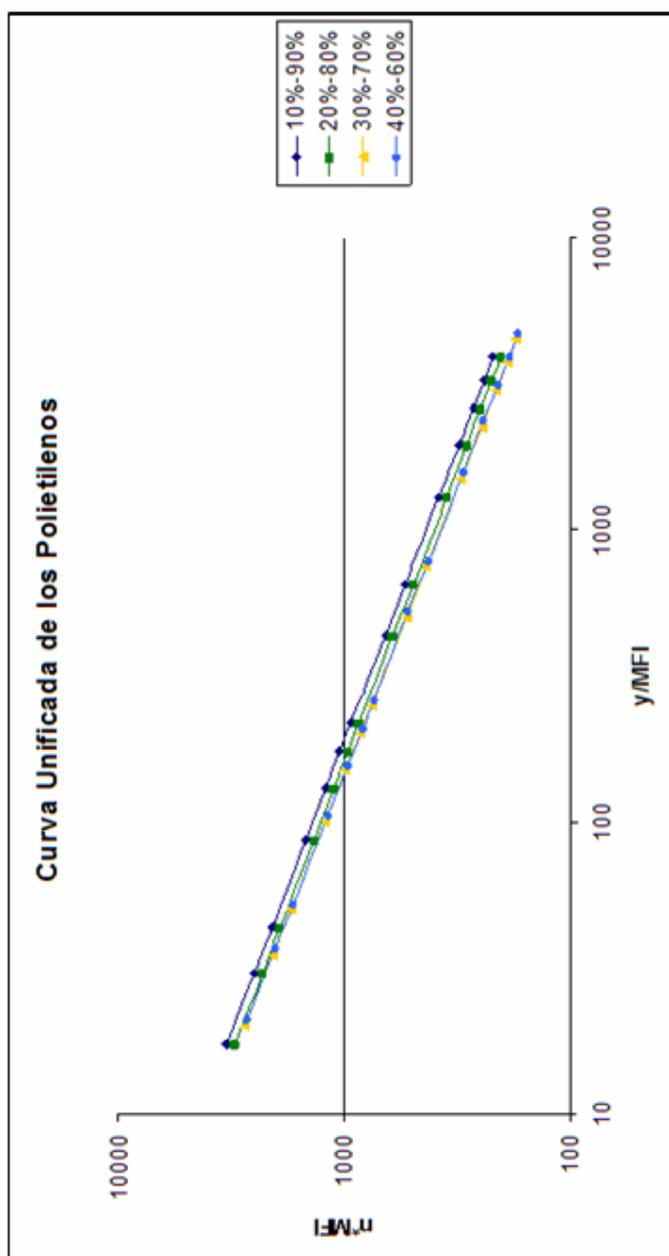


FIGURA 4.12. CURVA UNIFICADA DE LOS POLIETILENOS DE MEZCLAS DE HDPE RECICLADOS POST-INDUSTRIALES Y HDPE VIRGEN.

Construida la curva unificada se observa paralelismo en las curvas, lo cual estaba ciertamente previsto porque se conocía que tipo de material es el reciclado; el comportamiento es mucho mejor debido a la homogeneidad del material, así se observa que las propiedades reológicas son más constantes a alta cantidad de procesado. Lo que también permite mencionar la importancia de la separación de materiales reciclados previo al procesamiento.

4.4 Temperatura de Ablandamiento (VICAT) ASTM D1525

Para determinar la temperatura de ablandamiento del polietileno reciclado se necesita realizar el condicionamiento mencionado en el capítulo anterior.



FIGURA 4.13. PROBETAS PARA ENSAYO VICAT

Se trabaja con probetas de dimensiones de 2 x 2 cms, lo cual puede ser maquinado como se estipula en la norma. Luego de haber realizado la prueba se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA 40
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Método de Prueba ASTM D1525	
Porcentaje de las mezclas	Temperatura de Ablandamiento [°C]
10%-90%	125,95
20%-80%	126
30%-70%	126,4
40%-60%	126,4

Si se compara el valor de Temperatura de ablandamiento para un Polietileno de alta densidad virgen que es de 133° C con los valores obtenidos en estas pruebas se puede observar que no se encuentra muy distanciado de dicha cantidad.

CAPÍTULO 5

5. DISEÑO DEL PRODUCTO

Introducción

El proceso de diseñar desde hace mucho tiempo ha sido un arte fundamental en las empresas de servicios y desarrollo de nueva tecnología y nuevos materiales, ya que involucra la unión de los conceptos ingenieriles fundamentales, análisis de propiedades de los materiales y desempeño final del mismo. En la década de los 70, las empresas manejaban esquemas de desarrollo de productos en los cuales, primaba construir el producto, probar que funcionara y luego preguntarse si generaba o no rentabilidad para ellos y para el público; pero en la actualidad las políticas gerenciales e ingenieriles han dado un cambio drástico gracias a los programas de diseño asistido por computadora.

Al comienzo, estos programas poseían funciones muy básicas, que se limitaban a la aplicación de una interfaz para la realización de planos, pero aun así, de fácil manejo y reproducción más rápida que dibujarlo a mano. Posteriormente las empresas de automoción fueron las que dieron el paso adelante en la utilización de programas de diseño, y fueron más allá creando interfaces en 3D que permitirían darle profundidad y una mejor perspectiva del elemento creado.

Es así que se desarrollaron modelos los cuales permitirían encargarse, por separado, de los pasos que conllevan a un diseño ingenieril, como lo son: el Diseño Parametrizado, la Simulación de desempeños y la Ingeniería Recurrente.

5.1. Metodología de Diseño

Para realizar el diseño de una estructura de mobiliario urbano se deben de tener en cuenta muchas consideraciones, desde la apreciación estética del objeto a crear hasta su funcionalidad y desempeño. Gracias a la ayuda de los sistemas computacionales, tales como lo son el CAD y el CAE, podemos determinar un algoritmo como se puede observar, indicado en la referencia [16], en la figura 5.1.

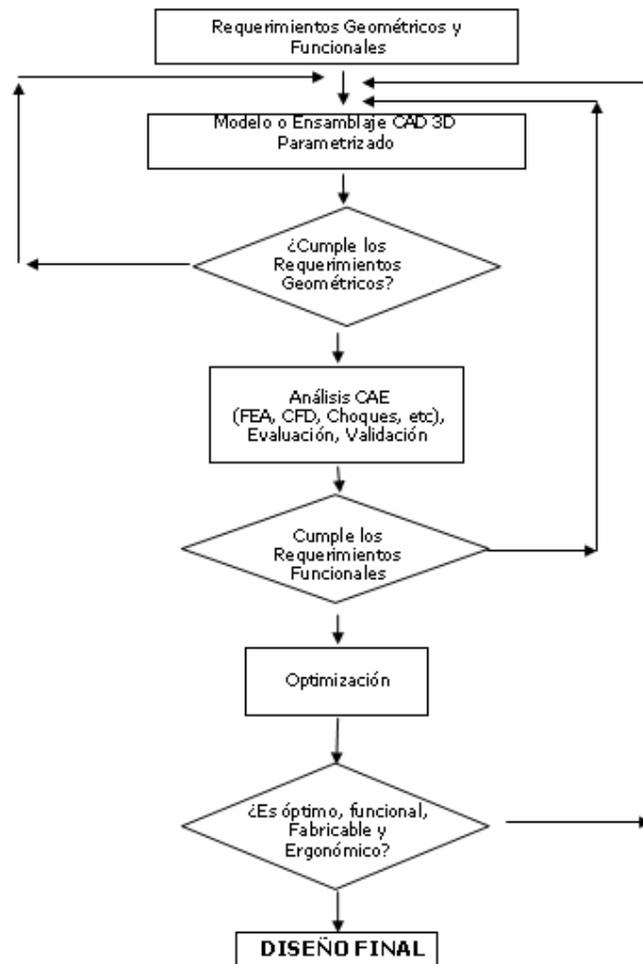


FIGURA 5.1. ALGORITMO PARA EL DESARROLLO DE UN PRODUCTO

Requerimientos Geométricos y Funcionales

Para el desarrollo del producto se tomó en cuenta la perspectiva estética del mismo, es así como puede hablarse del estilo de diseño que se aplicará. Este estilo va cambiando con respecto a la temporada, o como resalta un artículo, el paso de la autarquía a la globalización, de la artesanía a la

producción industrial informatizada, de la cantidad a la calidad y al confort. Es así que se pensó en un modelo de medidas las cuales sean las apropiadas para resaltar las propiedades mencionadas anteriormente.

Por lo tanto, el diseño se concentrará en la elaboración de un conjunto de mesa y sillas para picnic; dentro de los requerimientos geométricos se necesita una mesa de picnic para una cantidad de 6 personas aproximadamente, con una altura que les permita mantener comodidad al momento de servirse los alimentos, así mismo las sillas, que está diseñada para ser ocupada por 3 personas, tienen que tener la altura adecuada para servirse. Con respecto a los requerimientos funcionales de dicha mesa es primordial que tenga una deflexión, con un peso considerable, de 5 mm en las secciones donde no se encuentra apoyada. Además se debe considerar el material que se utilizará para la creación de dicho conjunto será con el porcentaje de reciclado que mejor propiedades mecánicas resultaron de los ensayos realizados. Para la creación de un material el programa CAE permite ingresar datos de Modulo de Young, densidad, peso específico, etc.

5.2. Diseño mecánico y optimización de masa

Modelo o ensamblaje 3D

Como idea preliminar se modelará el conjunto de mesa y sillas con un largo de 1800 mm lo que llevó a colocar 4 perfiles extruidos y montados

sobre 3 apoyos separados a una distancia de 752,5 mm en el caso de la mesa, mientras que para la silla serán 3 perfiles extruidos y montados sobre 3 apoyos separados la misma distancia indicada anteriormente. Preliminarmente se debe de realizar en el programa CAD los gráficos de los componentes de los objetos a crear, así que se dibujarán los perfiles de las sillas, con las medidas señaladas en la figura 5.2.

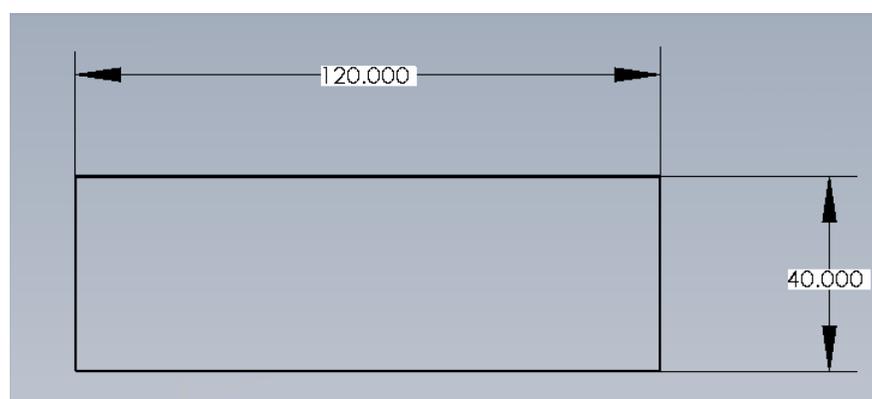


FIGURA 5.2. MEDIDAS DEL PERFIL DE LA SILLA

Posteriormente se extruye, como así se conoce a la operación de proporcionar profundidad y forma al cuerpo a construir en los programas CAD, con una medida de 1800 mm., como lo indica la figura 5.3 en una vista lateral, y luego quedando listo el perfil como se muestra en la figura 5.4.

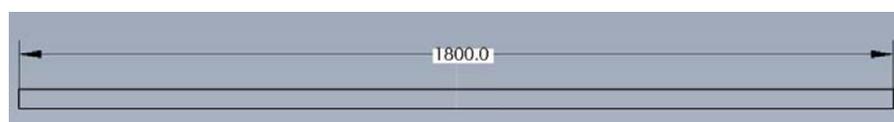


FIGURA 5.3. VISTA LATERAL DEL PERFIL EXTRUIDO

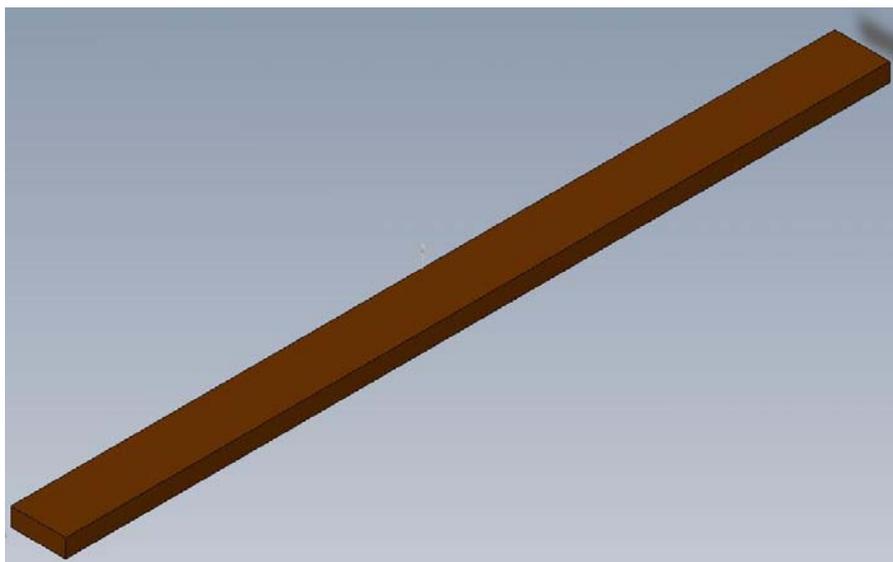


FIGURA 5.4. EXTRUSIÓN DEL PERFIL DE LA SILLA

Operación similar de construcción del perfil es la del apoyo de la silla, como indica la figura 5.5, la vista frontal de dicho apoyo con sus respectivas medidas son dibujadas en un plano alzado. Se debe de tomar en cuenta, en todo momento, que no son medidas definitivas y por consiguiente están sujetas a cambio gracias a la versatilidad que proporcionan al usuario dichos sistemas.

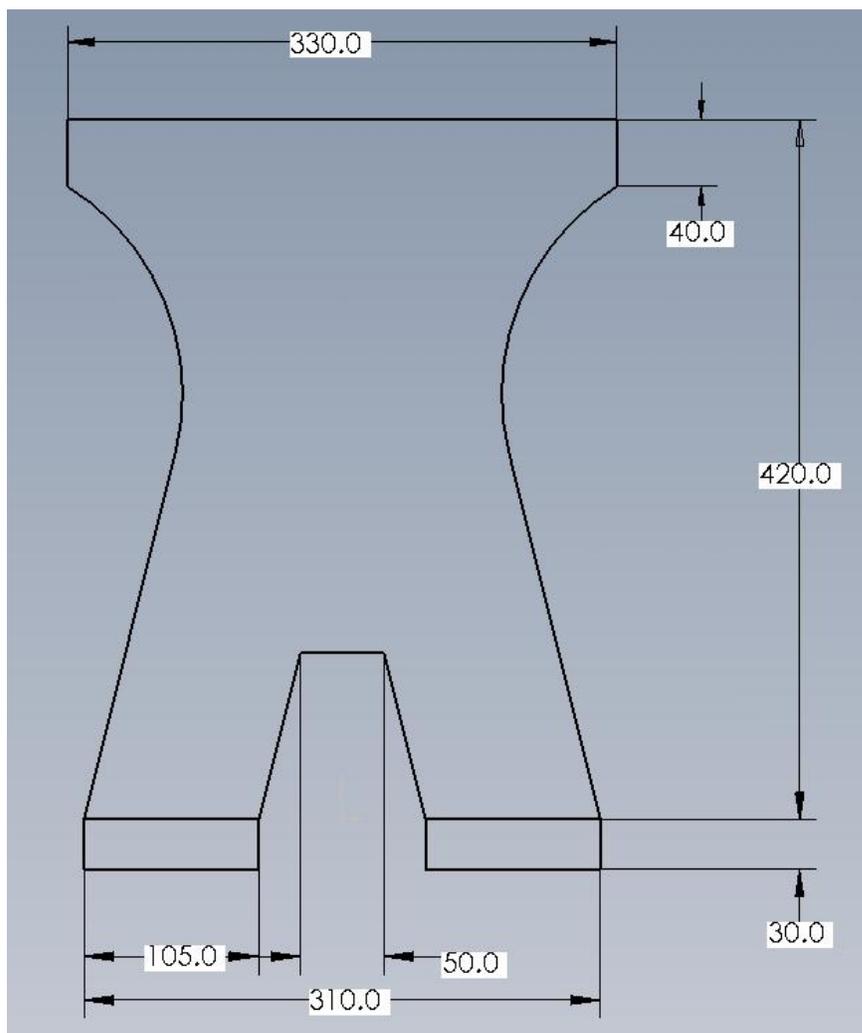


FIGURA 5.5. VISTA FRONTAL DEL APOYO DE LA SILLA CON SUS RESPECTIVAS COTAS

A continuación se realiza la operación de extrusión, dando al cuerpo una profundidad como se muestra en la figura 5.6, que es una vista lateral del apoyo de la silla. Se debe acotar que la parte inferior de 105x30 mm es extruida con otro espesor para darle estabilidad al cuerpo. Y así se obtiene el apoyo como se muestra en la figura 5.7.

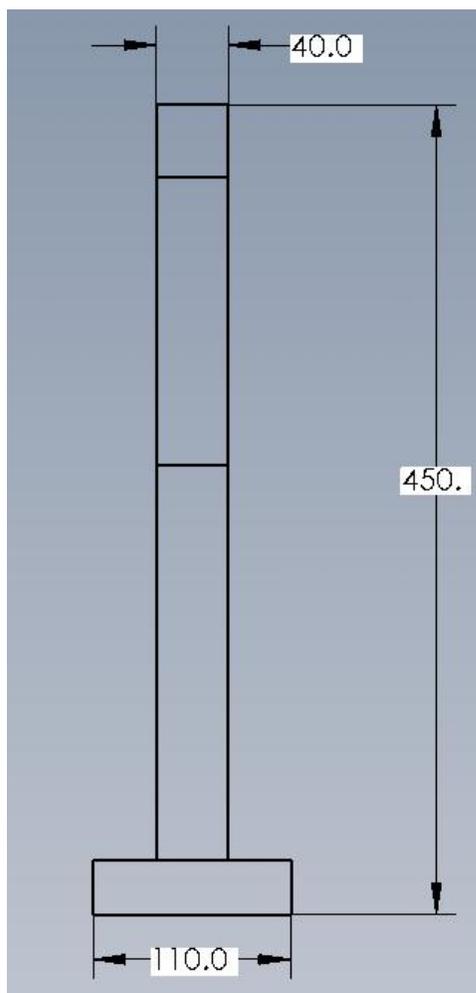


FIGURA 5.6. VISTA LATERAL DEL APOYO ACOTADO

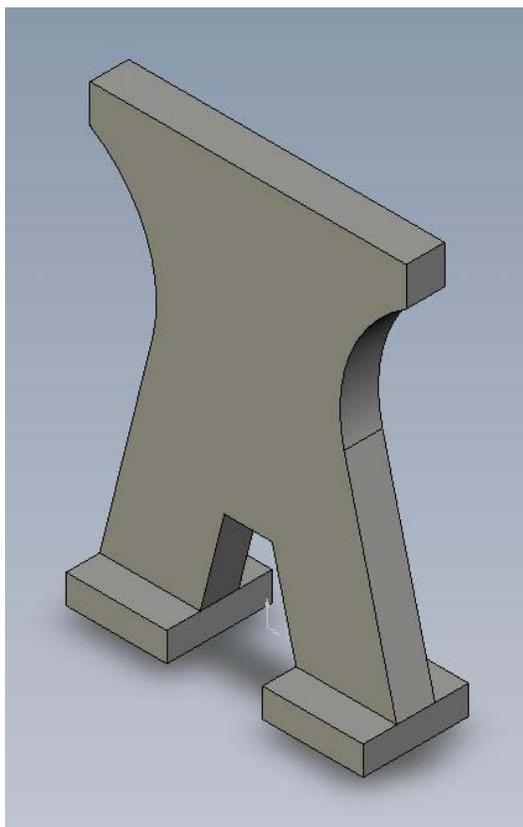


FIGURA 5.7. APOYO TERMINADO

Para realizar el armado de la silla en el programa CAD, se usa la opción Ensamblaje, en la que nos permite escoger dibujos previamente realizados y unirlos a nuestro diseño preliminar o en fin, a nuestro gusto. Se procede con la operación de la unión y mediante relaciones de posición se colocan los perfiles sobre el apoyo, los cuales serán 3 según se ha convenido. Se conoce como relación de posición a la operación en el programa CAD que, mediante relaciones geométricas, permite colocar las piezas en un sentido

ordenado y equidistante una con respecto de otra, obteniendo la silla como se muestra en la figura 5.8.

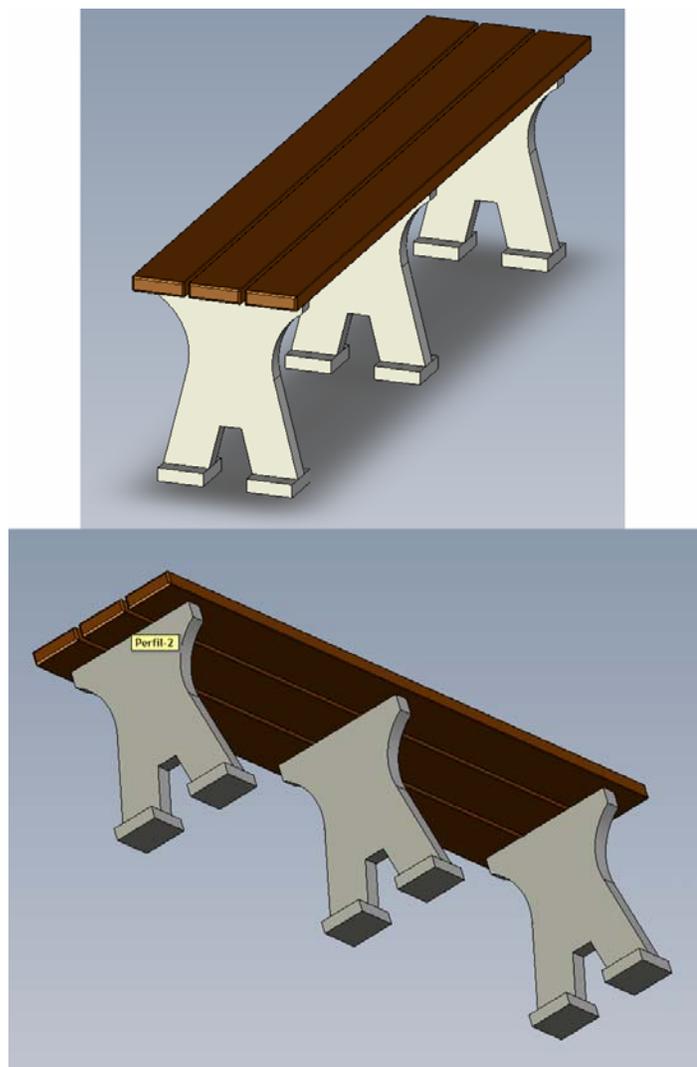


FIGURA 5.8. SILLA ARMADA

También se posee la opción de agregarle agujeros como si estuviera taladrado para posteriormente insertar pernos para la correcta sujeción de los perfiles a los apoyos. Con el asistente de taladrado se consigue realizar

dicha operación, de acuerdo a las normas ISO se escoge el diámetro y profundidad del rasurado. A continuación se colocan los pernos en sus respectivos lugares, también normados, como se muestra en la figura 5.9. Se debe acotar que el programa CAD permite escoger el tipo de norma con la que se trabajará, como la ANSI, ISO, Británicas, etc.

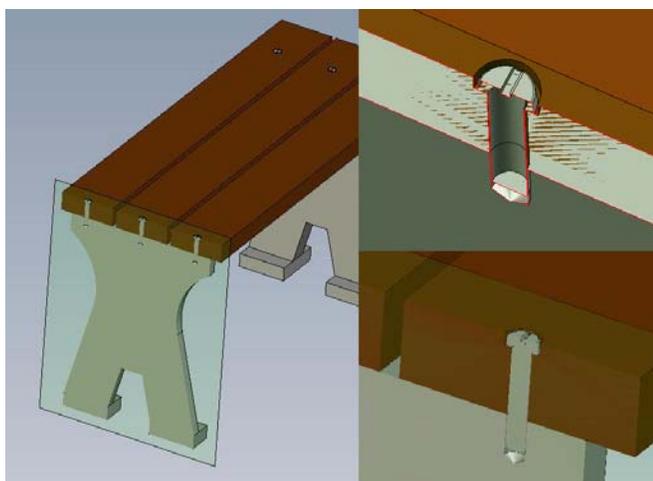


FIGURA 5.9. COLOCACIÓN DE PERNOS EN LOS PUNTOS DE SUJECIÓN CON LOS APOYOS

Finalizada la edición de la silla se procederá a la creación de la mesa, siguiendo un esquema parecido, es decir, creando las piezas por separado y luego se ensambla en un solo cuerpo. Se modela el perfil sobre un plano alzado, con las medidas especificadas como se muestra en la figura 5.10.

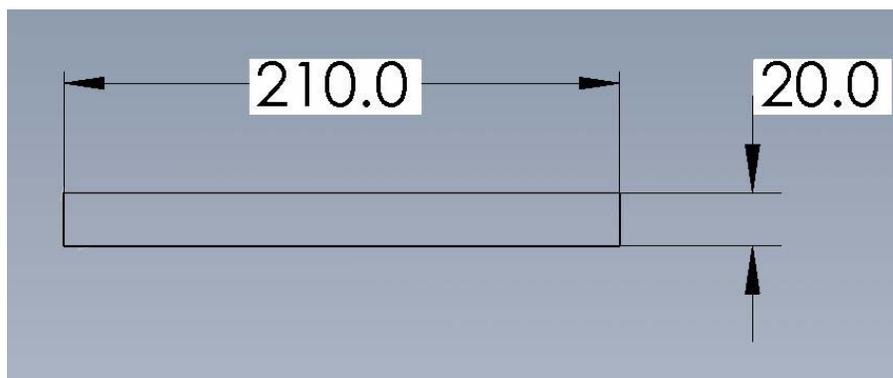


FIGURA 5.10. PERFIL RECTANGULAR ACOTADO. VISTA FRONTAL

Luego de formar el rectángulo con las medidas deseadas, con la opción extruir se le dará la profundidad requerida como se muestra en la figura 5.11.



FIGURA 5.11. VISTA LATERAL DE PERFIL RECTANGULAR EXTRUIDO Y ACOTADO

A continuación, el dibujo del apoyo de la mesa con un alto aproximado de 800 mm, indicado en la figura 5.12, considerando que en la operación de ensamble la altura será un poco mayor al adjuntar los perfiles.

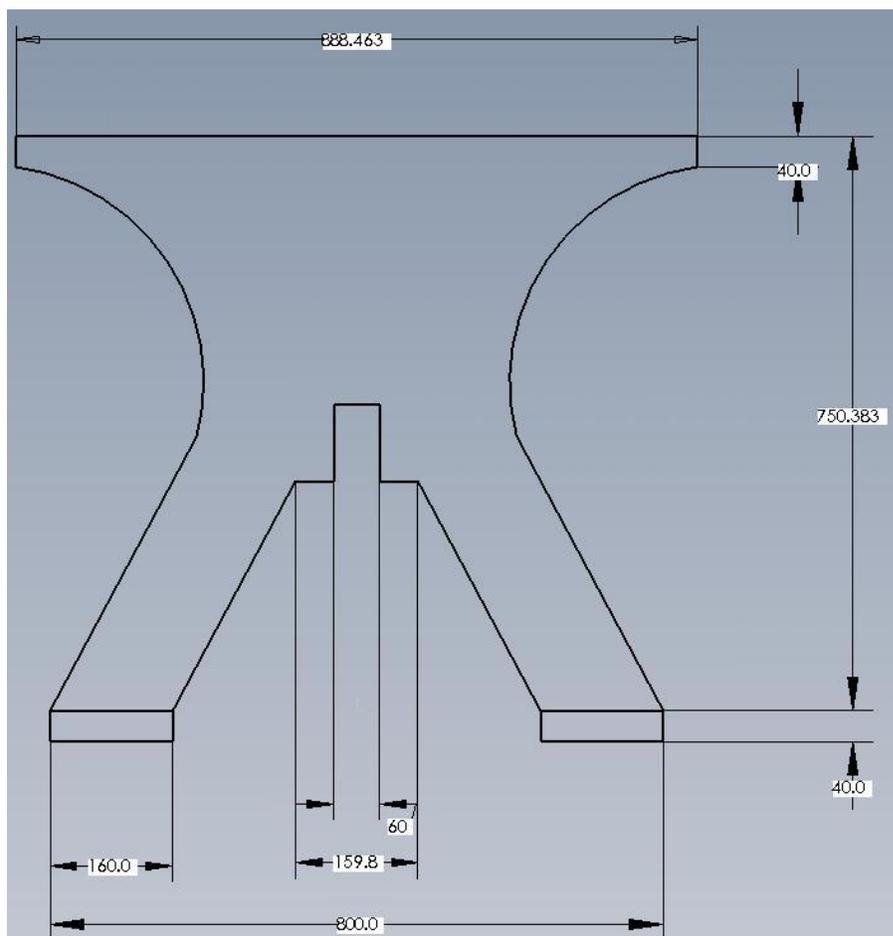


FIGURA 5.12. VISTA FRONTAL DEL APOYO DE LA MESA ACOTADO

Una vez determinadas las dimensiones en la vista frontal, se realiza la extrusión de la pieza, como se muestra en la figura 5.13. La versatilidad del programa permite al diseñador cambiar o editar en cualquier momento las operaciones que se realizan en la creación de una pieza o ensamblaje.

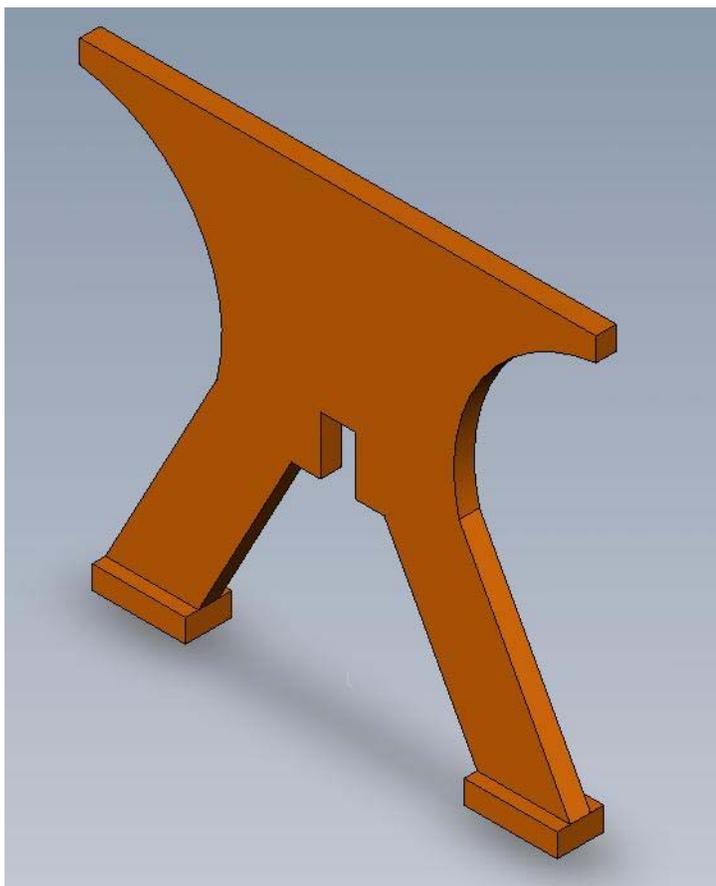


FIGURA 5.13. APOYO EXTRUIDO

Para el diseño de la mesa se consideró colocar un soporte en la parte inferior, para mantener unidos los apoyos, que entre a presión entre ellos por la cavidad con la que consta el apoyo y en la parte inferior se colocó unas placas para prevenir cualquier inconveniente. A continuación se presenta en la figura 5.14 el soporte y en la figura 5.15 la placa que ayudará a sostener al soporte.

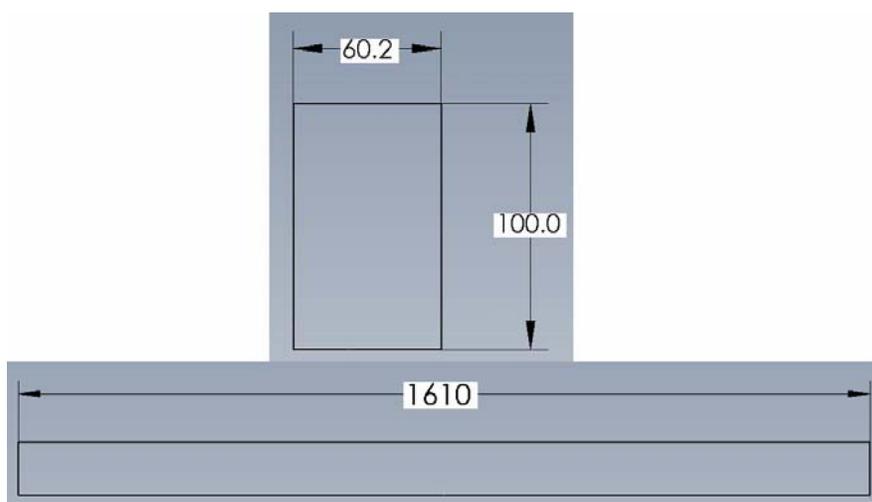


FIGURA 5.14. VISTA FRONTAL Y LATERAL DEL SOPORTE

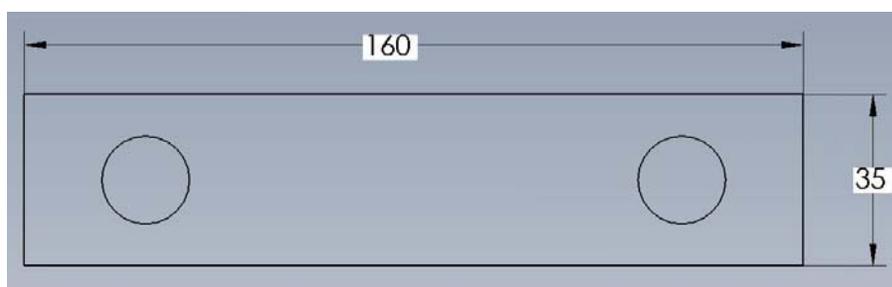


FIGURA 5.15. VISTA FRONTAL DE LA PLACA

Es así que diseñadas todas las piezas que conformarán la mesa, el siguiente paso es ensamblarlo, tomando en cuenta las relaciones de posición explicadas para el ensamble de la silla. Se observa en la figura 5.16 la colocación de las placas con sus respectivos pernos en la parte inferior de la mesa

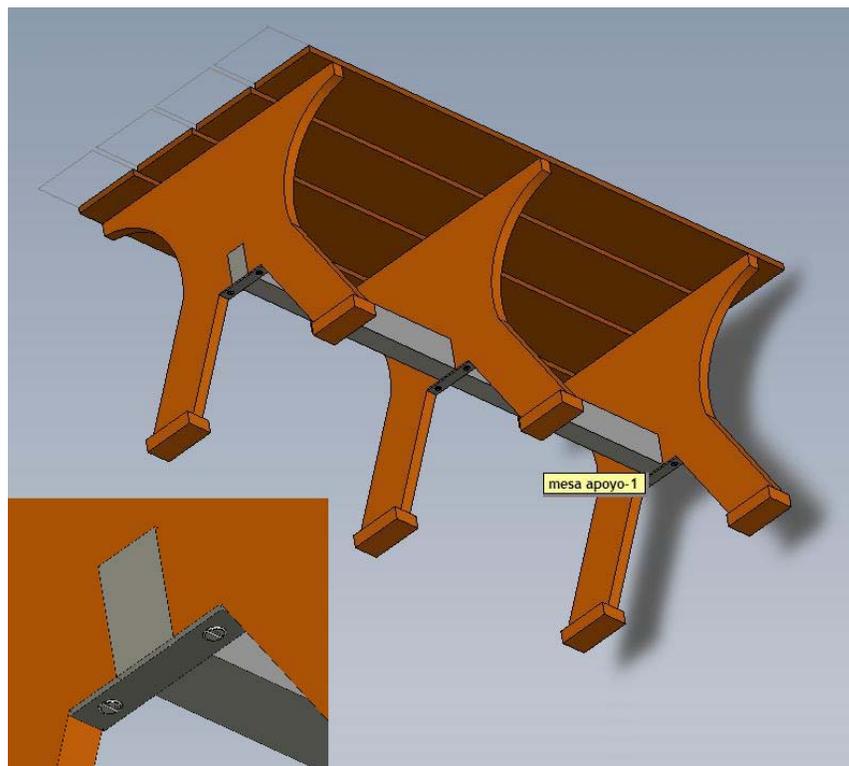


FIGURA 5.16. MESA FINALIZADA CON SOPORTE Y PLACAS COLOCADAS Y EMPERNADAS

Antes de proseguir con el análisis CAE cabe hacer la pregunta ¿Cumple con los requerimientos geométricos? La respuesta es sí, debido a que fue estrictamente dibujado según lo indican dichos requerimientos.

Análisis CAE

Con los modelos de la silla y la mesa ya definidos cada uno con el material escogido de acuerdo a sus propiedades mecánicas, previo al ensayo el programa genera una vista preliminar con datos de interés sobre el material a ensayar, como se indica en la figura 5.17, en relación a la silla.

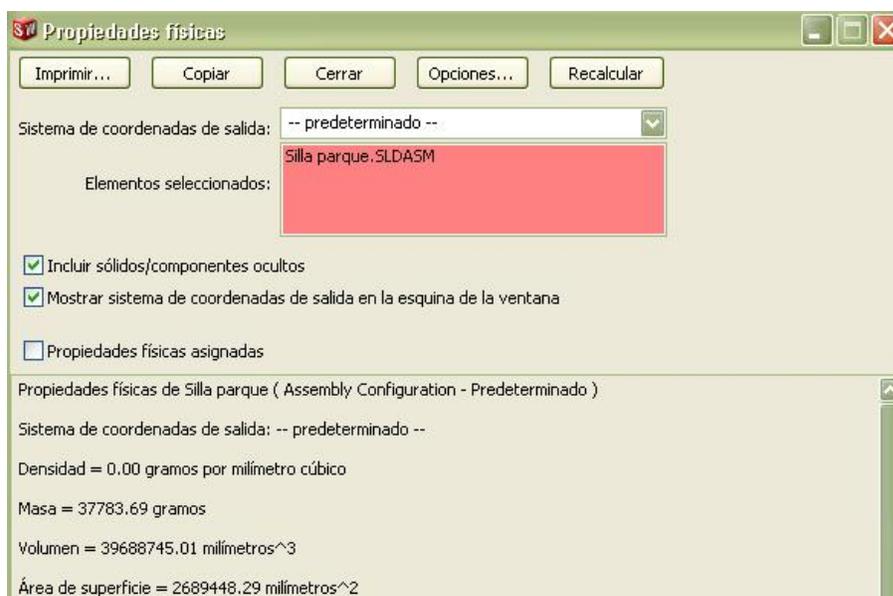


FIGURA 5.17. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA SILLA A ENSAYAR

A continuación se procederá a realizar el análisis de elementos finitos. Se recalca que el programa analiza en un nodo del mallado, 3 ecuaciones de esfuerzo y 3 ecuaciones de cortante, lo cual generará ecuaciones diferenciales realmente extensas, las cuales el sistema las resolverá, como proceso interno, usando el método de resolución de Jacobi. Se realiza el mallado o discretización del elemento a analizar como lo indica la figura 5.18.

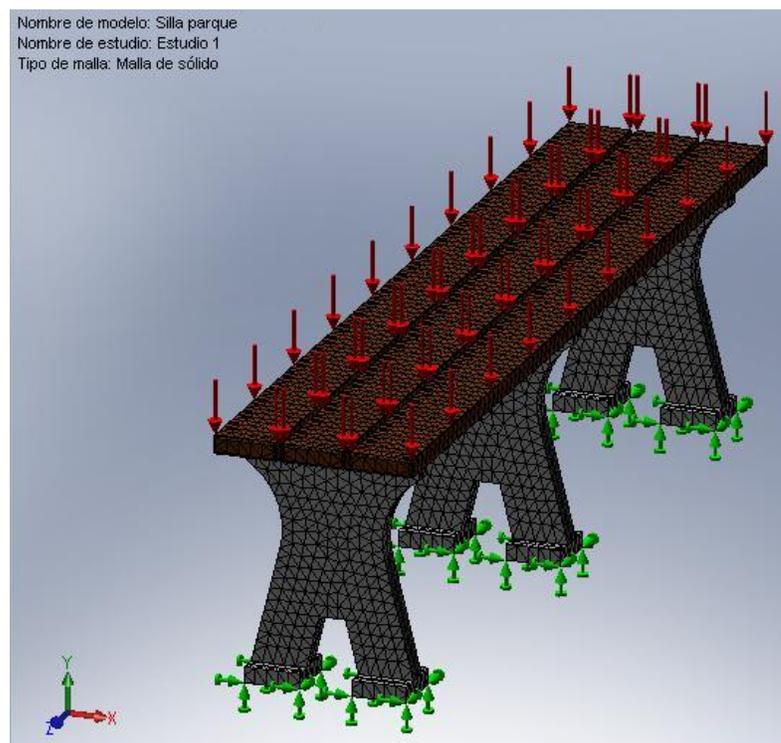


FIGURA 5.18. MALLADO DE LA SILLA

Con el mallado del sistema se puede realizar análisis nodal de la silla en cuestión, según lo indica la teoría de elementos finitos. Dentro de las consideraciones de diseño se tomarán en cuenta los análisis de Deformación (figura 5.19) y de Tensión (figura 5.20) del cuerpo a analizar. Como se indicó en los requerimientos funcionales, se debe de tener una estructura la que soporte una deformación de hasta 5 mm en las zonas que no se encuentran apoyadas para efectuar la optimización de masa

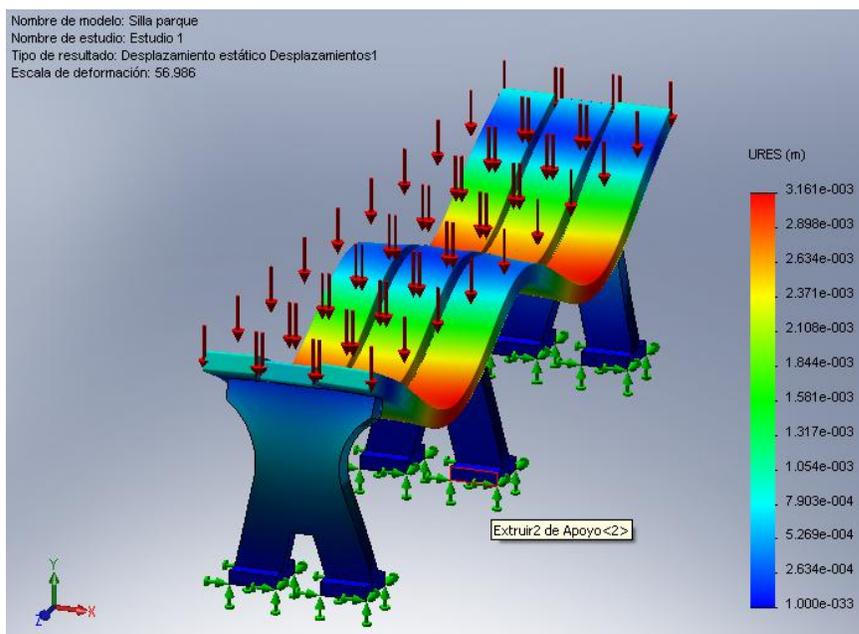


FIGURA 5.19. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA SILLA

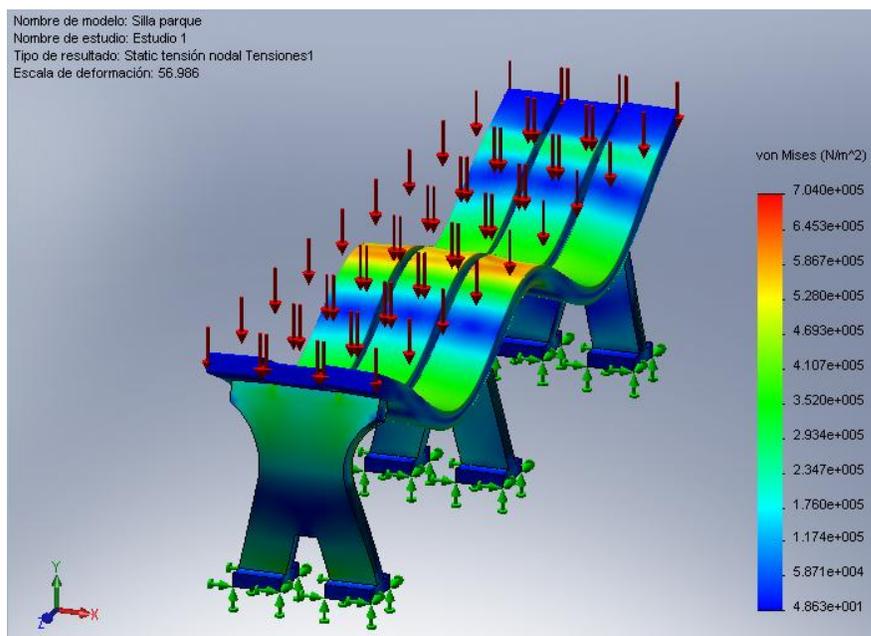


FIGURA 5.20. ANÁLISIS DE TENSIONES DE LA SILLA

Como indica la figura 5.19, en las zonas no apoyadas se tiene una deformación máxima de 3 mm, lo cual está dentro del requerimiento funcional que se había establecido. Se observa además que en los apoyos también existe deformación, pero como indica el diagrama de colores que se encuentra a un lado, es mínima.

Por cumplir de manera satisfactoria el requerimiento funcional se realiza la siguiente pregunta: ¿Es optimizable?, es aquí en donde el diseñador trata de reducir ciertas medidas para probar que el modelo arreglado cumpla con los requerimientos funcionales. Así que se muestran los gráficos en los que se optimiza el espesor disminuyéndolo.

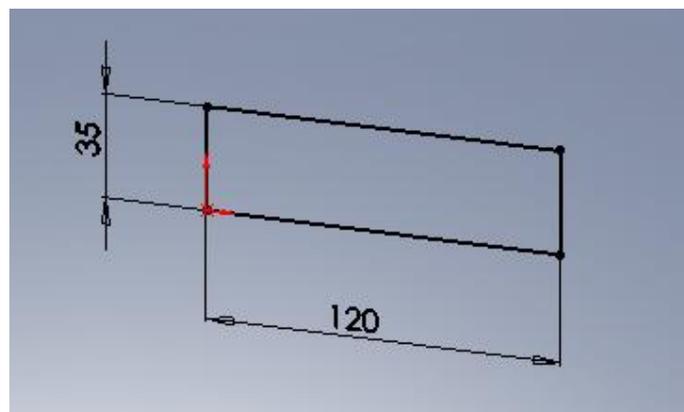


FIGURA 5.21. COTAS DE PERFIL REDUCIDO DE ESPESOR

Debido a esta disminución en el espesor se pueden observar que las propiedades físicas han disminuido, siendo esto lo que se espera, ya que

también se disminuye en costos de producción y gasto de material a utilizar para la manufactura.

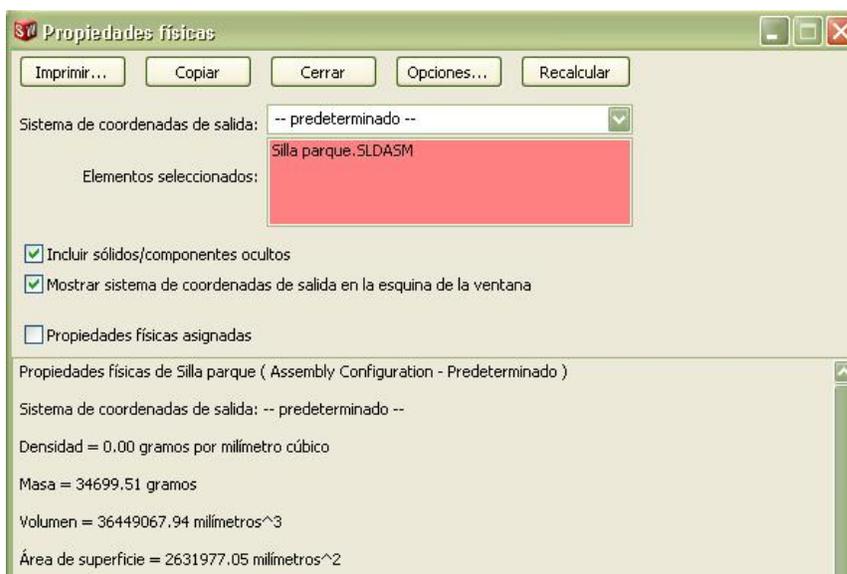


FIGURA 5.22. PROPIEDADES FÍSICAS DE SILLA OPTIMIZADA

Se aplica la presión de 1400 N/m^2 como carga uniforme a los largo de la silla, para proseguir con los cálculos en el programa. También el diseñador debe de especificar que las patas son apoyos fijos, para así concentrar toda la carga en la parte superior. Y así genera el siguiente resultado, mostrado en las figuras 5.23 y 5.24.

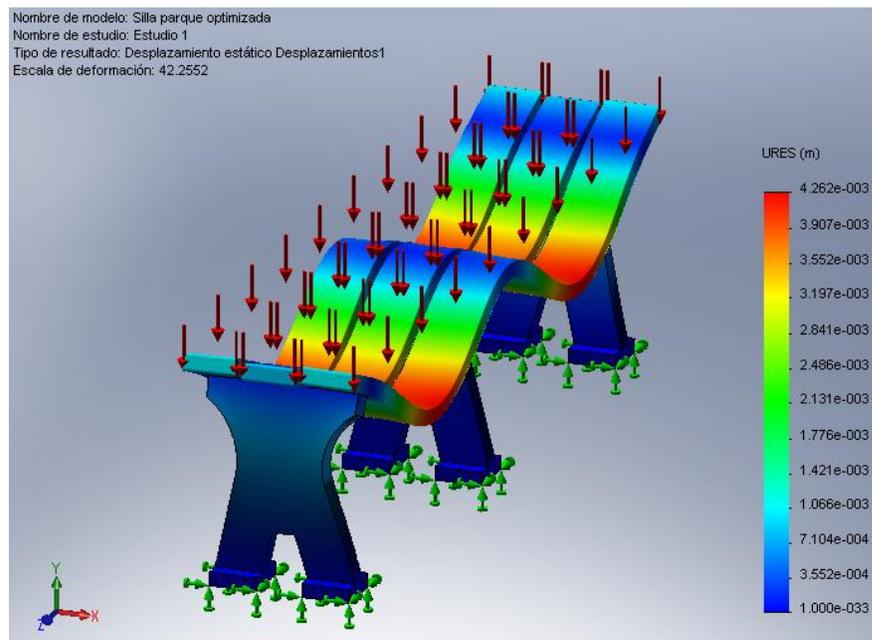


FIGURA 5.23. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE SILLA OPTIMIZADA

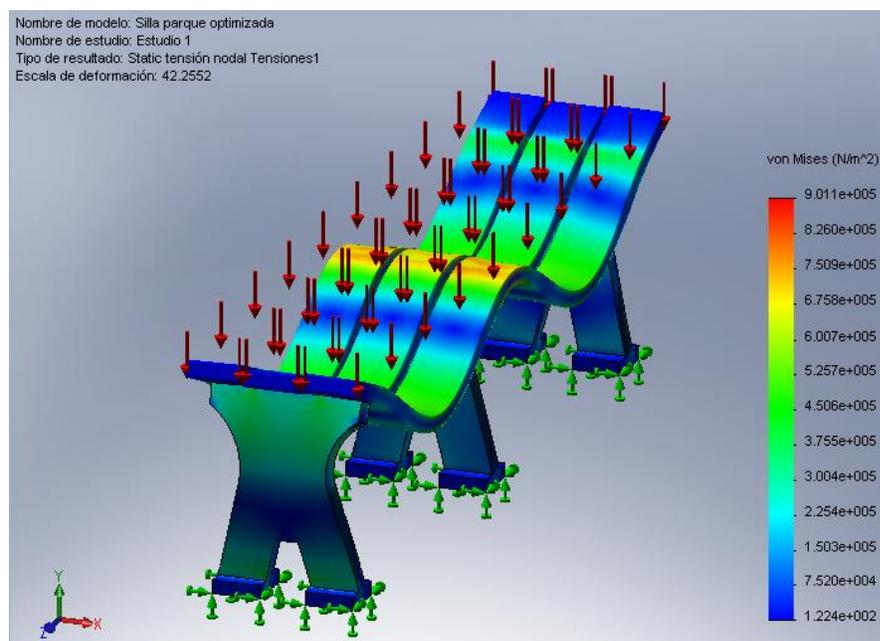


FIGURA 5.24. ANÁLISIS DE TENSIÓN DE SILLA OPTIMIZADA

Se puede observar de la figura 5.23, que el valor máximo de deformación del material es de 4.29 mm, lo cual está dentro de los requerimientos funcionales planteados, si se disminuye más el espesor se puede lograr también un valor tal vez más cercano al requerimiento establecido, pero como consideración de diseño se planteará más adelante un factor de diseño de acuerdo a los datos establecidos para el material con el que se trabajará. De igual manera se puede realizar el estudio o evaluación anterior para la mesa, se aplica la presión de 1200 N/m² sobre la mesa, y posterior a realizar el mallado, el sistema entrega la información de deformación y de tensión en la mesa, como se muestra en la figura 5.25 y en la figura 5.26.

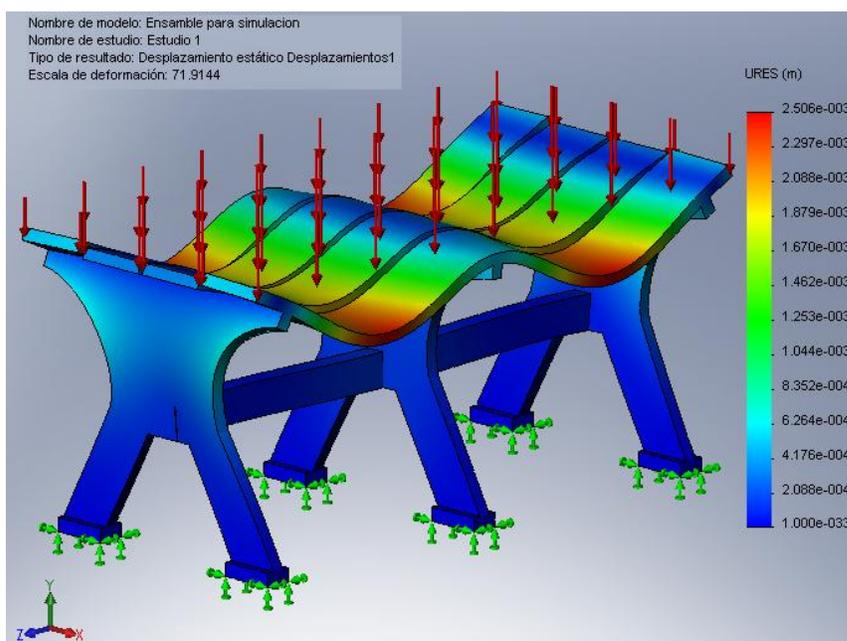


FIGURA 5.25. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN EN LA MESA

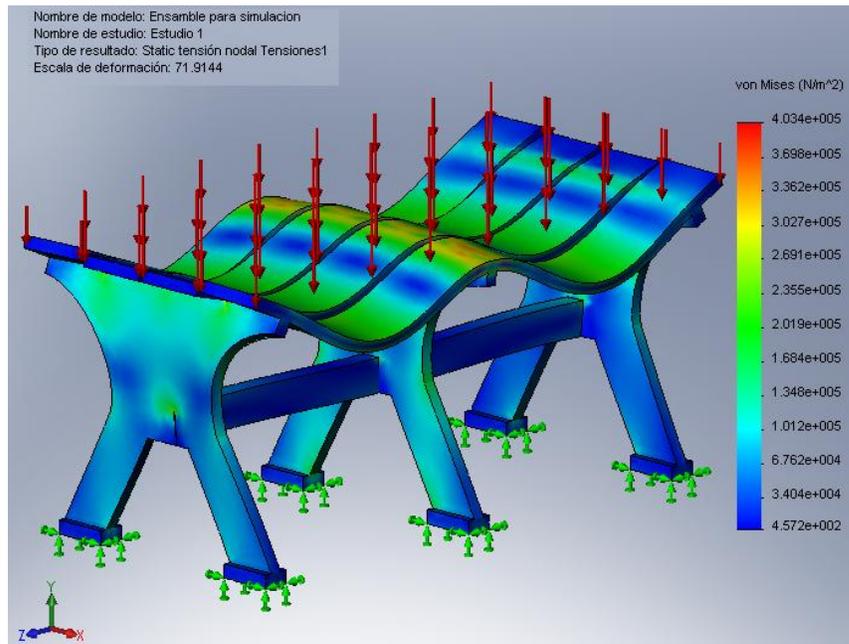


FIGURA 5.26. ANÁLISIS DE TENSIÓN EN MESA

Del análisis gráfico de deformación se observa, que con las medidas propuestas la deformación es de 2 mm, lo cual está dentro de los requerimientos funcionales pero es un valor optimizable, es así que disminuimos el ancho del perfil para proceder otra vez con el análisis. Luego, se cambian los espesores en el perfil como indica la figura 5.27.

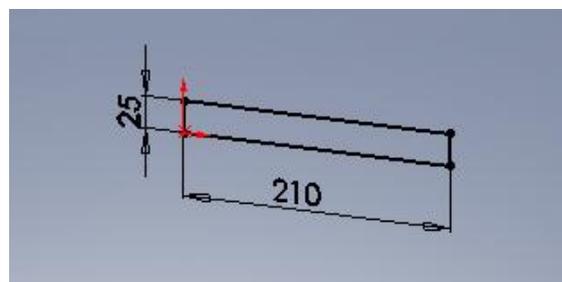


FIGURA 5.27. CAMBIO DE ANCHO EN PERFIL DE LA MESA

Una vez cambiado dicho espesor, se procede a reconstruir el perfil, y consecuentemente la mesa. Luego, se realizan los cambios y se realiza nuevamente la operación mostrada en la figura 5.28 y 5.29.

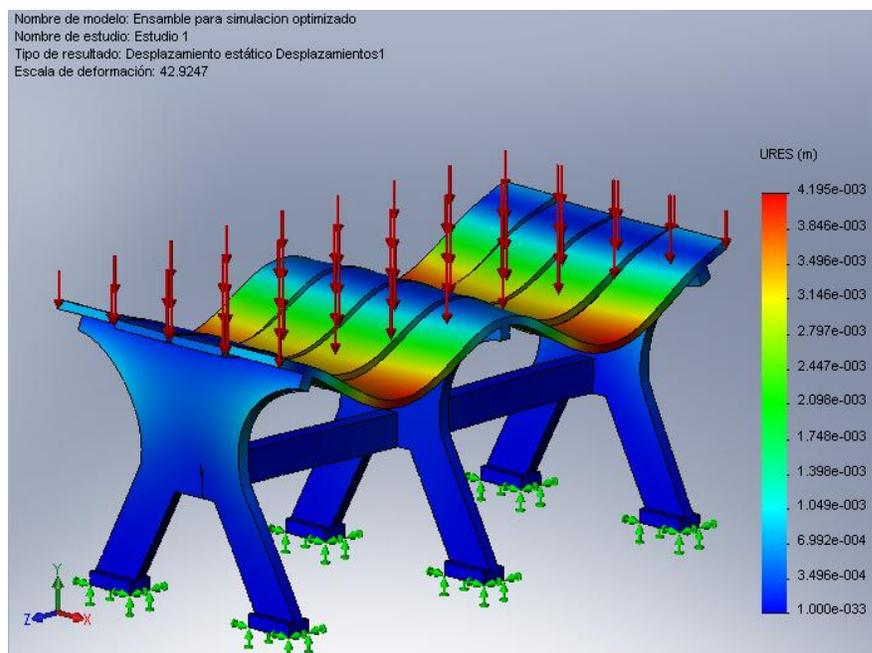


FIGURA 5.28. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA MESA OPTIMIZADA

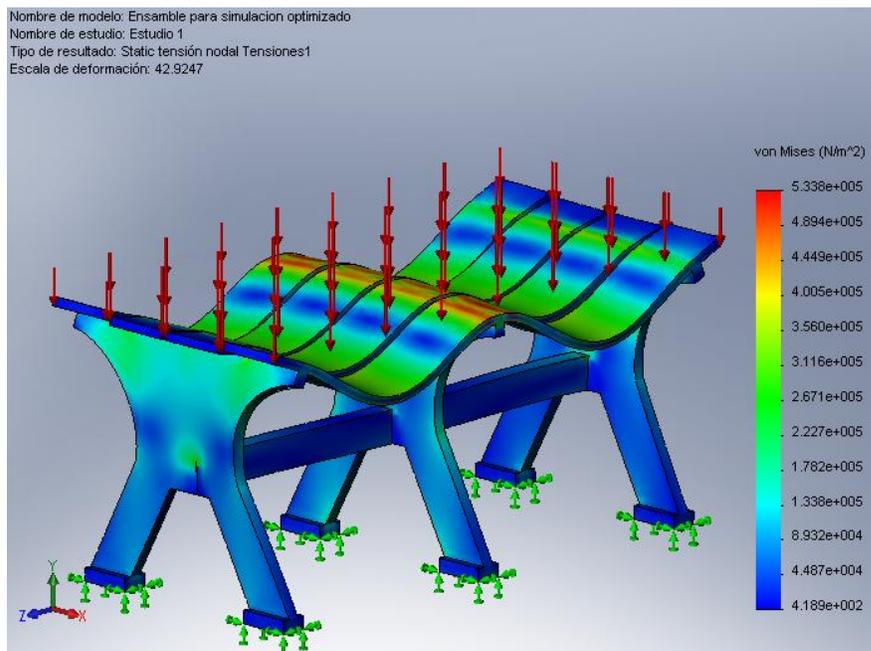


FIGURA 5.29. ANÁLISIS DE TENSIÓN DE LA MESA OPTIMIZADA

Se observa del análisis de deformación su valor máximo de 4.193 mm, siendo de esta manera un valor considerablemente bueno para el diseño planteado, puesto que cumple con el requerimiento funcional propuesto.

Para realizar el análisis de tensión de los dos cuerpos diseñados, se procederá a aplicar el concepto de factor de diseño, para tener así un parámetro que permita garantizar la confiabilidad al conjunto diseñado en el programa CAD. A continuación se observa la tabla 41 en la que se expone los valores de Esfuerzo de Fluencia obtenidos experimentalmente y esfuerzo de von Mises presentado en las gráficas de Análisis de Tensión.

TABLA 41
DETERMINACIÓN DE FACTOR DE DISEÑO

Pieza	Esfuerzo de fluencia [N/m ²]	Esfuerzo máximo de von-Misses [N/m ²]	Sf
Apoyo silla	24891239,03	5,33E+05	46,7
Apoyo mesa	24891239,03	9,01E+05	27,62

Por lo que se obtienen valores de factor de diseño muy buenos, lo cual permitiría realizar una nueva optimización, pero no aplicable en la realidad debido a que el requerimiento funcional limita hasta 5 mm de deformación.

5.3. Análisis básico de Inyección

El principio del moldeo por inyección es inyectar en un molde cerrado y frío, un polímero fundido, en el cual se solidificará dándole forma a un objeto deseado. Es así que dentro de la secuencia de operación para producir piezas moldeadas por inyección sigue los siguientes pasos:

- El moldeo está cerrado y vacío.
- Se inyecta el material
- Etapa de retención en la que se mantiene presión mientras se enfría el material. Se realiza esto para que al solidificarse se elimine la presión.
- Al cerrar la válvula se inicia la rotación del tornillo. Esto lleva a que la presión se aplique a la boquilla cerrada permitiendo al tornillo moverse hacia atrás y acumular nueva carga de material fundido.

- Durante este proceso, el material se enfría; y se tiene listo el producto deseado

Siguiendo estos procedimientos, se procede a realizar el análisis de inyección comenzando preliminarmente desde:

Selección de máquina inyectora

Previamente se debe de conocer que cantidad de volumen o a que cantidad de volumen máximo la inyectora trabajará. Es así que se toma como referencia el volumen del apoyo de la mesa.

Con este valor se procede a analizar el catálogo y se busca el equipo con Volumen de inyección cercano o mayor al volumen del apoyo de la mesa, obteniendo de esta forma el valor observado en la tabla 42:

TABLA 42

SELECCIÓN DE INYECTORA A UTILIZAR Y TIEMPO DE INYECCIÓN RESULTANTE

Pieza	Volumen de la Pieza (cm³)	Masa de la Pieza (g)	Inyectora seleccionada *	Flujo HDPE recomendado (g/seg)	Tiempo de inyección resultante (seg)
Apoyo silla	4600	4378	2000Tm	150g/seg	30
Apoyo Mesa	12425	11829	2000Tm	150g/seg	78

* Según recomendaciones de Ningbo Haitian Group Co. Ltda. (Se selecciona de acuerdo a la pieza que tenga mayor volumen)

Flujo másico

Al revisar la tabla 42 de la máquina escogida se puede observar que recomiendan un flujo másico de 150 g/seg, este dato permite determinar el tiempo de llenado del molde por la fórmula 7.

$$\dot{m} = \frac{m}{t}; \text{ de la cual se despeja } t \text{ dando : } t = \frac{m}{\dot{m}} \quad (7)$$

Como se muestra en la tabla 42 se obtienen valores de tiempo de inyección de 78 segundos para el apoyo de la mesa y 30 segundos para el apoyo de la silla.

Análisis en programa CAE

El programa CAE utilizado nos permite realizar la operación de inyección de un objeto deseado. La inyección será aplicada siguiendo las ecuaciones modificadas de Navier-Stokes para un fluido compresible y flujo laminar, tomando en cuenta de que el polietileno es un fluido no newtoniano, que se encuentra estipulado en la programación de la herramienta Mold Xpress.

Iniciado el programa se abre un cuadro de diálogo que presenta la funcionalidad y diversos parámetros por los cuales se registrará el llenado de plásticos mediante la inyección, como se observa en la figura 5.30.

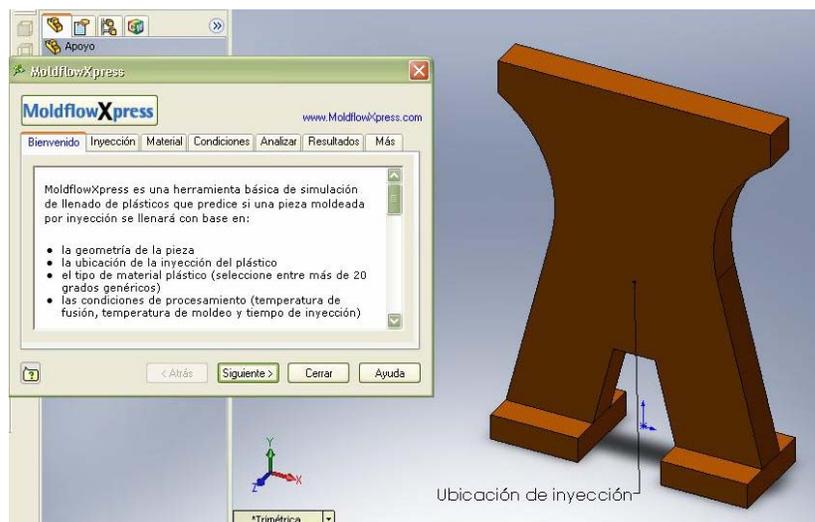


FIGURA 5.30. CUADRO DE DIÁLOGO DE MOLD XPRESS

Es una herramienta muy versátil la que sugiere al usuario diseñador los puntos en los que se debe de iniciar la inyección del material fundido, lo cual es fundamental al momento de efectuar la producción en masa del producto, mostrado en la figura 5.31.

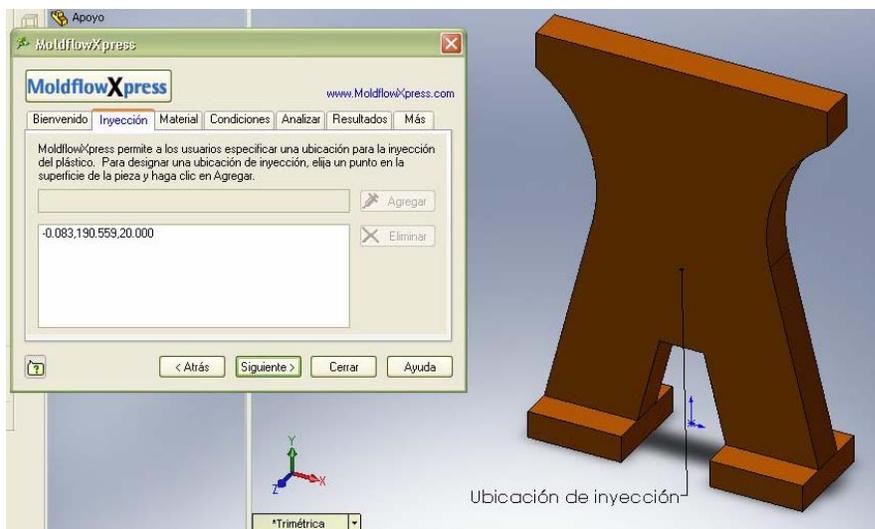


FIGURA 5.31. SELECCIÓN DE PUNTO DE INYECCIÓN

Ciertos problemas se originan debido a la elección de este punto crítico de inyección, por ejemplo, al momento del llenado se pueden producir zonas en las cuales se llene de material primero que otro rincón del molde, esto conlleva que al seguir llenando el molde la presión en dichos puntos pueda ocasionar fatiga en el producto final debido al exceso de flujo que hubo en dichas secciones que producen que las moléculas se encuentren esforzadas en demasía.

El siguiente paso es determinar el tipo de material que se va a inyectar, se escoge por consiguiente el material editado por el diseñador con los valores especificados como fue realizado para los análisis de tensión y deformación, se observa en la figura 5.32 dicho procedimiento.

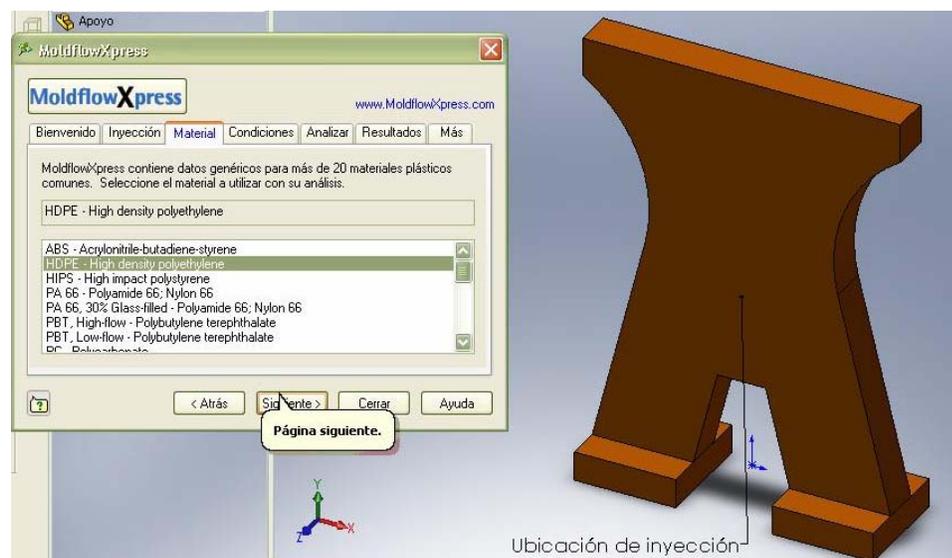


FIGURA 5.32. SELECCIÓN DE MATERIAL A INYECTAR

Posteriormente, como se indica en la figura 5.33 se escogen las temperaturas de fusión, de moldeo y tiempo de inyección para la pieza. El tiempo de inyección fue determinado con respecto al flujo másico de la máquina inyectora, y se obtuvo un tiempo de inyectado de 28 segundos que se redondeó a 30 segundos.

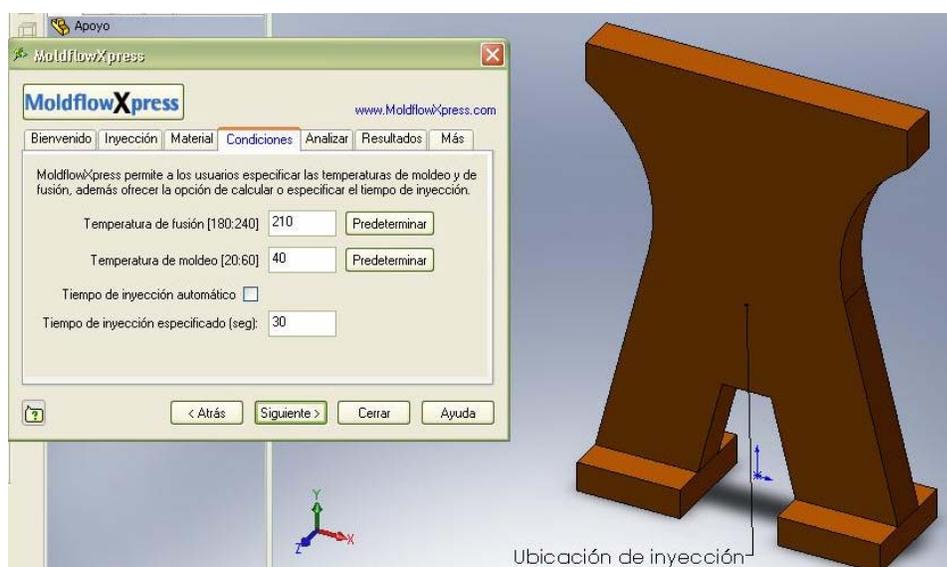


FIGURA 5.33. SELECCIÓN DE TEMPERATURAS Y TIEMPO DE INYECCIÓN

Se indica en la figura 5.34a como se va llenando el molde a medida que transcurre el tiempo, indicado con el color amarillo; además al finalizar la operación, se muestra el tiempo de llenado en la figura 5.34b, que indica según el diagrama de colores como se va llenando progresivamente el material hasta llegar a las zonas más azules que son las que se llenan en últimas instancias.

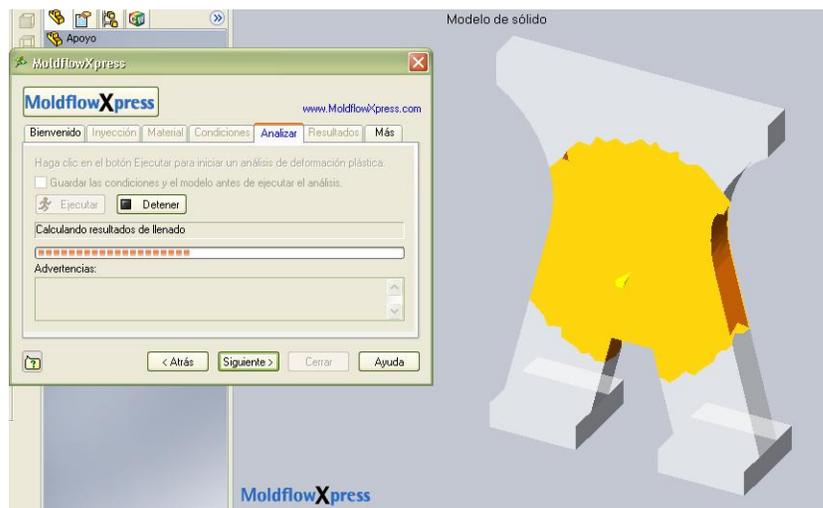


FIGURA 5.34A. PROCESO DE LLENADO

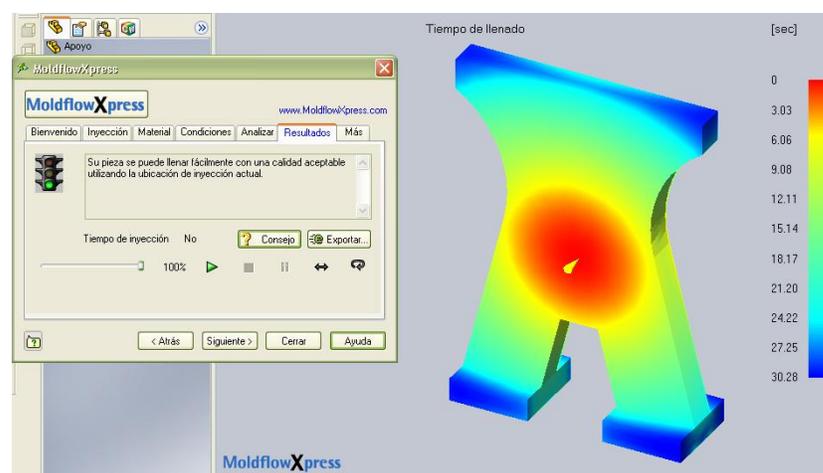


FIGURA 5.34B. INDICACIÓN DEL TIEMPO DE LLENADO DEL MOLDE

Realizado el análisis de inyección del apoyo de la silla se determinará el análisis para la mesa. Se debe de considerar que se seguirán pasos similares como al caso anterior, variarán el punto de inyección y el tiempo de inyección. Así se puede observar en la siguiente serie de figuras en la que están señalados los pasos que han cambiado con respecto al modelo

anterior; en la figura 5.35a se observa la selección del punto de inyección del material fundido en el molde, en la figura 5.35b se da inicio a la inyección y en la figura 5.35c se observa en el molde las zonas que se encuentran identificadas con la leyenda de colores de acuerdo al tiempo de llenado, teniendo así como tiempo máximo 78 segundos que fue el calculado de acuerdo al flujo másico entregado por la inyectora y a la masa del apoyo de la mesa.

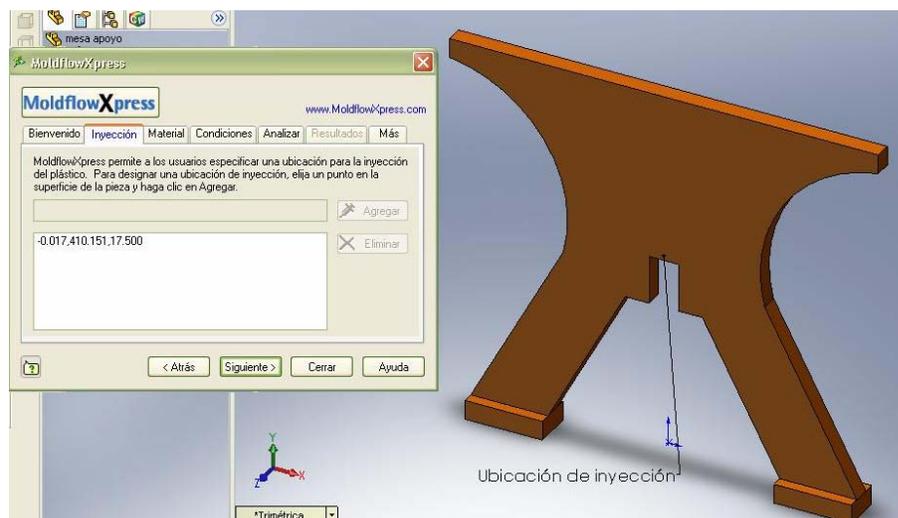


FIGURA 5.35A. SELECCIÓN DEL PUNTO DE INYECCIÓN EN EL MOLDE

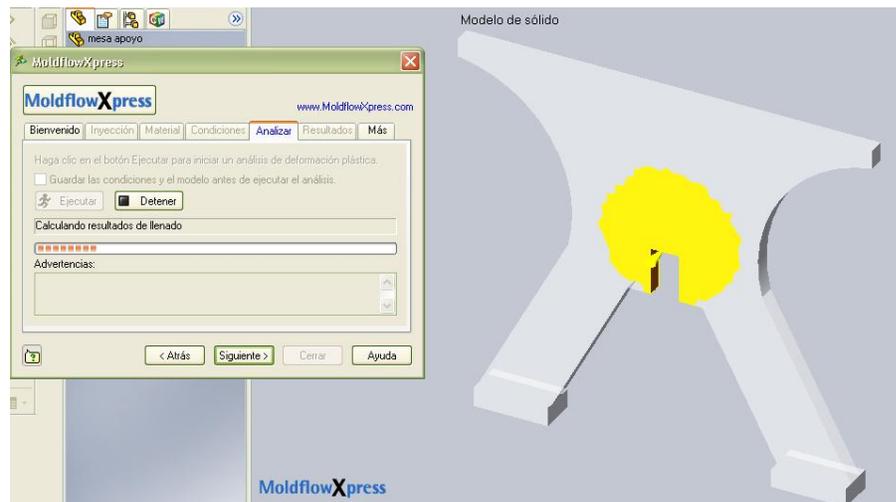


FIGURA 5.35B. INICIO DE OPERACIÓN DE MOLDEO

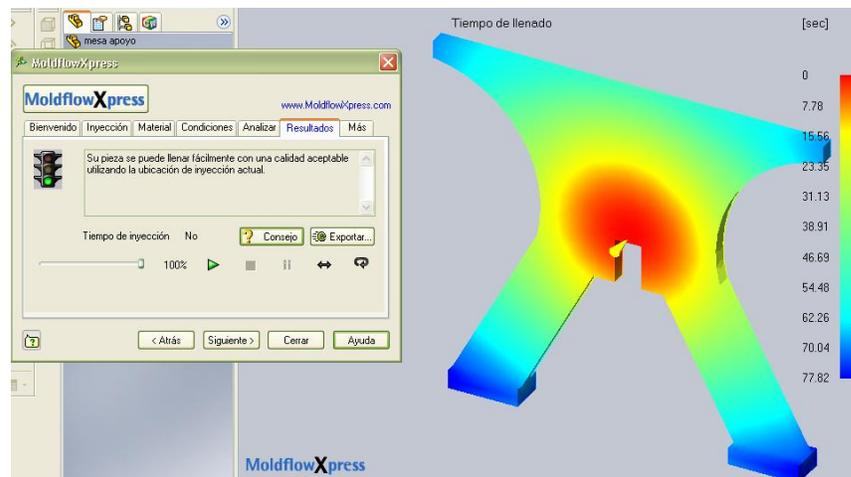


FIGURA 5.35C. TIEMPO DE LLENADO DEL MOLDE CON MATERIAL FUNDIDO Y SUGERENCIA DEL PROGRAMA

El programa CAD utilizado presenta una funcionalidad especial, que permite al diseñador darle un toque realista a un modelo creado. Así, siguiendo con el diseño creado se le dará un ambiente propicio para su puesta en funcionamiento. Así se observa la figura 5.36.



FIGURA 5.36. MODELO RENDERIZADO EN AMBIENTE EXTERIOR

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. La mezcla de reciclado post-consumo presentó en general un comportamiento variable en sus propiedades, debido primordialmente por la falta de separación de componentes que disminuyeron el rendimiento del reciclado.
2. En la mezcla de reciclado post-industrial se observó un incremento en las propiedades mecánicas debido a la homogeneidad que se tiene al conocer que realmente se está trabajando con un solo material.

3. Trabajos en extrusoras permiten desarrollar probetas para análisis como los efectuados en este trabajo que se pueden replicados en cualquier empresa plastificadora en el Ecuador.
4. Los materiales termoplásticos, como el HDPE, permiten trabajar en diversas condiciones de procesamiento, lo cual los convierten en materiales versátiles a la hora de proceder a su reciclaje.
5. El grado de degradación de los materiales termoplásticos utilizados incide en los resultados de las pruebas reológicas realizadas.
6. La Curva unificada de los polietilenos nos permite determinar y optimizar condiciones de procesamiento o porcentaje de reciclado aplicados en el ensayo.
7. Los programas CAE son herramientas importantes para ahorrar tiempos de producción de diseños nuevos debido a la aproximación eficiente a resolver problemas reales y físicos mediante su interfaz especializada.

8. Por medio del control de la geometría y del material, el diseñador mantiene la integridad del diseño; es decir, lo hace funcional, seguro, confiable, utilizable, fabricable y comerciable.

Recomendaciones

1. Se recomienda realizar procesos de separación adecuados con el fin de evitar posibles inclusiones de materiales ajenos en la mezcla que conlleven a pérdidas en las propiedades mecánicas y reológicas.
2. Desarrollo de distintas aplicaciones que se encuentran integradas a los programas CAE, así como diversas propuestas de diseño con el material desarrollado en esta tesis.
3. Al momento de realizar las placas que posteriormente servirán para realizar las diversas probetas, se deben de superponer unas placas finas dentro de la prensa para tener una calidad superficial mejor a la obtenida en la muestras.

4. En el proceso de extrusión entre cada pasada de material, se debe de tener en cuenta que dentro del tornillo se tienen residuos de material, que en cierta forma influirá al momento de obtener un nuevo material extruido.

5. Estudios de factibilidad de diseño y selección de diversos componentes para la extrusión de perfiles e inyección de apoyos se debe de estimar en un futuro.

6. En un futuro plantear la implementación y desarrollo de software especializados de diseño como herramienta de ayuda en el estudio de los diversos parámetros del diseño mecánico.

APENDICE A

DATOS ADICIONALES EN PRUEBAS DE TENSION ASTM D638

TABLA A1
PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 10-90 DE RECICLADO POST-CONSUMO

Método Tensile D638
Mezcla de 10-90

Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre	Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]
3,17	123,57	306,46					306,46
3,17	119,57	296,54		201,59	40		296,54
3,17	123,71	306,81		305,75	16		
3,4	109,14	252,5		239,77	12		252,5
3,73	108,64	229,11					229,11
4,01	120,86	237,13		236,14	14		231,94

TABLA A2
PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 20-80 DE RECICLADO POST-CONSUMO

Método Tensile D638
Mezcla de 20-80

Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre	Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]
3,61	115,86	252,93					252,93
3,4	111,71	258,44		76,34	36		258,44
3,91	123	247,6		99,21	66		247,6
3,35	109,57	257,33		145,77	32		257,33
3,81	119,14	246,23					246,23
3,71	114	242,06		213,54	25		242,06

TABLA A3

PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 30-70 DE RECICLADO POST-CONSUMO

Método Tensile D638

Mezcla de 30-70

Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre	Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]
4,01	112,29	220,31		87,31	23		220,31
3,91	117,79	237,1					237,1
3,61	111,86	244,2					244,2
3,45	104,43	238,04					238,04
3,51	108,93	244,7					244,7
3,76	115,5	241,93					241,93

TABLA A4

PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 40-60 DE RECICLADO POST-CONSUMO

Método Tensile D638

Mezcla de 40-60

Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre	Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]
4,11	123,14	235,64					235,64
3,51	109,29	245,5					245,5
3,91	116,71	234,74					234,94
3,51	110,36	247,9					247,9
4,01	119,64	234,74		83,67	24,1		234,74
3,71	114,07	242,21					242,21

TABLA A5

PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 10-90 DE RECICLADO POST-INDUSTRIAL

Método Tensile D638

Mezcla de 10-90									
Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre	Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm ²]
4,29	152,14	279,08					279,08	20,6	4261,47
4,29	149,57	274,36					274,36	21,9	2535,06
4,32	151,71	276,66					276,66	22,3	3089,61
7,01	217,57	244,37					244,37	22,1	2777,59
6,93	204,29	231,97					231,97	20,1	2615,07
6,81	204,71	236,8					236,8	21,5	3013,31

TABLA A6 PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 20-80 DE RECICLADO POST-INDUSTRIAL

Método Tensile D638

Mezcla de 20-80									
Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre	Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm ²]
3,91	127,71	257,09		82,25	305,1		257,09	21,4	1753,59
4,01	129,43	253,94		108,19	98,9		253,94	21,2	3179,61
4,09	131,71	253,61					253,61	20,5	3841,14
3,4	108,21	250,35					250,35	22,2	2118,21
3,43	110,57	253,91					253,91	21,9	2216,53
3,45	111,43	253,99					253,99	20,7	3525,88

TABLA A7

PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 30-70 DE RECICLADO POST-INDUSTRIAL

Método Tensile D638

Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Mezcla de 30-70			Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm ²]
			Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre				
5	170,14	267,74					267,74	19,2	3918,00
5,36	167	245,36					245,36	19,3	3862,17
5,23	166,71	250,88					250,88	19,8	2725,46
4,37	136,43	245,89					245,89	21,2	3869,27
4,34	136,43	247,33					247,33	20	4003,80
4,37	139,43	251,3					251,3	20,1	3775,60

TABLA A8 PRUEBAS ASTM D638 EN MEZCLAS 40-60 DE RECICLADO POST-INDUSTRIAL

Método Tensile D638

Espesor [mm]	Carga máxima [Kg]	Esfuerzo máximo [Kg/cm ²]	Mezcla de 40-60			Carga de Fluencia [Kg]	Esfuerzo de Fluencia [Kg/cm ²]	% Elongación a la Fluencia	Módulo tangente [Kg/cm ²]
			Carga de ruptura [Kg]	Esfuerzo de ruptura [Kg/cm ²]	% Elongación de Quiebre				
6,05	184,57	240,41		104,48	43		240,41	19,7	3685,58
6,15	204	261,32		75,85	82		261,32	20,8	3426,16
6,1	193,57	250,03		88,39	297		250,03	21,8	1684,95
4,39	139,43	249,84					249,84	19,9	3410,06
4,37	136,29	245,63					245,63	21,4	3166,53
4,32	137,71	251,13		79,71	291		251,13	21,6	1740,37

APENDICE B

GRAFICAS ADICIONALES



FIGURA A1. PROBETA DE IMPACTO IZOD CON MEZCLA DE POST-INDUSTRIAL



FIGURA A2. PROBETA MEZCLA DE POST-INDUSTRIAL ENSAYADA EN EL TENSOMETRO Q-TEST I

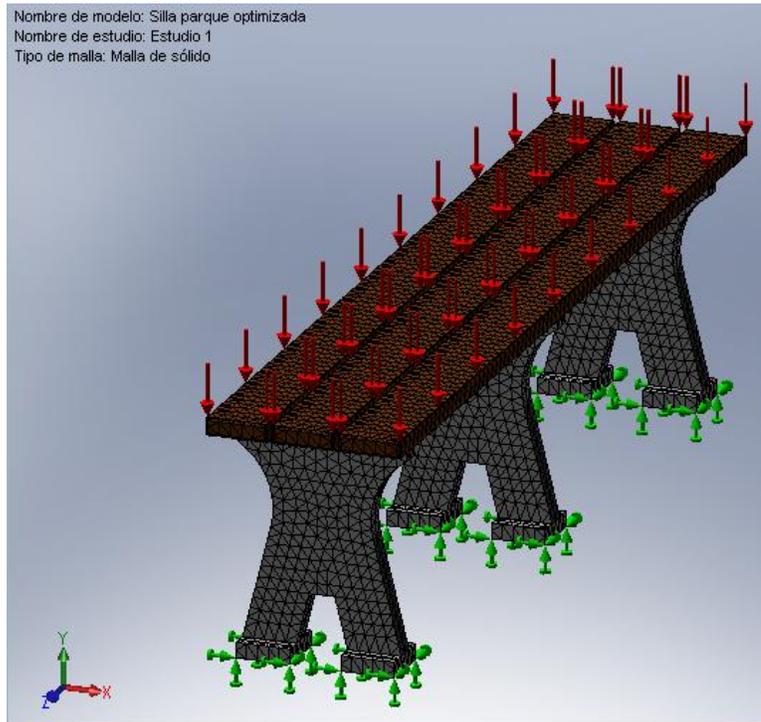


FIGURA A3. SILLA OPTIMIZADA CON SU RESPECTIVO MALLADO

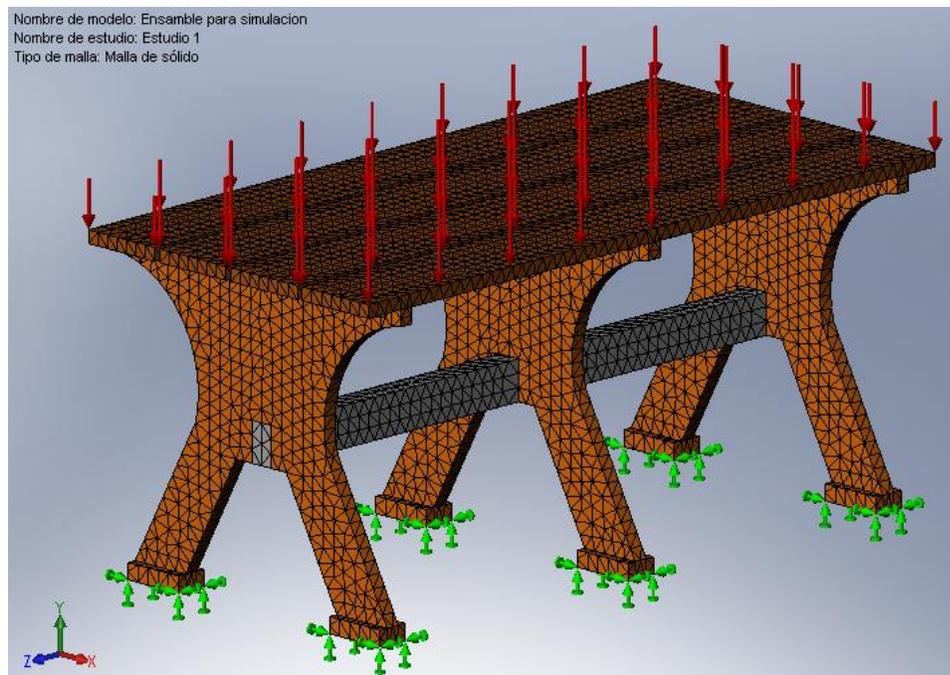


FIGURA A4. MESA OPTIMIZADA CON SU RESPECTIVO MALLADO

APENDICE C

Para los ensayos de mezclas de reciclado post-industrial se obtuvieron los siguientes valores:

**TABLA A9
RESULTADOS DE LA PRUEBA ASTM D1525 EN MEZCLA DE
RECICLADO POST-INDUSTRIAL**

Método de Prueba ASTM D1525	
Porcentaje de las mezclas	Temperatura de Ablandamiento [°C]
10%-90%	126
20%-80%	126.4
30%-70%	126.6
40%-60%	126.6

BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

- [1] "Termoplásticos", consulta realizada en julio 2007,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic>
- [2] "Termoplásticos", consulta realizada en julio 2007,
<http://www.pslc.ws/mactest/plastic.htm>
- [3] "Polietileno", consulta realizada en junio 2007,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>
- [4] "Polietileno", consulta realizada en junio 2007,
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno>
- [5] "Estructura de los polietilenos", consulta realizada en junio 2007,
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/estructura>
- [6] "Propiedades de los Polietilenos", consulta realizada en junio 2007,
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades>
- [7] "Relación entre la estructura y las propiedades de los polietilenos", consulta realizada en junio 2007,
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/relacion>
- [8] "Usos y aplicaciones de Polietilenos", consulta realizada en junio 2007,
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/usos>

- [9] Alarcón Fernández Salvador, Francisco, Revista Tecnológica ASEPLAS, 2005 1era Edición, pp 10-13
- [10] Encyclopedia of Polymer Science and Technology, vol. 2, pp 497-505
- [11] MORTON – JONES, (2004) Procesamiento de Plásticos, Editorial Limusa S.A., pp 95-134, 77-79
- [12] MENDEZ, A., PALACIOS, M., CEDILLO, R., (2004), Folleto Reciclado de Materiales Termoplásticos, pp 2, 3, 7-15,27-39, 59-74
- [13] "El reciclado de plásticos", consulta realizada en agosto 2007, <http://www.monografias.com/trabajos18/reciclado-plasticos/reciclado-plasticos.shtml>
- [14] RAUWENDAAL, CHRIS AND NORIEGA, MARIA DEL PILAR E., Troubleshooting the Extrusion Process, Editorial Carl Hanser, 2001, pp 50-70
- [15] "Reciclaje de Termoplásticos", consulta realizada en junio 2007, www.monografias.com
- [16] RIGAIL, A. "Aplicaciones del Melt flow Index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos"
- [17] CORREA, C., TAPIA, C., ROSE, C., "Diseño parametrizado y análisis del elemento finito como una integración sistematizada para el desarrollo de aplicaciones ingenieriles"