

Evaluación de Polietilenos de Alta Densidad Reciclados para aplicación en Mobiliario Urbano.

Bravo Q. Andrés ⁽¹⁾; Rigail-Cedeño Andrés ⁽²⁾

Área de Materiales y Procesos de Transformación / Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil - Ecuador

(1) abravo@espol.edu.ec (2) arigail@espol.edu.ec

Resumen

La reciclabilidad de los productos plásticos es importante para la disminución de desperdicios; su procesamiento y evaluación de propiedades determinarán posibles aplicaciones. 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 el presente trabajo 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.

Palabras Claves: *Plásticos reciclados, Extrusora Simple, Programas CAD, Programas CAE.*

Abstract

Recyclability of plastics products is important for waste's decrease; processing and properties evaluation of these products will determine its possible applications. Worldwide, many enterprises have begun to develop many products manufactured with recycled materials, obtaining new alternatives using materials considered like wastes. In Ecuador, products manufactured with this materials are very poor, this is dangerous for the country's economy because Ecuador lack of petrochemical industry, but over all, is harmful for ecosystem because that, as known, plastics take much time until decomposition. In this paper we will compare mechanicals properties for a non-process HDPE with different blends of recycled HDPE from 60% to 90%. We will determine compound applications that works better in mechanical terms and, besides we will develop an application design for urban furniture industry using CAD and CAE programs to simulate the product performance with the mechanicals properties found in recycled compounds developed.

Key Words: *Recycled Plastics, Single extruder, CAD programs, CAE programs.*

1. Introducción

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.

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.

Dentro de los objetivos del trabajo presentado, se pretende 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.

Un termoplástico es un material polimérico deformable que puede adquirir cualquier forma determinada mediante la adición de calor. Algunos termoplásticos normalmente no se cristalizan: ellos son denominados plásticos amorfos y son útiles a temperaturas por debajo de T_g [1]. 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 [2]. Por la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas.

1.1 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 (Fig. 1) [3].



Figura 1. Extrusora de Tornillo Simple donada por Plastigama luego de su reconstrucción

1.2 Reciclaje de termoplásticos

La idea del reciclado de materiales termoplásticos, que originan residuos sólidos y la contaminación que estos producen, han llevado a desarrollar técnicas las cuales permiten el manejo idóneo de las sustancias mencionadas.

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 [4].

2. Procedimiento Experimental.-

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. 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

Estas dosis serán procesadas en la extrusora donada por Plastigama.

Una vez preparada la mezcla se realizarán placas con medidas de 200 mm x 70 mm con espesores entre 3-4 mm en una prensa hidráulica, que según la norma ASTM 1928 tiene que estar a una temperatura de 150°C y una presión de 10 MPa.

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.

Dichas probetas servirán para efectuar los diversos estudios de desempeño mecánico y reológico de las mezclas realizadas en la extrusora. Las pruebas que se realizarán son:

- 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

3. Resultados y Discusión.-

Se requiere estudiar el comportamiento de las mezclas desarrolladas de reciclado post-consumo y reciclado post-industrial.

Tabla 1. Valores Promedios de Ensayo de Tensión de reciclado de post-consumo

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

Tabla 2. Valores Promedios de Ensayo de Tensión de reciclado de post-industrial

| Método ASTM D638 | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Porcentaje de las mezclas | Esfuerzo máximo [Kg/cm ²] | Módulo de Young [Kg/cm ²] |
| 10%-90% | 257,21 | 3048,69 |
| 20%-80% | 253,82 | 2772,49 |
| 30%-70% | 251,42 | 3692,38 |
| 40%-60% | 249,73 | 2852,27 |

Se observa de las tablas 1 y 2 los valores para evaluar las propiedades tensiles de las mezclas. En la tabla 1 los valores de Esfuerzo máximo se encuentran dispersos en comparación con el reciclado post-industrial. A continuación se exponen los resultados para las pruebas IZOD, en la tabla 3 constan los valores obtenidos para la mezcla de reciclado post-consumo.

Tabla 3. Resultados de Prueba IZOD en mezcla de reciclado de post- consumo

| 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 4.11 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. Luego se observan los datos obtenidos para la mezcla de reciclado post-industrial en la Tabla 4, en comparación con la tabla anterior se pueden observar valores más altos en la Energía de Fractura y Deformación por unidad de Longitud mencionando así la uniformidad general en las propiedades de ésta última 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.

Tabla 4. Resultados de Prueba IZOD en mezcla de reciclado post- industrial

| 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 |

Esto es observable mayormente en algunas de las probetas troqueladas para las pruebas IZOD (Figura 2).



Figura 2. Probeta ensayada con plástico desconocido en su interior

Gracias a la prueba del MFI, según indica la norma, se puede determinar el valor FRR, que 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. Con los datos obtenidos (tabla 5 y 6) se proceden a realizar los cálculos para la determinación de la Curva Unificada de los Polietilenos, la cual está ampliamente desarrollada en el artículo presentado por el M.Sc. Andrés Rigail en el trabajo “Aplicaciones del Melt flow Index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos” [5], lo cual se ha tomado como referencia importante para la determinación de los valores de este trabajo. Es muy útil para este propósito utilizar los datos mostrados en la figura 5.

Tabla 5. Resultados de la Prueba ASTM 1238 con 2.16 Kg. (Reciclado Post-consumo)

| Método de Prueba ASTM 1238 | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------|
| Porcentaje de mezclas | ρ [g/cm ³] | 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 | 0,547 | 35791,93 | 0,23 |
| 40%-60% | 0,776 | 0,45 | 43565,23 | 0,19 |

La figura 3 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.

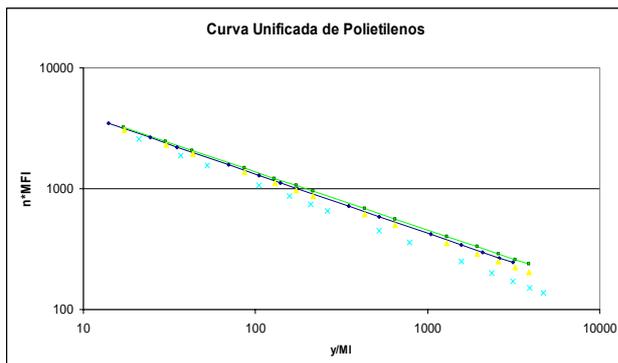


Figura 3. Curva Unificada de los polietilenos para mezcla de reciclado post-consumo y virgen

De igual manera se procede a trazar la curva para la mezcla de reciclado post-industrial, mostrado en la figura 4.

Tabla 6. Resultados de la Prueba ASTM 1238 con 2.16 Kg, (Reciclado post-industrial)

| Método de Prueba ASTM 1238 | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------|
| Porcentaje de mezclas | ρ [g/cm ³] | 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 |

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.

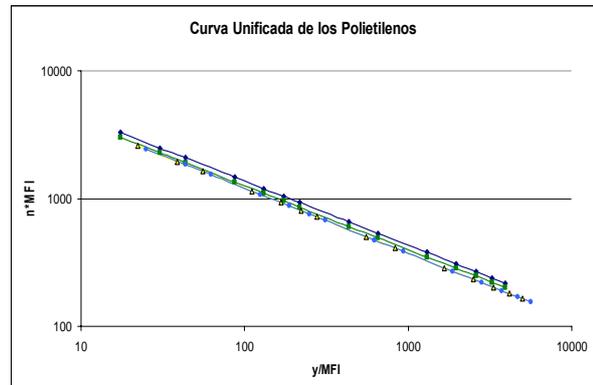


Figura 4. Curva Unificada de los polietilenos para mezcla de reciclado post-industrial y virgen

La mezcla de material con propiedades mecánicas y reológicas aceptables es la de 20-80 en reciclado post-industrial. Al ser un material homogéneo garantiza un comportamiento considerablemente bueno para el desempeño del producto que se va a desarrollar.

4. Diseño del Producto.-

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, como indica la referencia, en la figura 5.

4.1. Requerimientos Geométricos y Funcionales

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. [6]

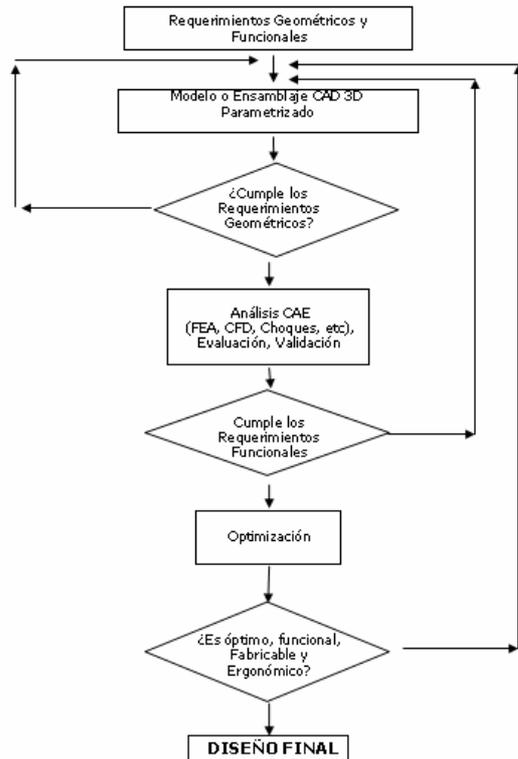


Figura 5. Algoritmo para el desarrollo de un producto

4.2. Diseño mecánico y Optimización de Masa

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, como se muestra en la figura 6.

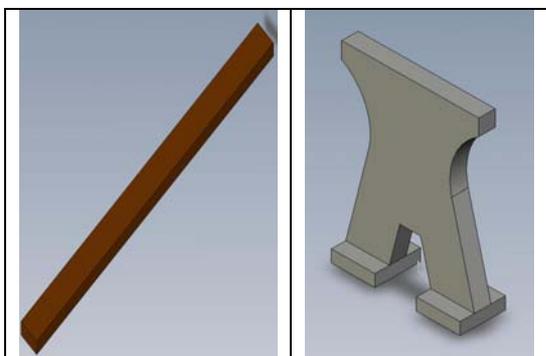


Figura 6. Elementos que conforman la silla

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 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 7.

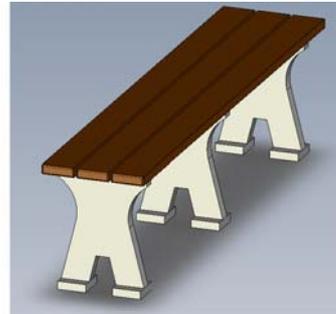


Figura 7. Silla armada usando herramientas CAD

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. Así se observa en la figura 8.

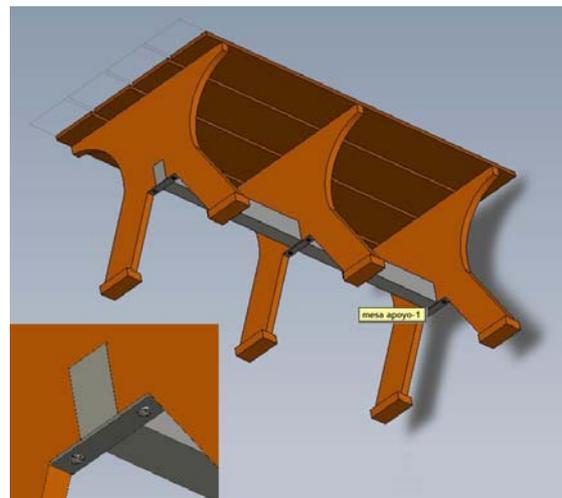


Figura 8. Mesa armada usando herramientas CAD

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.

4.3. 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 9, en relación a la silla. Se hará el análisis y presentación de

datos para el análisis optimizado de los elementos creados.

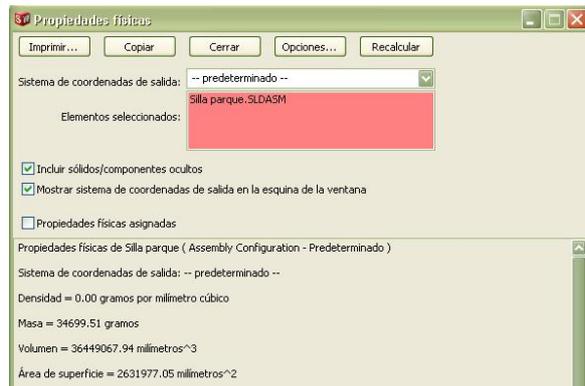


Figura 9. Propiedades físicas de silla optimizada

Se aplica la presión de 1400 N/m² como carga uniforme a lo 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 10 y 11.

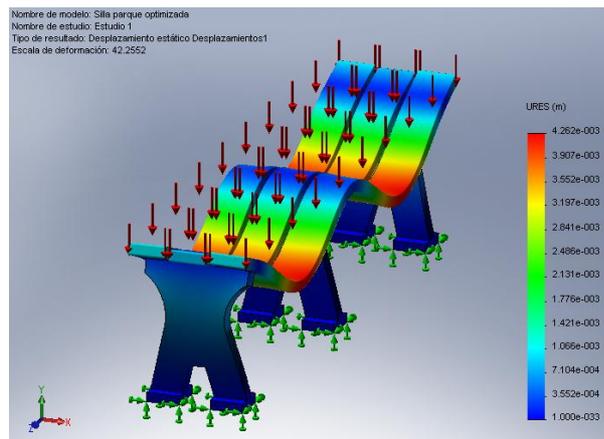


Figura 10. Análisis de deformación de silla optimizada

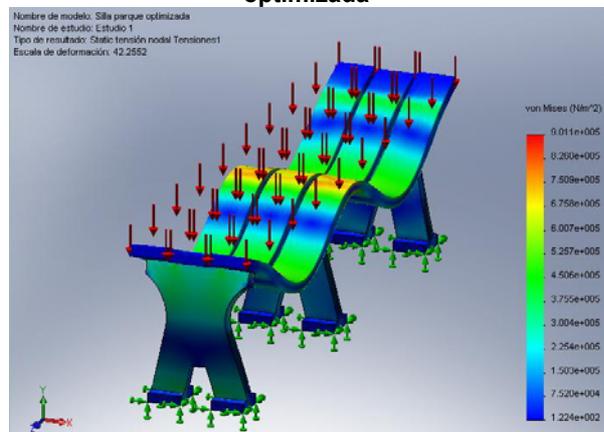


Figura 11. Análisis de tensión de silla optimizada

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.

El mismo procedimiento se realiza para el análisis de la mesa, mostrado en la figura 12 y 13.

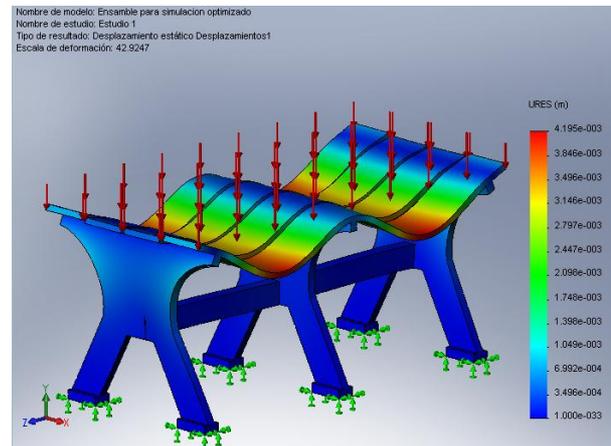


Figura 12. Análisis de Deformación de la mesa optimizada

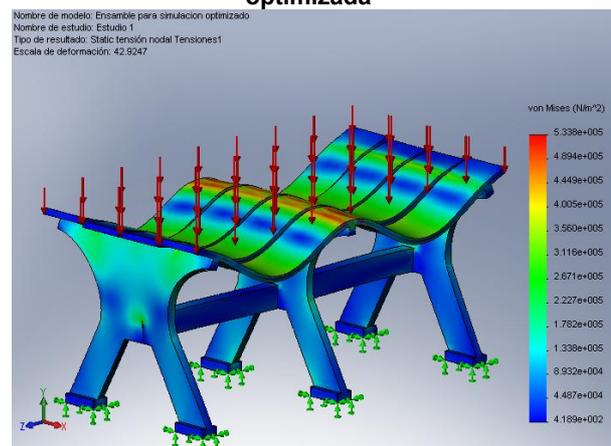


Figura 13. Análisis de Tensión de la mesa optimizada

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 7 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 7. Determinación de Factor de Diseño

| Pieza | Esfuerzo de fluencia [N/m ²] | Esfuerzo máximo de von-Mises [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.

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 en la figura 14.



Figura 14. Modelo renderizado en ambiente exterior

5. Conclusiones y recomendaciones

- 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.
- 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.
- El proceso de extrusión realizado en la extrusora de tornillo simple donada por Plastigama nos permite reproducir una experiencia industrial.
- Los materiales termoplásticos permiten trabajar en diversas condiciones de procesamiento, lo cual los convierten en materiales versátiles a la hora de proceder a su reciclaje.

- 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.
- 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.
- 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.
- Este trabajo abre el campo para desarrollo de programas de estudio de diseño para los compañeros de cursos inferiores en los que la enseñanza de un programa fortalezca los conocimientos impartidos de buena forma en la universidad.

6. Agradecimientos.-

Se agradece a la Asociación Ecuatoriana de plásticos Aseplas por el uso de equipos y a la Ing. Jenny Venegas, por la paciencia prestada en la elaboración de los ensayos vitales para la presentación del presente trabajo.

A Polimallas y a la Ing. Pilar Vera, por el préstamo del Tensómetro para realizar las pruebas de Tensión.

A Plásticos Ecuatorianos por la donación del molido de Petrothene.

7. Referencias.-

- [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] MORTON – JONES, (2004) Procesamiento de Plásticos, Editorial Limusa S.A., pp 95-134, 77-79
- [4] MENDEZ, A., PALACIOS, M., CEDILLO, R., (2004), Folleto Reciclado de Materiales Termoplásticos, pp 2, 3
- [5] RIGAIL, A. “Aplicaciones del Melt flow Index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos”
- [6] CORREA, C., TAPIA, C., ROSE, C., “Diseño parametrizado y análisis del elemento finito como una integración sistematizada para el desarrollo de aplicaciones ingenieriles”.