

ISBN 978-950-42-0173-1



# CADI 2016

7,8 Y 9 DE SEPTIEMBRE  
RESISTENCIA - CHACO



## III CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA

En conjunción con:

### CAEDI 2016

IX CONGRESO ARGENTINO DE  
ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA



**UNIVERSIDAD  
TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL  
RESISTENCIA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
DEL NORDESTE  
FACULTAD  
DE INGENIERÍA**



**confedi**

ISBN 978-950-42-0173-1

**Editores:**

Alejandro Farias  
Jorge Pilar  
Cesar J. Acuña

# **CADI 2016**

## **III CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA**

En conjuncion con:

### **CAEDI 2016**

### **IX CONGRESO ARGENTINO DE ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA**

**7,8 y 9 de Septiembre de 2016**  
**Resistencia | Chaco | Argentina**

Actas del III Congreso Argentino de Ingeniería: CADI 2016. 1º Edición  
Compilado por Alejandro Rubén Farías, Jorge Pilar, César J. Acuña  
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Resistencia - 2016.  
Libro digital, PDF - Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-950-42-0173-1

# DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTOS DE PLÁSTICO ABS PARA USO DE IMPRESORAS 3D

**Matías Carbonell<sup>\*1</sup>, Maximiliano Bondesani Atamañuk<sup>1</sup>, Enzo Ramirez<sup>1</sup> y Héctor Zarabeitia<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

Av. Las Heras 727 – Resistencia, Chaco – Argentina  
<sup>\*</sup>matias.carbonell@yahoo.com

**Resumen**— Las máquinas extrusoras son equipos muy importantes en la industria plástica. Su funcionamiento se basa en un proceso termomecánico, en el cual se utilizan polímeros termoplásticos. El material se introduce en forma de gránulos por la zona de alimentación (tolva) y cae en un cilindro previamente calentado. El cilindro cuenta con un simple husillo que desplaza el material fundido forzándolo a pasar por una boquilla (dado). El material ya conformado se enfriá lentamente y se solidifica mediante un sistema de enfriamiento, luego es recogido por un sistema de arrollamiento.

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar una máquina extrusora de plástico para fabricar filamentos de impresoras 3D a partir de: los plásticos recuperados de residuos electrónicos, se busca de esta manera dar valor nuevamente a estos materiales reciclados mediante la generación de un producto tecnológico demandado por el mercado de las impresoras 3D y además adquirir conocimientos acerca del comportamiento que poseen los diferentes plásticos como filamentos.

Como conclusión, se considera que las características de la máquina desarrollada (bajo costo, sencilla operación, posibilidad de extruir distintos plásticos) permitirán que sea utilizada por entes públicos (universidades, plantas municipales de tratamiento de residuos) y privados (cooperativas de reciclado de plásticos, usuarios de impresoras 3D).

**Palabras Claves**—*Extrusora de filamentos, impresora 3D, diseño de máquina, termoplásticos, reciclado.*

## 1. Introducción

El proyecto nace con la solicitud de la Facultad de Ingeniería y el Centro de Gestión Ambiental y Ecología – CEGAE, ambas instituciones de la Universidad Nacional del Nordeste – UNNE en la convocatoria del año 2014 del programa “Universidad, Diseño y Desarrollo Productivo”, de la Subsecretaría de Gestión y Coordinación de Políticas Universitarias. El mismo tiene como objetivo desarrollar en esta primera etapa una máquina prototipo extrusora de plástico ABS (Acilonitrilo – Butadieno – Estireno) para fabricar filamentos de impresoras 3D. El prototipo fue desarrollado para utilizarse en primera instancia por los materiales plásticos recuperados de los residuos informáticos del proyecto EcoCompus de la FI y el CEGAE [1] y posteriormente por cooperativas de reciclado de materiales plásticos, universidades nacionales y otros usuarios particulares. También busca agregar el valor a los plásticos recuperados mediante la generación de un producto tecnológico demandado por el mercado creciente de las impresoras 3D, y además adquirir conocimientos del comportamiento de distintos plásticos como filamentos. En la figura 1, se muestran la máquina extrusora y los residuos de plásticos informáticos.

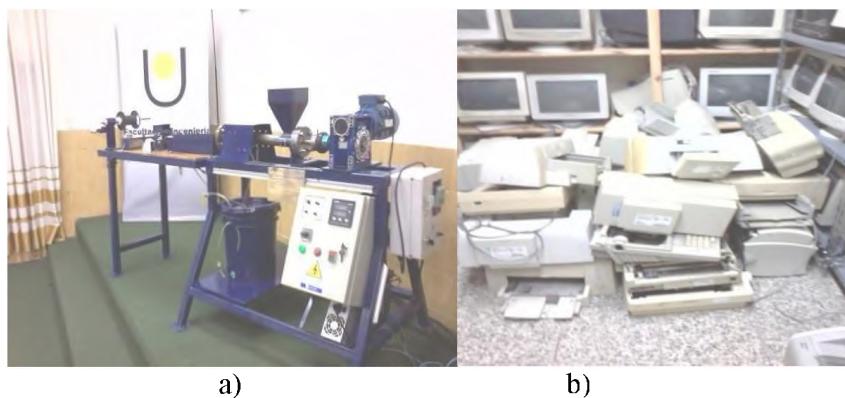


Figura 1.a) Máquina Extrusora. b) Residuos de plásticos informáticos.

Como impacto de este proyecto es el reciclado de plásticos, es de gran importancia la problemática ambiental, cada vez resulta más necesario los proyectos de innovación tecnológicos que aporten al reciclado de residuos de plásticos. Vivimos rodeados de plásticos en nuestra vida cotidiana como por ejemplo, estos polímeros se encuentran en partes de piezas de los automóviles, envases de alimentos, juguetes, carcasa de artefactos electrónicos, etc. Solamente en Buenos Aires y en el CABA se generan cerca de 500.000 tn/año de residuos de plásticos en el cual se encuentra el ABS [2].

En EcoCompus hay aproximadamente más 50 kilogramos de trozos de impresoras y monitores para ser reciclado como material ABS. En la figura 2 se observan los materiales triturados y el filamento como producto final.

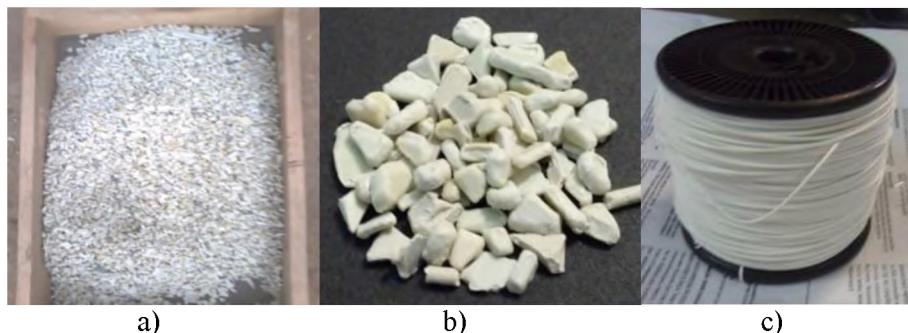


Figura 2. a) Material ABS triturado. b) Material ABS seleccionado c) Filamento ABS.

Los materiales a extruir fueron en primera instancia el polímero termoplástico ABS de los residuos de plásticos donde se observan en la figura 2, los mismos fueron seleccionado y triturado para el proceso de extrusión el cual se realiza mediante la utilización de un tornillo o husillo que arrastran el material desde una zona de carga a lo largo de una camisa que es calentada desde el exterior mediante resistencias eléctricas, a medida que el tornillo arrastra el material que generalmente se encuentra como pellets, este se va calentando, fundiendo y homogenizándose. Debido a la presión que origina el arrastre del tornillo y acumulación de material contra el dado, este es forzado a salir con la forma que posea el mismo, permitiéndose obtener el producto con la forma y longitud deseada.

Como objetivo general de este proyecto es desarrollar los cálculos, diseño y construcción de la máquina extrusora, también se apuntó a la producción del mismo. El prototipo diseñado es una máquina flexible que cuenta con un sistema de dados extrusores intercambiables, el cual permite la fabricación de las dos medidas del filamento utilizadas en las impresoras 3D: 1.75mm y 3mm de diámetro. La máquina cuenta además con el valor agregado que le aportan los innovadores que son los sistemas de: refrigeración del filamento extruido, arrastre del filamento una vez refrigerado, devanador y arrollamiento; dicho sistema es automatizado con un lazo de control programado por una placa microcontroladora ARDUINO.

## 2. Materiales y Métodos

Para el cálculo, diseño y selección de las partes constitutivas de los dispositivos de la máquina extrusora se recurrió a los criterios descriptos en la bibliografía “Transformación del plástico” de V. K. Savgorodny, [3] que provee formulas empíricas para el dimensionado del husillo, y también criterios propios de los autores escapando de la bibliografía.

El ensamblaje de la máquina fue llevado a cabo en el Taller del Departamento de la Facultad de Ingeniería – UNNE. Además, se tuvieron en cuenta trabajos desarrollados en Jurich Construcciones [4] y el maquinado de las piezas tales como el cilindro y el husillo extrusor en La Nueva Metalúrgica Boissiere [5].

### 2.1 Cálculo y diseño del conjunto del husillo y camisa

Si bien todos los elementos de la máquina son indispensables para su funcionamiento, este conjunto es fundamental debido a que ello depende del rendimiento de la máquina y del bombeo del material a extruir a través del dado.

El husillo es el órgano más importante de la máquina, siendo el parámetro principal el diámetro. Los parámetros de la misma son: el diámetro del husillo, la relación de su longitud

con respecto al diámetro (L:D), y la velocidad de giro del husillo. Se decidió adoptar un diámetro de husillo de 32 mm, ya que se trata de una extrusora prototipo donde se apuntó llegar a una producción promedio de 1 kg/h. Además, por razones técnicas y constructivas, se determinó que es un diámetro conveniente para trabajarla en el torno, ya que uno menor, daría lugar al pandeo, para la longitud requerida. El mismo está compuesto por tres zonas funcionales, que pueden ser apreciables a simple vista en la Figura 3.

La Zona de Alimentación, el material que ingresa en forma de pellets por la tolva es transportado hacia el dado, el husillo en ese primer tramo tiene la función de transportar el material el cual se precalienta debido al rozamiento entre pellets.

Luego el material continua su recorrido hacia el dado donde los pellets en estado sólido y precalentados comienzan a mezclarse con el material que se encuentra en estado fundido, atravesando así la Zona de Transición.

Ese material en estado completamente fundido pasa a la Zona de Dosificación donde existen dos posibilidades, si el husillo es de alma variable la compresión se realiza entre este y la camisa, y si es de alma constante como en este caso, la elevación de presión se produce por compactación del material contra el dado.



Figura 3. Zonas del simple husillo.

A partir del diámetro se determinó los parámetros restantes del husillo, en la siguiente figura 4 se detallan estos parámetros.

- D: Diámetro del husillo.
- t: Paso del husillo.
- e: Espesor de la cresta del filete.
- $\varphi$ : Angulo de la hélice.
- h: Profundidad del canal helicoidal.
- $\delta$ : Huelgo radial entre cresta del filete del husillo y la camisa.

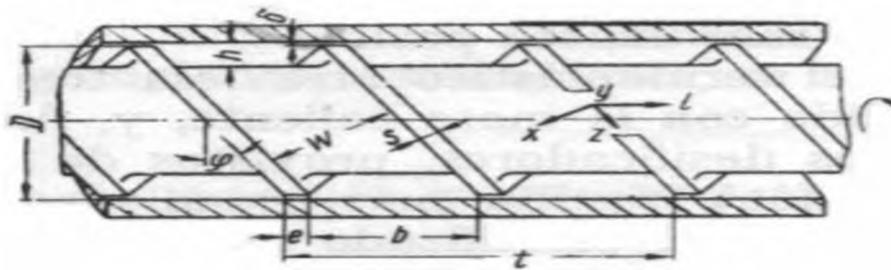


Figura 4. Parámetros del husillo.

Una de las partes esenciales de la máquina extrusora es la camisa. En su interior se aloja el tornillo extrusor, y debe ser lo suficientemente resistente para soportar presiones altas, elevadas temperatura y además ser resistente al desgaste y corrosión.

En el exterior del cilindro van instalados unos dispositivos especiales previstos para calentar el cilindro, las resistencias eléctricas tipo sunchos. En la zona de alimentación del tornillo se encuentra la tolva de carga. El rodamiento de empuje axial y el buje se encuentran la parte posterior de la camisa, y en la parte delantera se fija el dado extrusor. Para el desarrollo del cilindro se seleccionó un tubo comercial normalizado de 54mm de diámetro de exterior y 32mm diámetro interior. En la figura 5 se puede observar dichos elementos.



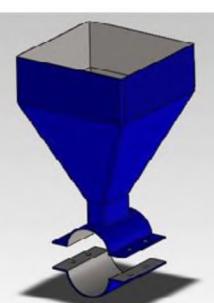
a)



b)



c)



d)

Figura 5. a) Camisa. b) Camisa con las resistencias eléctricas. c) Orificio de ingreso de la materia prima. d) Tolva de carga.

## 2.2 Cálculo y diseño del dado extrusor

Tiene la función de guiar el material que se encuentra en estado fundido sometido a presión, darle la forma y diámetro requerido

Este se caracteriza por un constante “K” llamado coeficiente de forma geométrica, que se obtiene a partir de cálculos analítico, el cual se utiliza para determinar el caudal del tornillo. Por esta razón al variar el diámetro y forma del filamento a extruir, variara la producción que se consigue. En la figura 6 se representa el dado extrusor, donde el mismo lleva el pico extrusor que intercambiable.

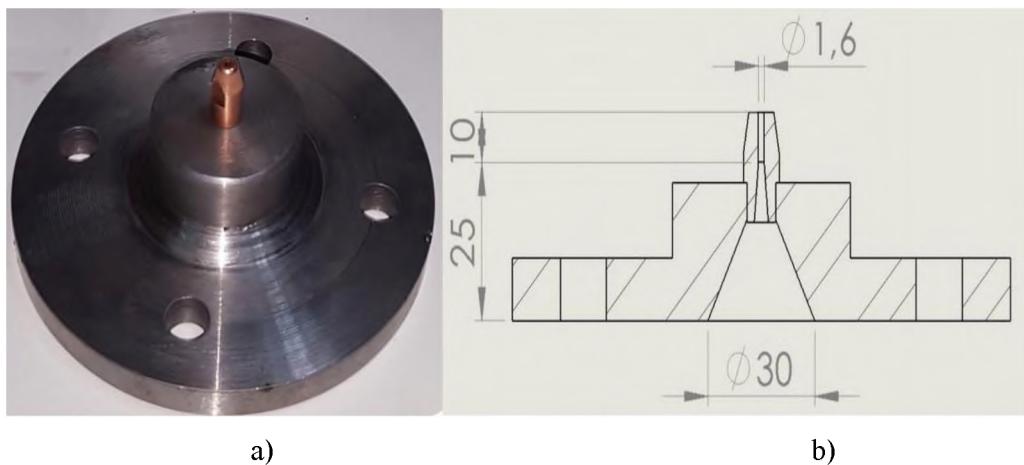


Figura 6. a) Dado extrusor. b) Corte del dado extrusor.

Para determinar la constante K del dado se calculó con la bibliografía ya citada anteriormente, donde establece que el cabezal se divide en sucesivas zonas de diferente configuración, y se determina para cada una de ellas la constante  $K_i$  que está en función de la forma geométrica del elemento. Particularmente, este dado tiene dos zonas, una cónica y otra cilíndrica. Estos coeficientes son: coeficiente de forma geométrica zona cónica, coeficiente de forma geométrica zona cilíndrica y finalmente la constante del cabezal o dado.

## 3. Selección del moto-reductor

La elección del moto-reductor de la máquina extrusora se efectúa de acuerdo a la exigencia del tornillo (capacidad, producto, materia prima). De acuerdo a esto y por medio de cálculo realizado en la potencia.

Según los cálculos se opta por el siguiente moto-reductor: a tornillo sinfín y corona modelo PFM 90 - relación de transmisión  $i=1:60$ , eje de salida hueco  $\varnothing = 35$  mm, motor eléctrico asincrónico trifásico normalizado de 1 HP - 1400 RPM - 220 / 380 Vca - 50 Hz IP55 - IEC 90L/B5. Cantidad de vueltas por minuto en el eje de salida = 23 RPM.



Figura 7. Moto-reductor.

#### 4. Sistema de automatización

El primer sistema de automatización de la máquina es el control de temperatura, se realiza mediante un pirómetro con acción de control PID controlando y ajustando la temperatura deseada de extrusión.

Luego cuenta con un sistema de automatización de la mesa de accesorio que se encarga de refrigerar, arrastrar y arrollar el filamento una vez extruido. Esto fue diseñado a partir de elementos reciclados de las maquinas fotocopiadoras e impresoras fuera de uso, tales como los motores de cada mecanismo. La programación es a través del software de la placa Arduino Uno y el Mega 2560.

En la figura 8 se observa los mecanismos de la mesa de accesorio.

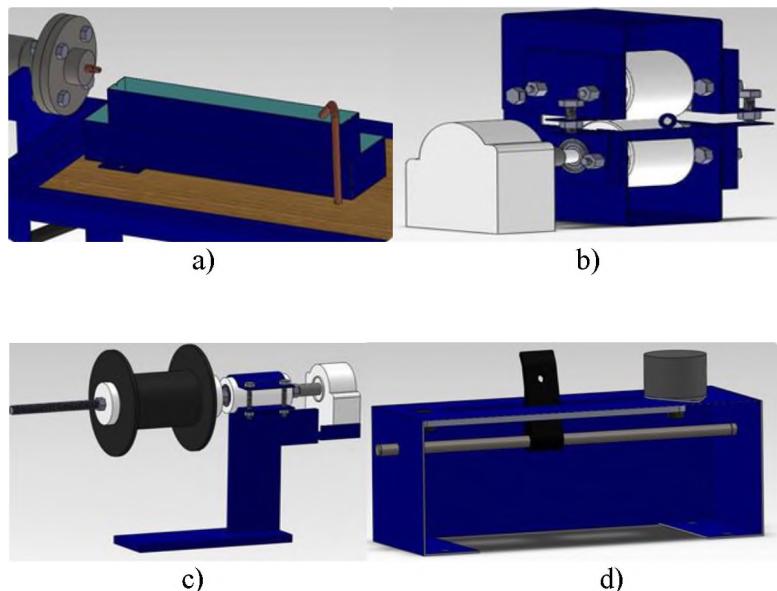


Figura 8. a) Sistema de refrigeración. b) Mecanismo de arrastre. c) Devanador. d) Mecanismo de arrollamiento.

## **5. Resultados y Discusión**

Como objetivo en esta primer etapa era la fabricación de la maquina prototipo, una vez finalizado procedimos a ensañar.

A partir de los pellets de ABS obtenidos de las carcasas, como objetivo es producir un filamento que posea un acabado superficial liso y un diámetro uniforme durante toda su longitud para que sea apto su uso en la impresión 3D bajo las siguientes hipótesis:

- Diámetro del filamento: 1.75mm.
- Material: pellets de ABS de carcasas.
- Temperatura de extrusión: 230°C (temperatura de fusión de ABS).
- Velocidad de rotación: 23 rpm (velocidad del eje de salida del moto-reductor).
- Diámetro del pico extrusor: 1.6mm.
- Producción: 1kg/h.
- Enfriamiento del filamento a la salida del pico extrusor mediante aire.
- Producto final carrete con el filamento distribuido uniformemente.

A partir de varios ensayos, en el que se llevó a cabo, la máquina respondió acorde a los cálculos teóricos, en cuanto al caudal y potencia demandada al moto-reductor, no así en cuanto al acabado del núcleo y superficial, ni a la resistencia del filamento obtenido. Además, la distancia estipulada en el sistema de enfriamiento mediante coolers de aire, era insuficiente para que el mismo adquiera la solidez necesaria y pueda ser bobinado por el sistema de arrollamiento. Esto se debía a que, la temperatura de los sunchos era muy elevada. Se decidió pasar de 280°C a 210°C, logrando un filamento de mejor calidad, pero el filamento seguía sin conseguir solidez. Por este motivo, se decide cambiar el sistema de enfriamiento mediante aire, por un sistema de inmersión en líquido (agua) con renovación del mismo. El resultado fue exitoso, ya que comparando ambos sistemas, en la misma distancia (35 cm), el método de enfriamiento por inmersión en líquido logra reducir la temperatura del filamento en 58 °C, mientras que el primero solo reducía en 31 °C. También se probó cambiar de lugar los sunchos (resistencias eléctricas), alejando las mismas del dado y acercándolas a la tolva, el resultado fue negativo, ya que el pico extrusor nunca logra alcanzar la temperatura necesaria para extruir el filamento y se ocasionaron problemas de temperatura en el rodamiento, acoplamiento y moto-reductor. Finalmente, se optó por fijarlos en una posición intermedia, logrando buenos resultados. Otra observación valida de destacar, es que al adicionar un porcentaje de PEAD (polietileno de alta densidad) virgen en forma de pellets, la resistencia y flexibilidad del filamento del ABS mejoro notablemente, esto es debido a que las carcasas de computadoras tienen PC (policarbonato), componente que aporta dureza pero fragiliza al mismo. Finalmente, el filamento de mayor calidad, se obtuvo a una temperatura de 140 °C, girando el husillo a 14 rpm, logrando buena resistencia, acabado superficial y regularidad del diámetro a lo largo del mismo.

En la figura 9. Se observan los pellets de ABS reciclado y el filamento obtenido del ensayo N° 1. Mediante refrigeración por aire.

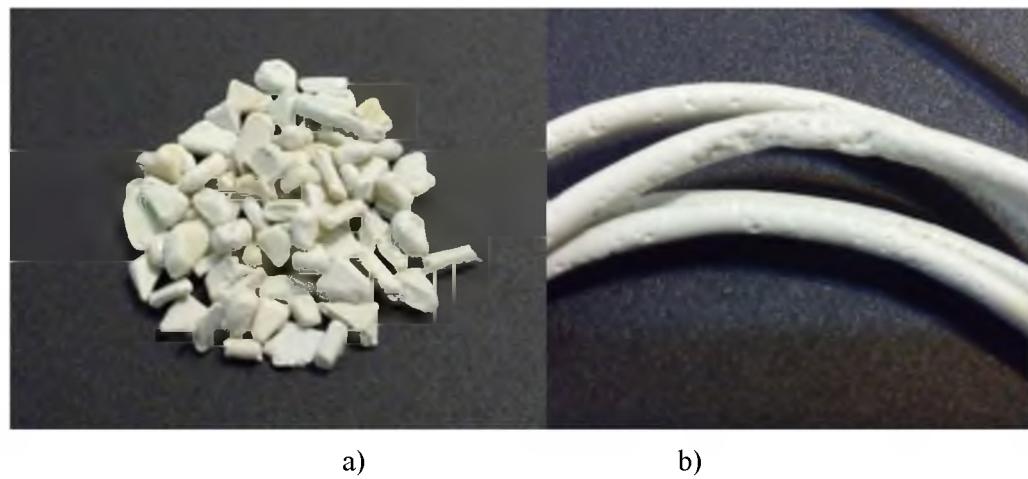


Figura 9. a) Pellets de ABS reciclado. b) Filamento obtenido.

En la figura 10. Se observan los pellets de ABS reciclado y del PEAD virgen y el filamento obtenido del ensayo N° 2. Mediante refrigeración con aire.

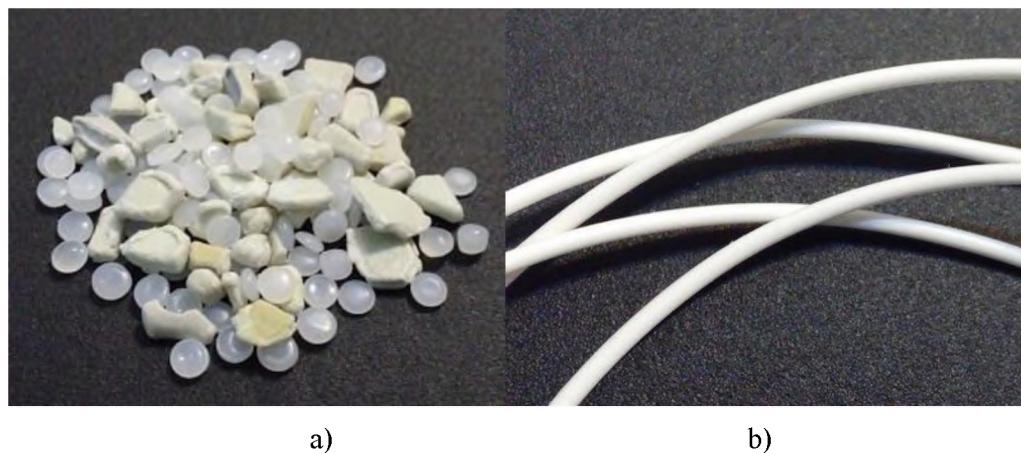


Figura 10. a) Pellets de ABS y PEAD. b) Filamento obtenido del ensayo N° 2.

En la figura 11. Se observan los pellets de ABS reciclado y del PEAD virgen, Masterbatch de ABS y el filamento obtenido del ensayo N° 3. Dicho ensayo se realizó con refrigeración por agua.



Figura 11. a) Pellets de ABS, PEAD y Masterbatch. B) Filamento obtenido del ensayo N° 3.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Analizando los diferentes ensayos, observamos que la máquina extruye un filamento con mayor regularidad del diámetro en su longitud, cuando la velocidad del husillo se mantiene en el rango de 11,6 a 13 rpm. Esto se debe a que los flujos directos e inversos y de fuga en el interior del conjunto camisa - husillo se estabilizan, ya que no es de extrema precisión el ajuste que existen entre ambos, y el bombeo se mantiene constante comparado con los demás regímenes. Además, el pico extrusor de cobre, es un elemento que influye directamente en la terminación y acabado superficial del filamento, su superficie interna define la calidad del mismo. Una mejora a realizar, es el sistema arrastre del filamento figura N° 8 b) , el mismo mantiene la velocidad constante y tensa el filamento, pero debido a que no tiene tallada la silueta de este en la superficie de los rodillos, lo aplasta y lo deforma. En cuanto a la temperatura de extrusión, se ha llegado a alcanzar 290 °C, siendo la temperatura óptima para el ABS+PC reciclado 140 °C, y 190 °C para el PEAD dicho material fue donado por la empresa Polimundi [6]. Esto demuestra que la potencia seleccionada para los sunchos, ofrece un amplio margen de calentamiento de la camisa. En fin, la maquina extrusora respondió acorde a los cálculos teóricos realizados, superando el caudal determinado en un 30%, algo muy positivo, ya que mediante el variador de velocidad instalado en el motor, se estableció un rango de producción que va desde los 0.65 a 1.3 Kg/h. La potencia establecida para el moto-reductor, es suficiente para realizar ensayos y tareas de investigación.

En principio, la idea original era extruir filamento de ABS y utilizar simplemente el PEAD para limpiar la máquina, pero hemos descubierto que la misma se comporta de manera excelente con dicho material. A partir de esto, realizamos ensayos con dicho material, a temperaturas de 210°C y luego pasamos 190°C ya que el filamento de polietileno se quemaba. Además, probamos a diferentes rpm del husillo y la variación de la producción del mismo, no es apreciable con respecto al ABS.

A partir de los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta que este proyecto es la primer etapa del desarrollo de una maquina extrusora de filamento, surgen las hipótesis de nuevas mejoras:

- Incorporar un sensor ultrasónico para medir la variación del diámetro del carretel del filamento recogido, con un sistema retroalimentado al motor del carretel para ajustar el mismo de forma automática.
- Sensor de control del diámetro del filamento.

- Producir filamento a partir de ABS virgen y evaluar el comportamiento de la máquina.
- Producir filamento para uso en bordeadoras y cortadoras de césped.
- Producir pellets de diferentes polímeros termoplásticos.

## 7. Referencias

- [1] ECOCOMPUS – proyecto que consiste en la gestión de recuperación de residuos informáticos elaborado por el Centro de Gestión ambiental y Ecología (CEGAE) y la Facultad de Ingeniería – UNNE.
- [2] CAIP - Cámara Argentina de la Industria Plástica.
- [3] V. K. SAVGORODNY. *Transformación de Plásticos*. Editorial Gustavo Gili, S.A. BARCELONA.
- [4] JURICH CONSTRUCCIONES. Metalúrgica Jurich Construcciones. (3400) Corrientes.
- [5] NUEVA METALURGICA BOISSIERE S.R.L. (3500) Resistencia – Chaco.
- [6] POLIMUNDI. *Bolsas plásticas*. (3500) Resistencia – Chaco.