

# **POLIMEZCLA**

Laura Camila Baez Ardila  
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavita  
Trabajo dirigido materiales y manufactura  
Ingeniería Industrial  
Bogotá, Colombia  
laura.baez@mail.escuelaing.edu.co.

## **Resumen**

Teniendo en cuenta el giro que está tomando la economía mundial y nacional hacia una perspectiva circular, el presente estudio tiene como objetivo analizar las propiedades físicas y mecánicas de mezclas realizadas entre resina de PVC virgen y resina de PVC reciclado, con adición de fibra de vidrio como agente de refuerzo. Las mezclas de PVC se procesaron añadiendo 10, 20 y 30% de material reciclado, y 3% de fibra de vidrio a una de ellas. Se encontró que la adición de PVC reciclado no afecta la resistencia a tensión, rigidez o resistencia a fractura del material. Sin embargo, el uso de PVC reciclado sí incrementa la capacidad el porcentaje de elongación del material, lo cual no es bueno en el uso de sus diferentes aplicaciones. En cuanto a la adición de fibra de vidrio, se observó que ésta tampoco afectó las propiedades a tensión de esfuerzo máximo, rigidez o resistencia a fractura, pero sí disminuye la capacidad de deformación plástica que le provee el material reciclado. Esto es algo positivo para las diferentes aplicaciones del PVC.

*Palabras claves: economía circular, PVC, reciclaje, tensión, dureza*

## **1. INTRODUCCIÓN**

El cloruro de polivinilo (PVC) es un polímero termoplástico formado a través de un proceso químico a unas presiones y temperaturas determinadas. Cabe aclarar que, en la formación de este tipo de resinas plásticas, el átomo más importante es el carbono, que hace parte de la columna vertebral de la cadena. Durante la formación de las cadenas, van quedando dos enlaces libres para la unión con otros átomos diferentes [1].

El PVC cae en la categoría de los polímeros termoplásticos, es decir, pueden modificar su estructura interna mediante temperatura. Sin embargo, hay varios tipos de PVC, que se diferencian, por ejemplo, según el mecanismo de elaboración del polímero y la fuente de materia prima para su elaboración [2].

Una de las propiedades más valoradas es que al ser un mal conductor tiene propiedades aislantes y para el uso en el sector de la construcción es muy valioso, ya que, al tener tantos elementos en una obra, es de suma importancia que sus herramientas no sean conductoras. Por último, y no menos importantes, es reconocido por su durabilidad, es decir, tiene una larga vida útil [1]; El cloruro de polivinilo es el plástico más utilizado en el mundo, sus aplicaciones se presentan día a día desde las piezas de un automóvil, hasta una botella de agua.

Esta resina se puede producir mediante tres procesos diferentes, el primero es llamado suspensión, allí se obtienen homopolímeros y copolímero. El peróxido es soluble en el monómero, por ende, al introducir el PVC en el agua, éste es insoluble logrando así obtener la resina por medio de una polimerización en suspensión, se le agregan gotas de alcohol polivinílico para que de este modo ninguna partícula se adhiera.

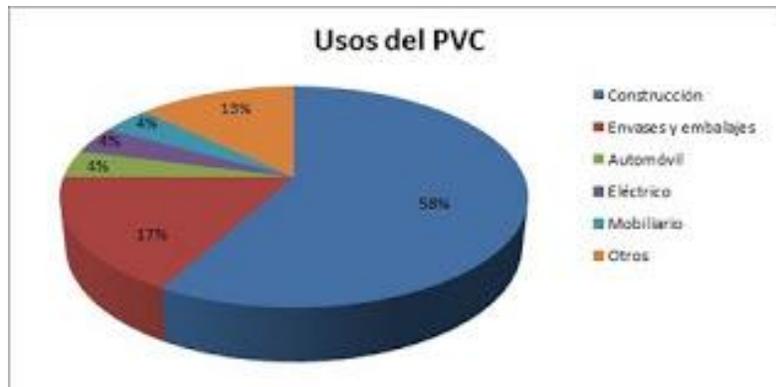
Otro proceso de producción es emulsión. Esta reacción se produce en agua, agregando un emulsificante con objeto de lograr una mejor dispersión y un tamaño de partícula menor. Esto logra que el polímero precipite rompiendo la emulsión y generado así propiedades especiales para la absorción. La producción de la resina de masa se caracteriza por ser un proceso continuo, en el cual solo se hace uso de un catalizador y agua, logrando mayor estabilidad. [3]

Para la elaboración de PVC las principales materias primas son cloruro de vinilo, agua desmineralizada, agentes de suspensión primarios y secundarios, peróxido de benzoilo y tricloroetileno. Sin embargo, dependiendo de los procesos que se utilicen para la obtención, varían tanto sus materias primas como sus porcentajes de uso. De igual manera hay que tener en cuenta que existen procesos extra para modificar las propiedades mecánicas, como lo es la copolimerización, que logra la obtención de temperaturas de fusión más bajas. Otro de ellos es el de los termopolímeros, adecuados para adquirir mayor resistencia al impacto. Así, existen varios procesos dependiendo de las aplicaciones [4].

La resina de PVC cuenta con variedad de procesos de moldeado como lo son aspersión, lecho fluidizado, sinterización, moldeo rotacional, vaciado, inmersión, recubrimiento, prensado o compresión, soplado, termoformado, calandrado. En este trabajo nos enfocaremos en la extrusión y la inyección, que son los más utilizados para aplicaciones en construcción. La extrusión es un proceso en el cual el compuesto en polvo o pellets es calentado y plastificado continuamente mediante un tornillo sin fin dentro de un barril, logrando de este modo un estado fluido, aunque altamente viscoso; en el extremo contrario a la introducción de resina se ubica un dado, que es el responsable de darle la forma. El fluido es forzado bajo presión a pasar a través de ese dado y de esta manera forma perfiles [5].

Por otro lado, la inyección consiste en un proceso en el cual un tornillo sin fin empuja el compuesto previamente fundido hacia un molde, el cual se llena completamente creando la forma deseada. Se especifica que el uso de una inyectora es para fabricar componentes geométricos de alta complejidad, para altos niveles de producción, ya que se adapta el molde para las unidades que se requiere sacar de forma continua, y, por último, por la versatilidad de la pieza. Para tener un mayor enfoque, la inyección se usa para productos como lo son tapas, accesorios de PVC, juguetes, cepillos, ganchos de ropa, cubetas y demás, mientras que la extrusión se usa para productos con una sección transversal constante en cualquier punto de su longitud, productos uniformes, como lo son tuberías, laminas, bolsa plástica, mangueras, canales, etc. [6].

A raíz de la magnitud de productos que tienen como materia prima el PVC, se identifica que actualmente en Colombia el sector de polímeros a base PVC genera alrededor de 1.3 millones de toneladas anuales entre materia prima y productos terminados, siendo un sector que representa el 15% de PIB manufacturero del país [7]. Estos productos se destinan al sector de la construcción e infraestructura. Adicional a ello, estadísticamente la tasa de crecimiento del consumo de PVC oscila alrededor del 2.5% anual, distribuidos en su mayoría en tuberías [8] Como este material es principal materia prima para variedad de productos, su costo aumenta radicalmente ya que tiene exceso de demanda y de igual manera su adquisición es complicada. En el siguiente gráfico (**Figura 1**) se observa cómo es la distribución de los productos de PVC por sectores.



**Figura 1** Uso del PVC

En Colombia la venta de resina de PVC está regulada por el gobierno de acuerdo a la capacidad de producción de las fábricas. Este es un material que sólo se puede conseguir por importación, ya sea desde México o Estados Unidos. Adicional a ello, sólo existen alrededor de 5 empresas encargada de su distribución, las cuales son Mexichem Colombia S.A.S, ACG colombiana S.A.S, Supernovae S.A.S, Quimicoplasticos y Novaplast S.A. [9]. Por ende, no todas las empresas que desean adquirir PVC original de la fábrica tienen acceso a él. La mayoría de microempresas con un capital alto adquieren un cupo con una de estas grandes productoras para que de este modo se puedan disminuir los costos de adquisición. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la distribución de la materia prima cuenta por parte de las empresas, generado así costos altos por parte de la empresa, ya que debe tenerse en cuenta el costo de transporte y de materia prima. Lo mínimo para adquirir un cupo en las grandes productoras es la compra mensual de 300 toneladas de contado.

En cuanto al costo del PVC, al ser una importación esta varía de acuerdo al precio en el que se encuentra el dólar. Actualmente, 1 kilo de resina de PVC en polvo comprado a Mexichem sale a un costo alrededor de Col\$9.240, y ellos lo comercializan a empresas de alta producción más o menos a \$10.700. Sin embargo, el proceso de formación del producto se genera en las microempresas, las cuales se encargan de la producción del producto final, dando el producto a sus distribuidores a un costo alrededor de \$12.300/kilo. Se aclara que la comparación de dichos precios hace referencia a 1 kilo de resina, sin embargo, se debe analizar cuantos kilos o gramos tiene el producto final para realizar una comparación apropiada. A este último precio se les vende a otras empresas encargadas de comercialización y distribución del producto terminado, generando otro margen de rentabilidad antes de llegar a las ferreterías con venta al público. No obstante, el precio del PVC tiende a ser muy fluctuante, tanto por los cambios producidos por la pandemia, como por la variación del costo del dólar (Comentarios de J. Herazo, 15 enero 2021).

Para tener en cuenta más o menos cómo se acopla el producto final y la relación con costos, se considerarán 3 ejemplos como producto final: 1 tubo sanitario de 4 pulgadas necesita 10 kilos para su elaboración en valor \$123.000; 1 tubo a presión de ½ pulgada, necesita de 1200 gramos en valor de \$ 14.800; y un tubo eléctrico de ½ pulgada necesita 450 gramos a un valor de \$ 5.600. Todos estos valores corresponden al costo al que lo compran los grandes distribuidores de mercancía 100% PVC virgen. Normalmente los tubos son generados con una mezcla entre resina de PVC y carbonato de calcio, distribuidos de la siguiente manera: resina de PVC 75 % y carbonato de calcio 25%. Esto con el fin de generar economía, teniendo en cuenta que no degrada las propiedades mecánicas (Comentarios de J. Herazo, 15 enero 2021).

El carbonato de calcio es usado en las tuberías como incrustaciones. Estas pueden presentarse como una capa micrométrica y espesa adherida a las paredes interiores de las tuberías. Como primera instancia el carbonato se purifica mediante la eliminación de hierro y sílice para minimizar la degradación del plástico y luego de ello se muele finamente y se agrega a la misma mezcla del PVC. Este, al no ser completamente soluble en agua, se nuclea por estiramiento biaxial en las extremidades de la cadena, analizándolo teóricamente como una capa de recubrimiento.

El efecto del uso de esta capa es la reducción del área de fluencia, ya que al tener dichas incrustaciones no se requiere la misma cantidad de PVC para compactar la tubería. Esta capa también aumenta la rugosidad de la superficie del tubo, y se logra un mayor peso [10]. No siempre se usa el carbonato de calcio, ya que la composición química de las incrustaciones puede variar dependiendo de las aplicaciones o las propiedades que se requieran. En cuanto al costo es favorable, ya que el valor por kilo al productor es de \$5.200, por ende, resulta ser más económico que el PVC virgen.

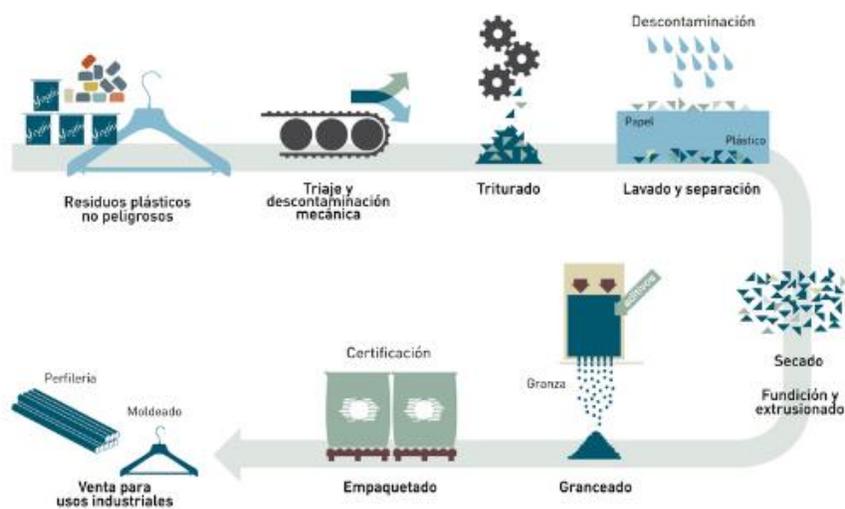
Se atribuye que se usa alrededor de un 25% de su totalidad, debido a que con esta dosis se logra el control de las propiedades tanto químicas como mecánicas, sin generar obstrucción del fluido. En cuanto al ejemplo anterior, los precios quedan de esta forma: 1 tubo sanitario de 4 pulgadas necesita 10 kilos para su elaboración, su valor quedaría en 41.500, de igual manera 1 tubo presión de ½ pulgada, necesita de 1200 gramos a \$ 12.700 y un tubo eléctrico de ½ pulgada necesita 450 gramos a un valor de \$ 4.700. De esta manera se puede identificar la diferencia de precios al usar el Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Al momento de realizar el proceso de moldeo se debe tener cuidado con la presión y la temperatura, ya que si no es la adecuada el carbonato de calcio puede precipitar y dañar la matriz, por ello hoy en día existen simuladores, los cuales pronostican la formación de incrustaciones a partir de las condiciones detalladas del fluido [10]. Para tener mayor especificación respecto al control de las incrustaciones, se debe determinar el carácter agresivo del agua en función de la temperatura, pH, dureza, alcalinidad y sólidos disueltos, los cuales se generan por medio del índice de Langelier (IL). Este está basado en el efecto del pH sobre el equilibrio de solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ . El pH al cual el agua está saturada con  $\text{CaCO}_3$  es conocido como pH de saturación (pHs). Langelier define un índice (IL) igual a la diferencia entre el valor medido del pH del agua y el del pH de saturación. A partir de dicho experimento lo que se busca es que el pH del agua sea estable al realizar la comparación con el pH de saturación, teniendo un intervalo óptimo de 6.8 - 7.2 [11]. Se debe tener en cuenta que el valor depende de la solución y las cantidades relativas. Como esto varía se debe realizar dicha prueba y, de esta manera, se puede asimilar qué tan viable es el uso del  $\text{CaCO}_3$  al mezclarse con un PVC original.

Otro factor importante derivado del PVC, es la contaminación que este genera durante su producción, ya que se generan miles de toneladas de sustancias organocloradas tóxicas (cloruro de vinilo y dioxinas entre ellas), las cuales son sumamente tóxicas para los seres vivos. Estas sustancias pueden tener consecuencias mortales, causar malformaciones en el feto humano, cáncer de seno y disminución en la producción de espermatozoides en los hombres. De igual modo el PVC es fatal para el medio ambiente, ya que no es un material biodegradable [12]. Sin embargo, la producción de PVC en Colombia prevalece a 1,4 millones de toneladas al año, generando alrededor de 198.000 puestos de trabajo en el sector de la construcción [13]. Por lo cual no se evidencia ninguna disminución en cuanto al uso de PVC, ya que, es fundamental para aplicaciones médicas, arquitectónicas, industriales, automotrices, entre otras.

Sin embargo, analizando el párrafo anterior se identifica que el PVC es un material fundamental para la economía colombiana, pero al mismo tiempo un factor de contaminación, por ende, se planea el caso de reutilizar todo elemento que contenga cloruro de polivinilo, por medio de la misma generación y/o elaboración de materiales que actualmente se distribuyen por toda Colombia, es decir, el material que ya no cumple una función en el mercado o que es desechado pueda reutilizarse en materiales funcionales para la sociedad, adaptables al mercado. Cabe aclarar que el porcentaje de producción de PVC no va a disminuir, pero si se va generar una reutilización de desechos no biodegradables, que al final van a generar una cadena de reciclaje. Actualmente en Colombia existen empresas que trabajan con esta iniciativa y hacen parte de la reutilización del PVC.

El reciclaje de la resina de PVC es un ejemplo de economía circular, la cual consiste en ubicar los materiales que están dispuestos para desechos, se separan los componentes poliméricos y estos proceden a moler el material, lavarlo y por último limpiar las impurezas. Al pasar por todas estas etapas el material entra de nuevo en el proceso productivo en forma de grano o polvo para fabricar nuevos elementos [14]. A continuación, se puede identificar gráficamente como sucede el proceso del reciclaje para mayor entendimiento (**Figura 2**).



**Figura 2.** Proceso reciclaje PVC

La resina de PVC original, como anteriormente se menciona, es un material importado y se encuentra regulada por el gobierno. Sin embargo, al reutilizar el PVC reciclado se puede obtener mayor cantidad de PVC en Colombia, pero con diferentes propiedades. El punto a analizar en esta fase del proyecto es identificar qué propiedades tanto mecánicas como físicas genera una mezcla entre PVC virgen y PVC reciclado y que porcentajes de esta combinación son los adecuados para obtener propiedades similares al uso de solo resina original. A raíz de dicha mezcla sale una variable más a evaluar denominada fibra de vidrio, la cual sería una adición a la mezcla de PVC.

Adicional al  $\text{CaCO}_3$  como fuente económica, también se quiere ver las propiedades que surgen al hacer uso de fibra de vidrio como agente de refuerzo. La fibra de vidrio es un compuesto que consta de numerosos filamentos cerámicos basados en dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) extremadamente finos. Se destaca por ser un

material liviano con una amplia resistencia mecánica y química, buen aislante térmico y eléctrico y uno de los materiales más económicos de la industria con una muy buena relación vida útil [15]. La fibra de vidrio analizada en este experimento es de tipo E, su principal función es adherir una estabilidad dimensional al exterior y generar una estructura más compacta a la hora de producción final. Este refuerzo se mezcla junto con las materias primas al efectuar su fabricación [16].

Todo producto final tiene un ciclo de vida establecido. Lo mismo pasa con el PVC. Si un producto pierde su vida útil, pasa a ser desechado, no obstante, un producto que tenga gran contenido de PVC puede ser reciclado y al ser reciclado también tiene gran variedad de aplicaciones. Se determina que el reciclaje de PVC es tan antiguo como el proceso de fabricación de este mismo, por ende, el reciclaje de PVC es viable tanto económica como tecnológica y ecológicamente [17]. Gracias a la facilidad de transformación y a su termoelasticidad, el PVC puede ser reciclado por 4 técnicas como lo son reciclado mecánico, químico, energético y por disolventes. La más común y utilizada es denominada reciclado mecánico. Esta provee propiedades similares al PVC original, por ende, los productos finales de esta técnica son de uso favorable para la construcción.

El reciclado mecánico es el sistema más utilizado y óptimo para la extrusión. Deben considerarse dos tipos PVC según su procedencia. Uno de ellos es procedente del proceso industrial o *Scrap* (realizado desde las materias primas del material) y otro es procedente de los residuos sólidos urbanos (RSU). En ambos casos los residuos son seleccionados, molidos, re-aditivos y transformados en nuevos productos. Lo que diferencia los dos tipos son la cantidad de etapas necesarias hasta la obtención de la materia prima reciclada [17]. De esta manera podemos encontrar que existen varios tipos de producción para las tuberías y que las materias primas no siempre tienen que ser PVC virgen, sino que se puede hacer uso de PVC reciclado a partir de *Scrap* y *RSU*.

Las tuberías, tanto originales como recicladas, también tienen determinadas propiedades físicas y mecánicas que las hacen considerar irremplazables. Una de ellas es que son altamente resistentes al impacto, son elementos ligeros, resisten a la corrosión tanto subterránea como de interiores y exteriores, resisten fluidos tanto alcalinos, ácidos como soluciones acuosas, tienen una muy baja resistencia al flujo ya que son extremadamente lisas, alta resistencia a la presión, alta rigidez y dureza y, por último, son un buen aislante eléctrico [18]. De igual modo tiene aspectos negativos, como lo son la gran tendencia a propagación de grietas y un muy bajo módulo de Young, como es el caso del PVC reciclado, ya que en algunos casos sus componentes no tienden a adherirse correctamente, dependiendo de la densidad de material.

Hay que tener en cuenta que dichas propiedades dependen de la clasificación de la tubería. Actualmente en Colombia existe una Norma Técnica (1087 de 1999) que estipula las recomendaciones al utilizar tubería de PVC. Sin embargo, cabe aclarar que no impone requisitos para su uso. La norma ASTM D624, por otra parte, especifica el ensayo usado para determinar la resistencia de todos los materiales poliméricos y es una de las recomendaciones estipuladas para analizar un polímero. A partir de todas las recomendaciones se establecen garantías dependiendo del uso del material como, por ejemplo, el caso de tubo CPVC para agua caliente sello de calidad ICONTEC NTC 1062, tubo PVC sanitaria y aguas lluvias Sello de Calidad ICONTEC NTC 1087, tubería Conduit PVC Sello de Calidad ICONTEC NTC 979 ICONTEC – RETIE y a partir de ello se procede a la identificación de PVC original [19].

Una de las propiedades mecánicas de interés es la resistencia a tensión. Esta caracterización se hace por medio del ensayo de tracción, en el que se miden las propiedades que ofrece un material dúctil cuando está sometido a dos fuerzas opuestas, y consiste en deformar una probeta a lo largo de su eje mayor, a velocidad constante y aplicando fuerza hasta su ruptura. Se mide el esfuerzo máximo, alargamiento en la rotura y límite elástico [20]. Este ensayo es el mejor indicador de la resistencia de un material y es fundamental para identificar si las mezclas cumplen con los parámetros correspondientes en comparación con el PVC virgen.

Otra propiedad mecánica por analizar es la dureza, que es la resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado por otro más duro. Existen tres métodos para determinar la dureza de los materiales plástico: dureza Shore, dureza a la bola y dureza Barcol [21]. En el presente trabajo esta propiedad se analiza por medio del método de dureza shore y la escala utilizada es la D, que es para materiales termofijos y termoplásticos. Esta medida se toma a los 15 segundos de aplicación y genera valores consecutivos antes de su falla.

Al considerar todos los conceptos anteriormente nombrados el objetivo de este proyecto es analizar por medio de pruebas de inyección de qué manera se puede generar un material parecido a la mezcla producida por resina de PVC virgen, en la cual se use menos resina de PVC original, ya que su costo tiende a ser elevado, su adquisición difícil y su biodegradación nula. Esto se hará añadiendo PVC reciclado y otros aditivos. Allí se analiza qué porcentaje encaja más a las propiedades originales y como éste generaría tanto cambios económicos, como cambios en la disposición final del producto primario.

## 2. METODOS Y MATERIALES

### 2.1. Materiales

Como primera instancia se procede a la adquisición de la materia prima, siendo este un paso dificultoso, debido a que su compra es de difícil acceso. Sin embargo, se cuenta con la suerte de tener proveedores directos quienes facilitaron la adquisición de dichos productos.

Para la realización de este proyecto se hizo uso principalmente de PVC virgen, PVC reciclado y fibra de vidrio. El PVC virgen se obtuvo mediante el mecanismo de *Scrap*, el cual es un subproducto de la inyección del PVC virgen de la fábrica HERAPLAST. Esta empresa inyecta las piezas que comercializa del PVC virgen aditivado en polvo. De este proceso se obtiene un subproducto, que es el PVC solidificado de los canales de paso del PVC líquido en el molde, que ellos denominan hilos; ellos toman esos hilos sobrantes y los peletizan, obteniendo en este caso nuestro denominado PVC virgen.

Cabe aclarar que al momento de pasar la materia prima a inyección este contiene una mezcla entre PVC en polvo y POLYSRAB EL-4005, que es una mezcla de varios componentes: Butil estaño- mercapto-ester, Estearato de Calcio y lubricantes. Este último producto se utiliza como un estabilizante lubricante para compuestos PVC y es necesario para generar mejor estabilidad en el compuesto. Por ende, el PVC virgen utilizado en este proyecto es el subproducto de la inyección entre PVC ORIGINAL y POLYSRAB EL-4005 con porcentajes 80% y 20 % respectivamente. A continuación, se observa en el lado izquierdo todo el subproducto dispuesto a pasar por la peletizadora al lado derecho de la imagen (**Figura 3**).

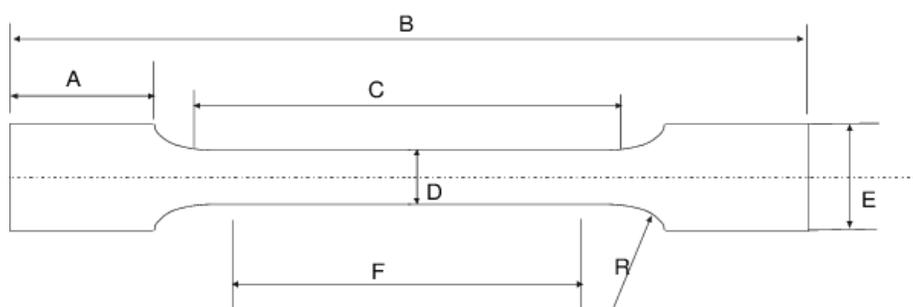


**Figura 3.** Subproducto y peletizadora

Por otro lado, el PVC reciclado se obtiene por medio del reciclado mecánico denominado RSU. después de realizar el acopio de materiales polímeros hecho por los recicladores de Bogotá, ellos venden sus productos a las empresas encargadas de reutilizar estos materiales. En este caso, RAFAEL OVALLE. Después de hacerle el tratamiento anteriormente nombrado, es decir, moler, lavar y limpiar las impurezas, pasa a peletización. De esta manera se genera nuestro PVC reciclado.

## 2.2. Métodos

El procesamiento de tubería se debe realizar por medio de extrusión, sin embargo lo que se quiere analizar son las propiedades mecánicas, por ende, se procede a la fabricación de probetas de tracción con geometría plana, según se muestra en la **Figura 4** Geometría probeta., obtenidas por inyección. Se busca obtener un polímero con la misma funcionalidad y propiedades mecánicas similares a las tuberías originales. Estas propiedades de los polímeros resultan especificadas en la norma ASTM, donde se identifica la variedad de plásticos, sus derivados poliméricos y sus características analíticas como lo son materiales, tipos, durabilidad, propiedades y estándares de piezas en formación.



**Figura 4** Geometría probeta.

Se realizaron 3 mezclas diferentes de material virgen y material reciclado, y una de ellas con fibra de vidrio, como se muestra a continuación:

1. Mezcla: 90% PVC virgen - 10% PVC reciclado
2. Mezcla: 80% PVC virgen - 20% PVC reciclado
3. Mezcla: 70% PVC virgen - 30% PVC reciclado

#### 4. Mezcla: 87% PVC virgen - 10% PVC reciclado – 3% Fibra de vidrio

El porcentaje reportado es en volumen, es decir, se utiliza una probeta de 1000 ml y de acuerdo con su proporcionalidad de material se llega al 100% de la capacidad de la probeta. Al tener ya estas mezclas, como se identifica en la Figura 5 Mezclas, normalmente se procede a la introducción de carbonato de calcio, el cual nos servirá como fuente económica a la hora de la mezcla, es decir, el carbonato de calcio, lo que me genera es peso y es necesario para lograr mayor economía a la hora de la funcionalidad, sin embargo, en este experimento no se hace uso de este aditivo, ya que el objetivo principal es identificar las propiedades de las mezclas en su máxima expresión.



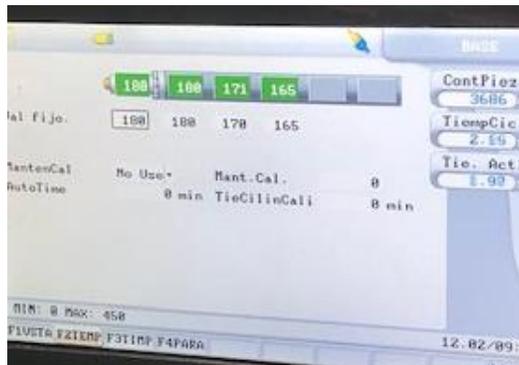
**Figura 5 Mezclas**

El paso siguiente es el procesamiento por medio del método de inyección en la maquina HXF 58 (**Figura 6**). Esta unidad de inyección es tipo husillo (tornillo), y se usa debido a que distribuye el calor uniformemente, proporcionando una mayor precisión. Allí mismo se ajustan los parámetros de proceso, como lo son presión y velocidad de cada una de las áreas que intervienen en la maquinaria. Estos dos parámetros varían de acuerdo a la zona de calentamiento. La zona de calentamiento está dividida por 4 franjas, así que cada zona maneja una temperatura diferente. Otra variable que se ajusta es el tiempo total de inyección. Todos estos parámetros dependen de las propiedades del material, por lo que para ello nos guiamos con la ficha técnica del PVC [22]. El resultado de este proceso es la obtención de las probetas para pruebas de tensión, clasificadas según la nomenclatura de mezclas mencionadas.

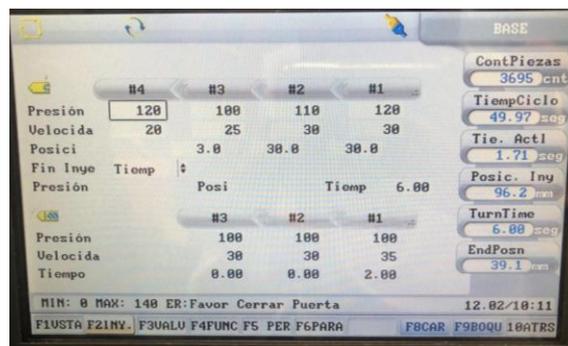


**Figura 6 Inyectora semi-industrial HXF 58**

Con el fin de optimizar los parámetros de proceso, se realizaron pruebas con cada mezcla para identificar cómo se comporta el material. De esta forma se pudo determinar la temperatura y la presión necesarias para inyectar las mezclas. Estos cambios se realizaron en cada una de las zonas de la inyectora. Adicional a ello se varió el tiempo de inyección, ya que en un principio la probeta salía incompleta. Analizando así estos datos, se obtuvieron unos parámetros asertivos, logrando la fabricación exitosa de las probetas. A continuación, se muestra la pantalla de la inyectora con los parámetros de proceso por cada zona (**Figura 7** y **Figura 8**).



**Figura 7** Temperatura en cada zona de la inyectora



**Figura 8** Presión, Tiempo

Al momento de contar con las probetas, se procede a la ejecución de los ensayos mecánicos. En este caso ensayos de tracción y dureza. Para la realización de estas pruebas se hizo uso de la máquina universal marca SHIMADZU (**Figura 9**) usando una velocidad de mordazas de 30 mm/min. Esta proporciona información pertinente para la realización del ensayo de tensión, en la cual los datos son registrados en una base de datos de Excel, los cuales son modificados y organizados según el requerimiento del estudio. Todos los ensayos de tensión se hicieron por triplicado.

En cuanto al ensayo de dureza, se hizo uso del durómetro Shore D analógico, aplicando una carga de 50 N. Este equipo especifica la dureza que tiene cada una de las probetas proporcionadas. Todas las medidas se hicieron en triplicado, con cinco medidas repetidas por probeta.

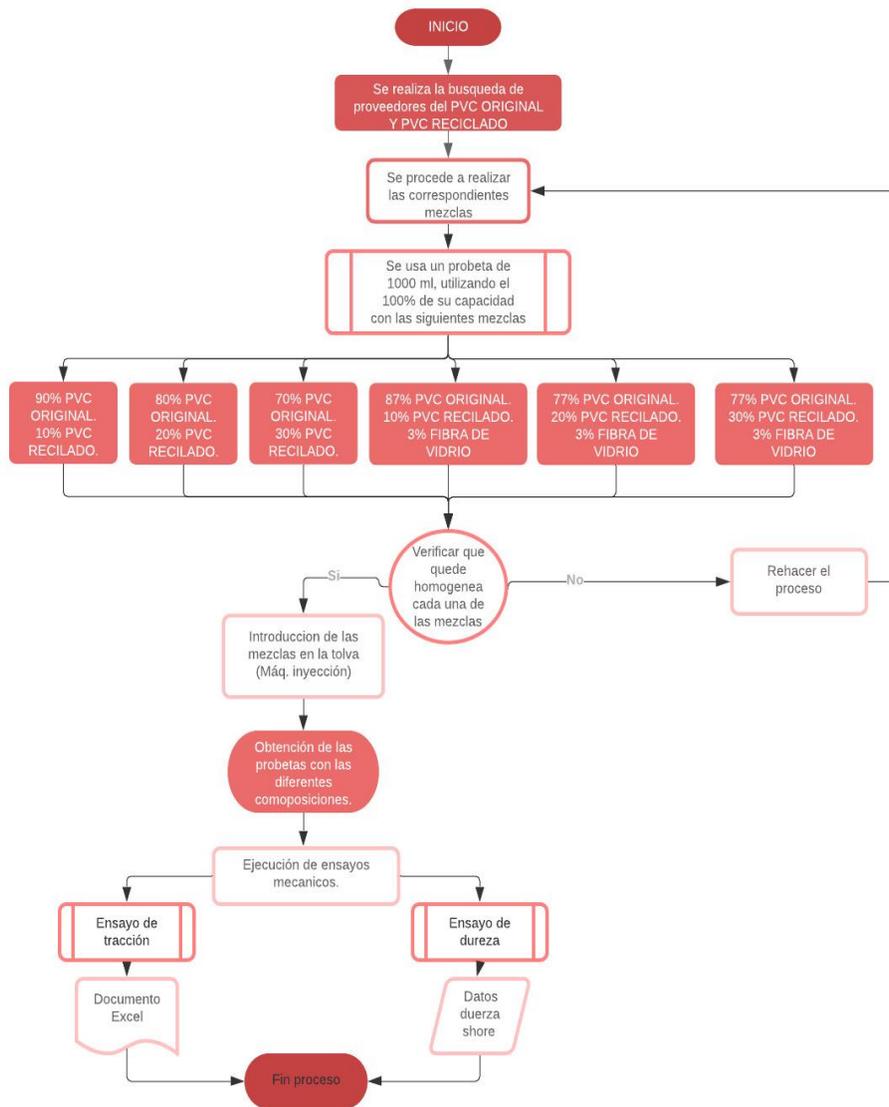


**Figura 9** máquina universal marca SHIMADZU

La **Figura 10** muestra un diagrama de flujo que identifica gráficamente los pasos seguidos para la realización del proyecto.

## TRABAJO DIRIGIDO

laura baez | December 23, 2021



**Figura 10** Diagrama de flujo

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cabe mencionar que se observó un resultado exitoso a la hora de la elaboración de las probetas mezcladas con PVC virgen y PVC reciclado. Sin embargo, en cuanto a las probetas mezcladas con la fibra de vidrio, se obtuvo un resultado negativo. Esto debido a que la fibra de vidrio incrementa la viscosidad del fluido, por lo que el tornillo se ve forzado a aplicar mayor torque y este no fluye adecuadamente, generando taponamiento en el barril de la inyectora (**Figura 11**). Sólo se logró fabricar 1 muestra con fibra de vidrio.



**Figura 11** Barril de la inyectora

### 3.1 Apariencia física de las probetas

#### 3.1.1 Mezcla: 90% PVC virgen - 10% PVC reciclado

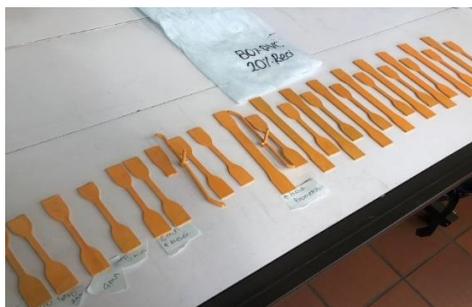
Se obtuvieron probetas con una muy buena estructura física, observándose una transición en el color, debido a que el producto anterior era polietileno azul. Sin embargo, al ser 100% PVC, se identifica el color original del éste (**Figura 12**).



**Figura 12** Mezcla 90-10

#### 3.1.2 Mezcla: 80% PVC virgen - 20% PVC reciclado

Físicamente las probetas se encuentran en buen estado con color resplandeciente. Adicional a ello se identifica que, al inicio de la inyección, el molde no se alcanzaba a llenar completamente, por ende, se realizaron ajustes en el tiempo de inyección (**Figura 13**).



**Figura 13** Mezcla 80-20

### 3.1.3 Mezcla: 70% PVC virgen - 30% PVC reciclado

Las probetas tienden a tener un color más opaco, debido al mayor porcentaje de PVC reciclado. Estructuralmente se encuentran en perfecto estado, con llenado total del molde (**Figura 14**).



**Figura 14** Mezcla 70-30

### 3.1.4 Mezcla: 87% PVC virgen - 10% PVC reciclado – 3% Fibra de vidrio

Al solo adquirir 3 probetas por la situación anteriormente mencionada, estas obtienen un color pastel con ciertas ranuras de fibra de vidrio identificable y en general una estructura completa. (**Figura 15**).



**Figura 15** Mezcla 77-20-3 FV

Al obtener estas 4 muestras se identifica que, al aumentar la cantidad de PVC reciclado, su color varía, mostrando desde un color más naranja vivo a un color naranja opaco, como es el caso de la mezcla con 30% de reciclado. Esto indica que, a mayor contenido de resina virgen, mejor la capacidad de flujo, mejor homogenización, y los colores se perciben mejor, más relucientes y llamativos; en cambio entre más reciclado intervenga en la mezcla, más difícil es llevar a cabo la homogenización. Esto, porque se requiere acoplamiento entre las macromoléculas. Esto hace que físicamente su color cambie y no sea tan reluciente.

## 3.2 Resistencia a tensión

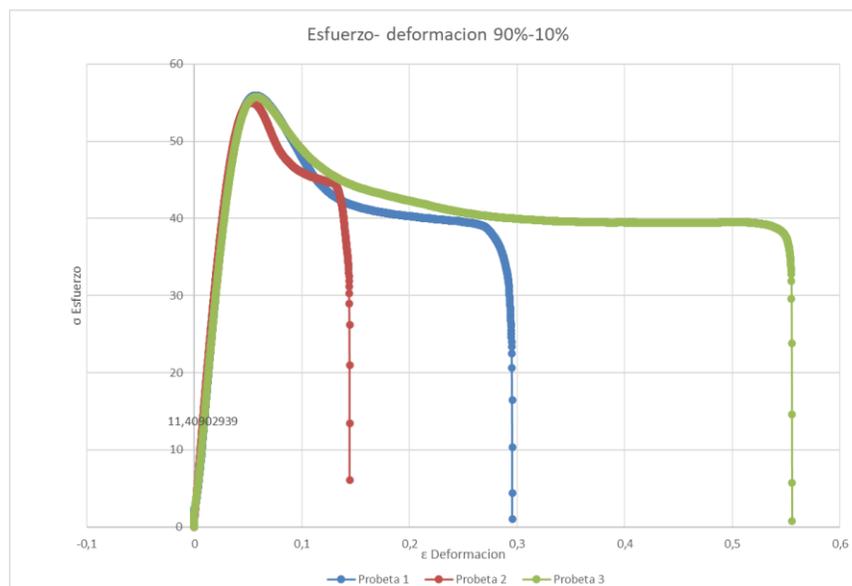
Al tener diferentes probetas de la misma composición, se toma los datos de cada una de ellas y a partir de ello, se puede identificar mejor su comportamiento de acuerdo con los diferentes parámetros.

### ❖ Módulo elástico

La curva esfuerzo-deformación es una excelente representación del comportamiento de un material cuando este es sometido a una fuerza, es decir, allí podemos identificar qué tanto se deforma el material al ser sometido a una fuerza constante. A continuación, se identifica las curvas por cada una de las mezclas.

### 3.2.1 Mezcla: 90% PVC virgen - 10% PVC reciclado

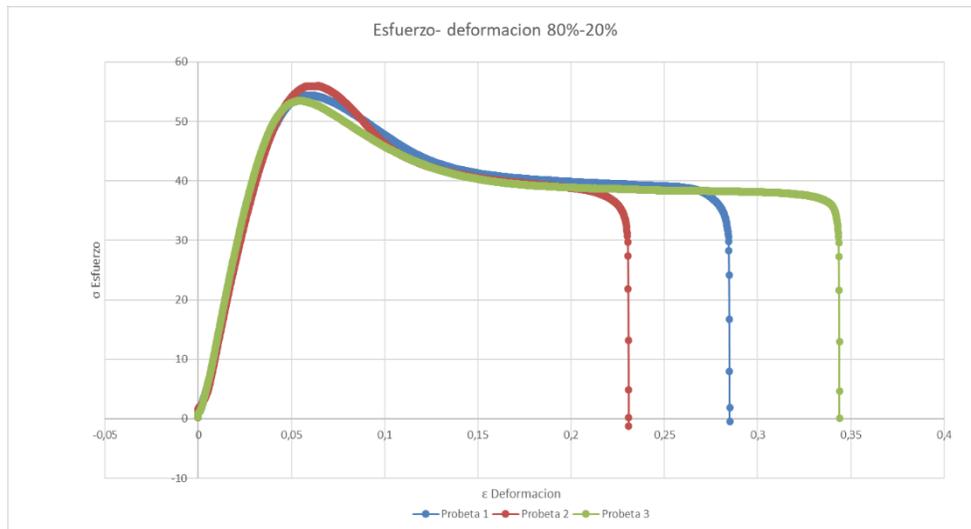
Cada una de estas probetas sufre deformaciones diferentes, como se puede observar en la gráfica. En el caso de la probeta #2 se identificaron poros internos; debido a esto, se identifica que no sufre deformación notoria, ya que, al aplicarle fuerza, obtiene la ruptura fácilmente. Caso contrario sucede con la probeta # 3, en la que se identifica una amplia capacidad de deformación (**Figura 16**).



**Figura 16.** Curvas esfuerzo-deformación para las probetas de la mezcla 90-10

### 3.2.2 Mezcla: 80% PVC virgen - 20% PVC reciclado

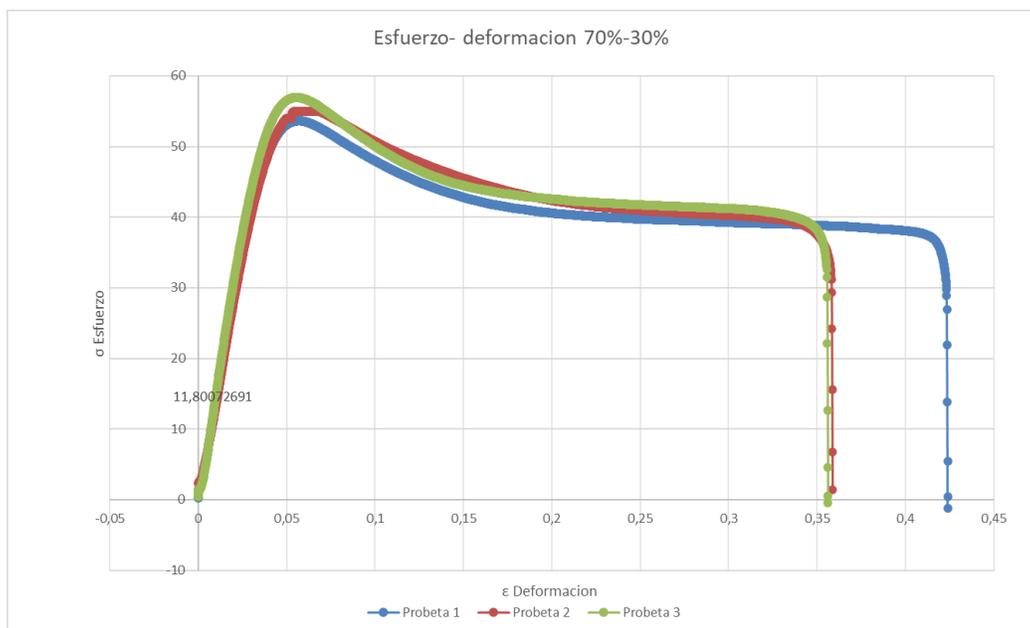
Sus tres probetas varían en cuanto a deformación de la probeta alrededor de 0,5 por cada una de ellas, sin embargo, esta composición resulta tener menos variabilidad en deformación plástica. Se identifica que tienen un esfuerzo no mayor a 56 MPa y no menos de 54 MPa y su deformación es constante y continua en cada una de ellas (**Figura 17**).



**Figura 17.** Curvas esfuerzo-deformación para las probetas de la mezcla 80-20

### 3.2.3 Mezcla: 70% PVC virgen - 30% PVC reciclado

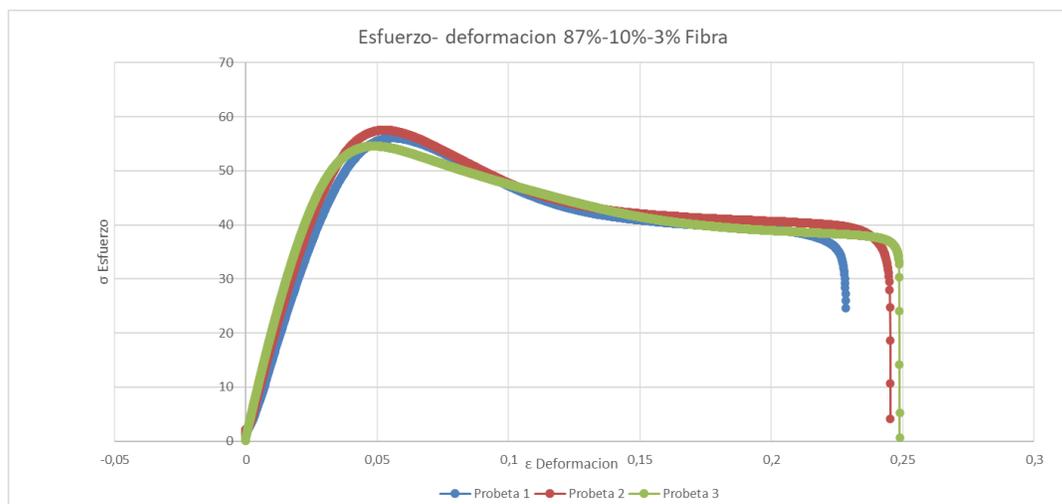
En cuanto a esta última mezcla entre PVC virgen y PVC original se identifica mayor homogeneidad en las curvas esfuerzo-deformación. También se observa que su capacidad de deformación plástica es superior a las mezclas anteriores. Su esfuerzo es mayor a 55 MPa y su deformación plástica es alrededor de 0,4 mm/mm, por ende, se puede identificar que este material es uno que proporciona mejores resultados en cuanto a su ensayo de tracción (**Figura 18**).



**Figura 18.** Curvas esfuerzo-deformación para las probetas de la mezcla 70-30

### 3.2.4 Mezcla: 87% PVC virgen - 10% PVC reciclado – 3% Fibra de vidrio

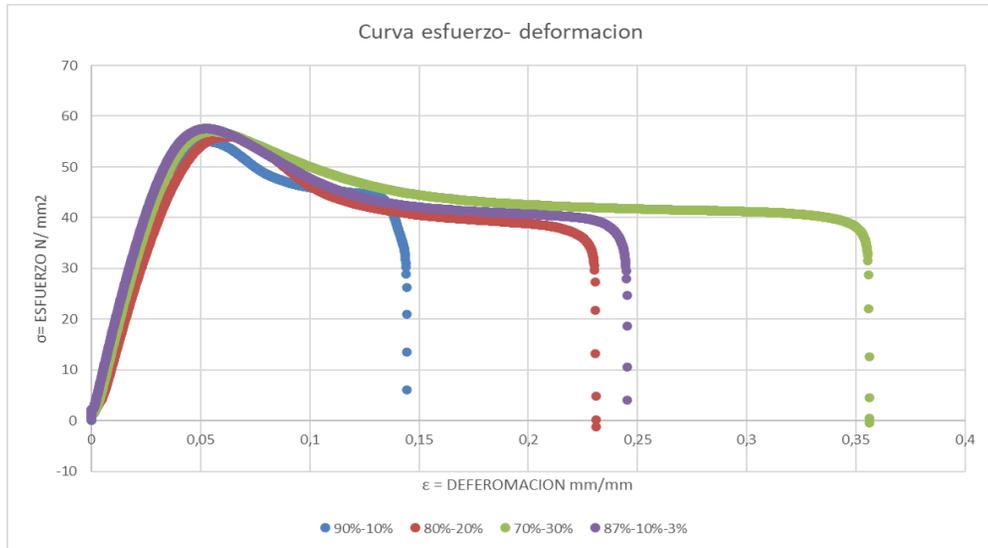
Al introducirle al PVC material fibra de vidrio, se identifica que sus propiedades aumentan la resistencia. La resistencia mecánica es un poco más alta, superior a 56 MPa, y la capacidad de deformación plástica es mayor (**Figura 19**).



**Figura 19** Curvas esfuerzo-deformación para las probetas de la mezcla 87-10-3FV

La **Figura 20** muestra la comparación entre las curvas esfuerzo-deformación de las diferentes mezcla investigadas, Al realizar un análisis comparativo entre las cuatro muestras analizadas identificamos características particulares. La mezcla que más se opone a la deformación plástica es 87% PVC virgen - 10% PVC reciclado – 3% Fibra de vidrio. Es de esperarse que la fibra de vidrio afecta el mecanismo de deformación plástica del PVC que, como se mencionó, es un polímero termoplástico. Es decir, la fibra de vidrio evita el deslizamiento de las cadenas poliméricas unas sobre otras. La mezcla 70% PVC virgen - 30% PVC reciclado, es la mezcla con mayor capacidad de deformación plástica, es decir, es la que más se deforma antes de llegar al punto de rotura.

Durante la deformación plástica, las macromoléculas se desenmarañan y deslizan unas sobre otras, generándose la deformación. En el momento que el esfuerzo externo es mayor a la resistencia de cedencia, que es el punto máximo de la curva esfuerzo deformación, continúa la deformación plástica. Cuando se llega a ese punto, el esfuerzo disminuye, ya que las cadenas moleculares no se concentran en recibir esfuerzo si no en desenmarañar sus cadenas, es decir, se estiran, se organizan y se alinean hasta el punto final de deformación, el cual sería la ruptura [23].



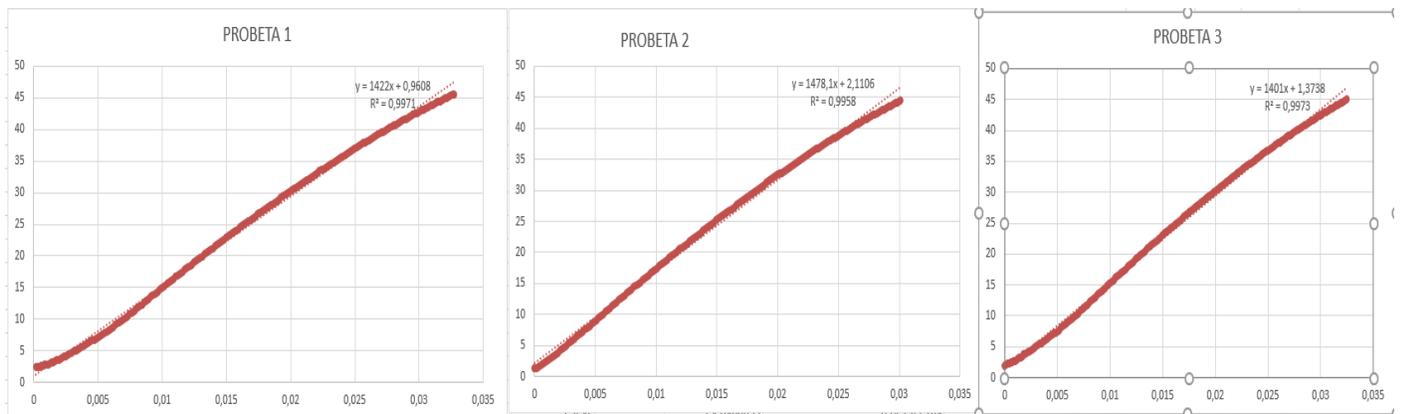
**Figura 20.** Comparación de las curvas esfuerzo-deformación de las diferentes mezclas investigadas

### ❖ Módulo elástico lineal

El módulo elástico es una propiedad importante, ya que está relacionado con la rigidez del material. Los valores que se presentan a continuación tienen una unidad de medida de MPa,

#### 3.2.5 Mezcla: 90% PVC virgen - 10% PVC reciclado

En esta imagen (**Figura 21**) se identifica la parte lineal de cada una de las curvas esfuerzo-deformación, que corresponde a su región elástica lineal. La probeta #1 obtiene un valor de 1422 MPa, la probeta #2, 1478.1 MPa y por último la probeta #3, un valor de 1401 MPa. El valor promedio es de  $1434 \pm 40$  MPa, con un coeficiente de determinación de 0.9968 en promedio, lo que significa que aproximadamente un 99.6% de los valores establecidos corresponden a una variable real, siendo estos ajustes lineales óptimos.



**Figura 21.** Región lineal de la curva esfuerzo-deformación de la mezcla 90-10

### 3.2.6 Mezcla: 80% PVC virgen - 20% PVC reciclado

En el siguiente análisis (**Figura 22**) se encuentran valores semejantes a las anteriores probetas, sin embargo ya identificamos probetas con un valor promedio de  $1336 \pm 57$  MPa, lo que quiere decir que la rigidez del material se va haciendo menor con la adición del PVC reciclado.



**Figura 22.** Región lineal de la curva esfuerzo-deformación de la mezcla 80-20

### 3.2.7 Mezcla: 70% PVC virgen - 30% PVC reciclado

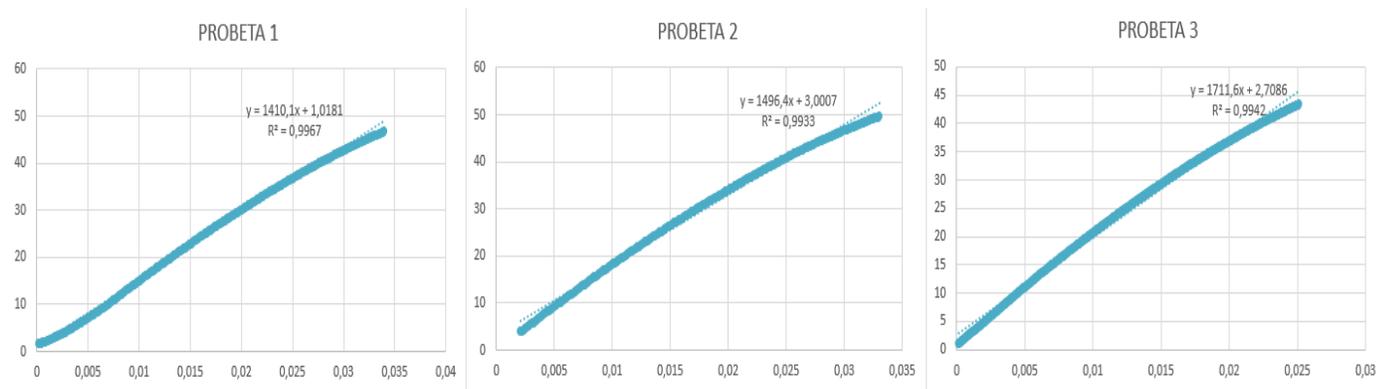
En el análisis siguiente (**Figura 23**) se identifica un módulo de elasticidad aproximadamente de  $1380 \pm 40$  MPa, sin embargo, se identifica que el coeficiente de determinación varía con valor 0.9930, lo que quiere decir que su intervalo de predicción tienen menos variabilidad entorno a su media, de igual manera se identifica que aumentó su rigidez en comparación con el polímero 80%-20%. De igual modo se identifica el valor de cada una de las probetas en la gráfica de barras.



**Figura 23.** Región lineal de la curva esfuerzo-deformación de la mezcla 70-30

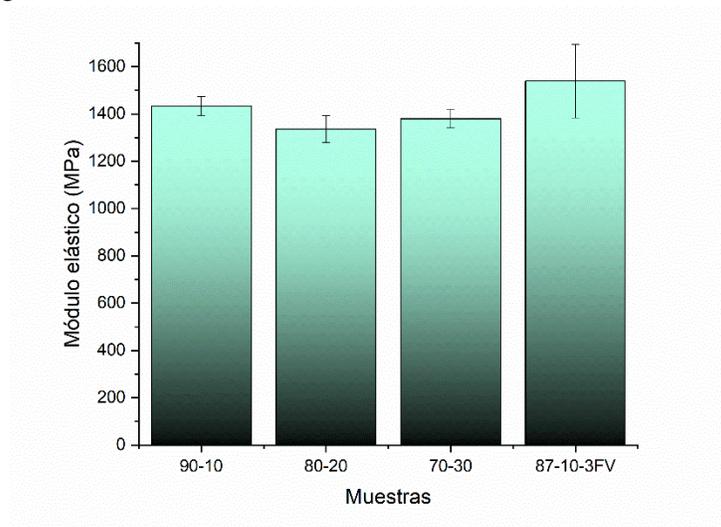
### 3.2.8 Mezcla: 87% PVC virgen - 10% PVC reciclado - 3% Fibra de vidrio

La última composición a analizar tiene valores aproximadamente entre  $1539 \pm 156$  MPa. Se observa que la fibra de vidrio aumenta levemente la rigidez del polímero, es decir, se convierte en un sólido más inelástico con refuerzo de fibra de vidrio



**Figura 24.** Región lineal de la curva esfuerzo-deformación de la mezcla 87-10-3FV

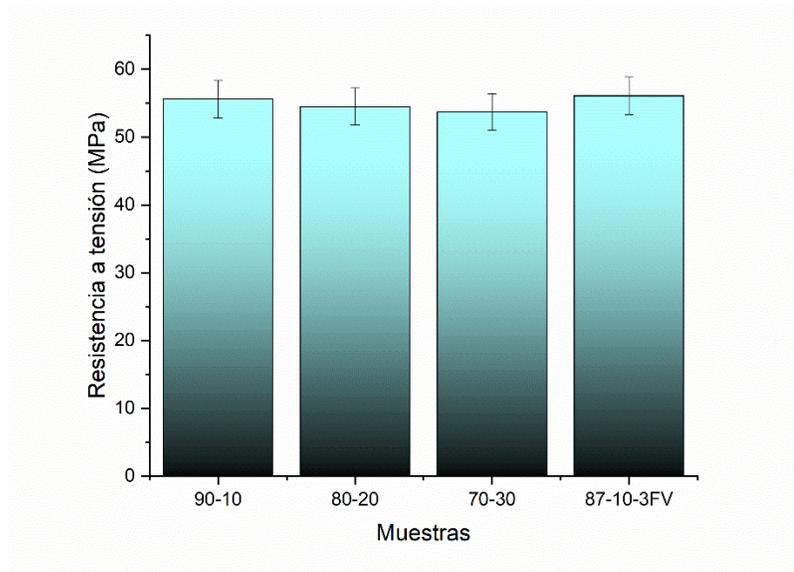
La **Figura 25** compara el módulo elástico de las 4 muestras. A partir del análisis anteriormente mencionado, se identifica que no hay diferencia estadística entre las muestras. Es decir, añadir PVC reciclado o fibra de vidrio no cambia la rigidez del material.



**Figura 25.** Comparación del módulo elástico de las 4 mezclas

#### ❖ Resistencia a la tensión

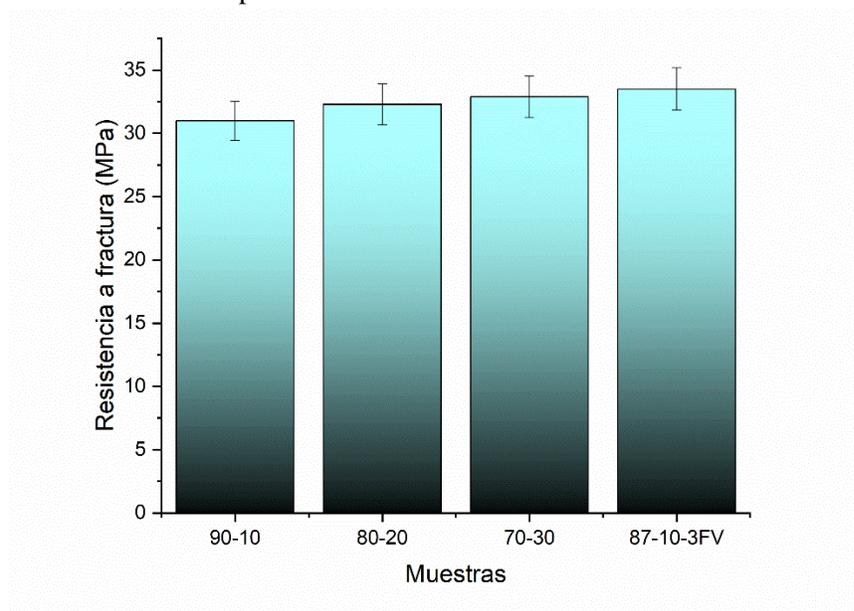
En la **Figura 26**, en la que se compara la resistencia a tensión de las diferentes mezclas, se identifica que, tal como ocurre con el módulo elástico lineal, no hay diferencia estadística entre las muestras. Es decir, el añadir PVC reciclado o fibra de vidrio no altera esta propiedad.



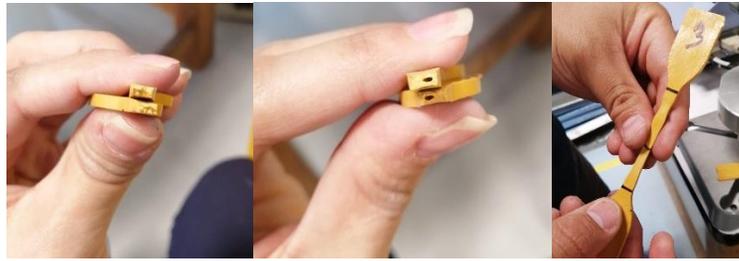
**Figura 26** Comparación de la resistencia a tensión de las mezclas

❖ **Esfuerzo de fractura**

En este punto el material con una fuerza aplicada genera rotura permanente, por ende, ese punto es fundamental para analizar en qué punto el material se rompe, es decir, en qué punto el material no resiste más fuerza. La **Figura 27** compara la resistencia a fractura de las cuatro mezclas. De nuevo, se aprecia que la adición del PVC reciclado o de la fibra de vidrio no afecta esta propiedad. Para mayor claridad, a continuación, se muestran fotos de las probetas falladas.



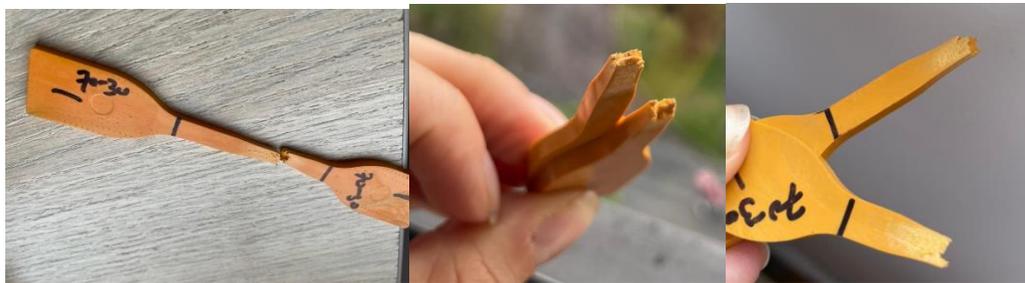
**Figura 27.** Comparación de la resistencia a fractura de las mezclas



**Figura 28** Figura de la falla de las muestras 90-10

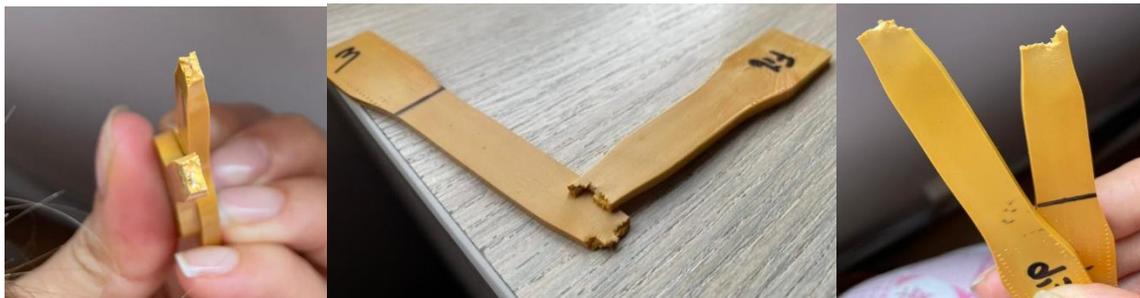


**Figura 29.** Figura de la falla de las muestras 80-20



**Figura 30.** Figura de la falla de las muestras 70-30

Dentro de las tres mezclas analizadas, se identifica que esta (**Figura 30**) es la más compacta.

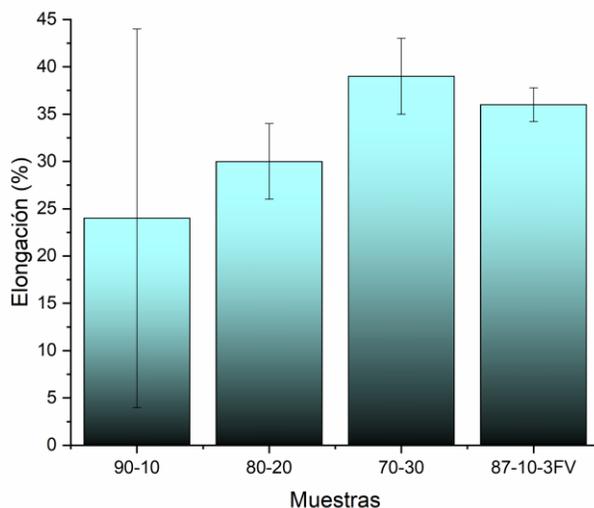


**Figura 31.** Figura de la falla de las muestras con adición de fibra de vidrio

#### ❖ Porcentaje de elongación

Este porcentaje nos indica qué tanto se puede elongar el material, es decir, qué tanto se puede estirar sin llegar a su fractura. Es la elongación que sufre el material al aplicar fuerzas continuas. Como se observó con las curvas esfuerzo-deformación, la mezcla 90-10 es la que presenta más variación en la medida. Quizá se

deba a una homogenización deficiente de los materiales que lo componen. Sin embargo, se observa que, en promedio, a mayor contenido de material reciclado, la capacidad de deformación plástica se incrementa, disminuyendo con la adición de fibra de vidrio (**Figura 32**). La capacidad de deformación plástica depende de la capacidad de deslizamiento de las moléculas del polímero una sobre otras con la aplicación de la carga externa. Como es de esperarse, la adición de reciclado hace que el material se elongue más. Sin embargo, la adición de fibra de vidrio actúa como un freno al deslizamiento de las cadenas poliméricas.



**Figura 32.** Porcentaje de Elongación

### 3.3 Ensayo de dureza

A continuación, se muestran los resultados de dureza.

#### 3.3.1 Mezcla: 90% PVC virgen - 10% PVC reciclado

EL resultado de dureza shore para esta mezcla es de  $77.3 \pm 1.2$  (**Tabla 1**).

**Tabla 1.** Datos de dureza para las probetas de la mezcla 90-10

76	78,2	77,8	77,3	DUREZA
1,58	1,64	2,17	1,17	DESVIACION

#### 3.3.2 Mezcla: 80% PVC virgen - 20% PVC reciclado

Los resultados de dureza para la mezcla 80-20 se muestran en la **Tabla 2**. En promedio, esta mezcla exhibe una dureza de  $78.9 \pm 0.4$ .

**Tabla 2.** Datos de dureza para las probetas de la mezcla 80-20

Valores	80-20-1	80-20-2	80-20-3		
	78	78	78		
	79	79	79		
	79	79	80		
	80	79	78		
	80	80	78		
<b>Falla</b>	79	80	78		
	79,17	79,17	78,5	78,9	DUREZA
	0,75	0,75	0,84	0,38	DESVIACION

*3.3.3 Mezcla: 70% PVC virgen - 30% PVC reciclado*

En cuanto a la composición 70 - 30 se identifica un leve incremento en la dureza, que pasa a ser de  $79.4 \pm 0.3$  (Tabla 3).

**Tabla 3.** Datos de dureza para las probetas de la mezcla 70-30

79,5	79,17	79,67	79,4	DUREZA
0,84	1,17	1,21	0,25	DESVIACION

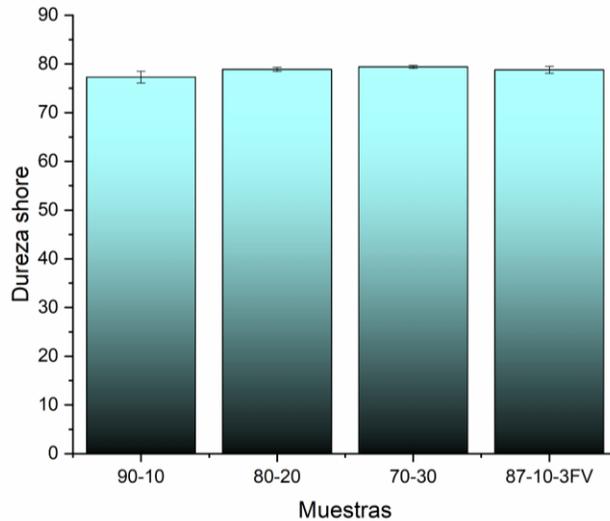
*3.3.4 Mezcla: 87% PVC virgen - 10% PVC reciclado – 3% Fibra de vidrio*

En la **Tabla 4** se muestran los resultados de dureza para la muestra con 3% de fibra.

**Tabla 4.** Datos de dureza para las probetas de la mezcla 87-10-3FV.

79,5	78,67	78,17	78,8	DUREZA
0,84	0,82	0,75	0,67	DESVIACION

La **Figura 33** compara los valores de dureza de todas las mezclas. Se observa que la adición del PVC reciclado y de la fibra de vidrio no afecta esta propiedad, es decir, no hay diferencia estadística entre las muestras. Esto es positivo, teniendo en cuenta que se está añadiendo un residuo al material.



**Figura 33.** Comparación de la dureza shore de las diferentes mezclas

#### 4. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este trabajo se remarcan las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la adición del RSU o PVC reciclado al PVC virgen, se observa que su adición no afecta la resistencia a tensión, rigidez o resistencia a fractura del material. Esto es positivo, porque indica que el uso del PVC reciclado no conlleva el detrimento de estas propiedades. Sin embargo, la adición de material reciclado sí incrementa la capacidad de deformación plástica del material o porcentaje de elongación del material, lo cual no es bueno en el uso de sus diferentes aplicaciones.
- En cuanto a la adición de fibra de vidrio, se observó que ésta tampoco afectó las propiedades a tensión de esfuerzo máximo, rigidez o resistencia a fractura. Sin embargo, la fibra de vidrio sí disminuye la capacidad de deformación plástica que le provee el material reciclado. Esto es algo positivo para las diferentes aplicaciones del PVC.
- Aunque la fibra de vidrio mejora el desempeño mecánico de las mezclas de PVC virgen y reciclado, la procesabilidad de las mezclas se ve bastante reducida, ya que ésta disminuye su fluidez dentro del barril de procesamiento.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] «▷ Qué es el PVC - Propiedades y para que sirve - REHAU». <https://www.rehau.com/es-es/que-es-el-pvc> (accedido 25 de abril de 2021).
- [2] «¿Qué es un Polímero?», 25 de noviembre de 2018. <https://todoenpolimeros.com/que-son-los-polimeros/> (accedido 10 de julio de 2022).
- [3] Mariano, «PVC | Tecnología de los Plásticos», *PVC | Tecnología de los Plásticos*, 6 de junio de 2011. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/pvc.html> (accedido 25 de abril de 2021).
- [4] «Estudio de factibilidad Planta PVC.pdf». Accedido: 25 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/15833/3/Estudio%20de%20factibilidad%20Planta%20PVC.pdf>

- [5] «Libro PVC-WEB.pdf». Accedido: 25 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://aniq.org.mx/premiopvc/assets/docs/Libro%20PVC-WEB.pdf>
- [6] miguel angel rodriguez arroyo, «Extrusion inyeccion», 03:30:45 UTC. Accedido: 25 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/miguelangelrdz/extrusion-inyeccion>
- [7] C. de C. de Bogotá, «Colombia entierra anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reciclar». <http://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar> (accedido 25 de abril de 2021).
- [8] «PVC, tendencias y oportunidades para la industria de América Latina». <https://www.plastico.com/temas/PVC,-tendencias-y-oportunidades-para-la-industria-de-America-Latina+3033031?pagina=1> (accedido 25 de abril de 2021).
- [9] «Policloruro de Vinilo (P.V.C.) - Materias Primas en Colombia. Catálogo del Empaque». <https://www.catalogodeempaques.com/home-de-categorias/policloruro-de-vinilo-pvc+15000523> (accedido 25 de abril de 2021).
- [10] «p30-49.pdf». Accedido: 25 de abril de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/p30-49>
- [11] C. De Sousa, A. Correia, y M. C. Colmenares, «Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control», *Bol. Malariol. Salud Ambient.*, vol. 50, n.º 2, pp. 187-196, dic. 2010.
- [12] C. E. E. Tiempo, «EL PVC, UN PLÁSTICO NOCIVO PARA LA SALUD», *El Tiempo*, 18 de junio de 1996. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-316564> (accedido 10 de julio de 2022).
- [13] C. E. E. Tiempo, «Colombia produce 1,4 millones de toneladas de plástico al año», *Portafolio.co*. <https://www.portafolio.co/economia/colombia-produce-1-4-millones-de-toneladas-de-plastico-al-ano-566367> (accedido 10 de julio de 2022).
- [14] «Reciclar PVC: el mejor aislamiento con un menor impacto ambiental · Vivienda Saludable», *Vivienda Saludable*, 27 de agosto de 2018. <https://www.viviendasaludable.es/sostenibilidad-medio-ambiente/reciclaje-gestion-residuos/reciclar-pvc> (accedido 10 de julio de 2022).
- [15] «Propiedades de la fibra de vidrio, formatos y usos», *Servei Estació*, 9 de junio de 2021. <https://serveiestacio.com/blog/propiedades-de-la-fibra-de-vidrio/> (accedido 15 de marzo de 2022).
- [16] «Aditivos para PVC | QuimiNet.com». <https://www.quiminet.com/articulos/aditivos-para-pvc-21850.htm> (accedido 25 de abril de 2021).
- [17] Mariano, «Reciclado de PVC | Tecnología de los Plásticos», *Reciclado de PVC | Tecnología de los Plásticos*, 31 de octubre de 2012. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/10/reciclado-de-pvc.html> (accedido 25 de abril de 2021).
- [18] «9 Beneficios de usar PVC en sistemas de tubería.», *QUIMA*. <https://quima.com/blogs/blog/9-beneficios-de-usar-pvc-en-sistemas-de-tuberia> (accedido 25 de abril de 2021).
- [19] «AEC - Normas ASTM». <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/normas-astm> (accedido 10 de julio de 2022).
- [20] «pvc.pdf». Accedido: 15 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://estudiyensayo.files.wordpress.com/2008/11/pvc.pdf>
- [21] «AIMPLAS - Ensayos de dureza en materiales plásticos», *AIMPLAS*. <https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/ensayo-de-dureza/> (accedido 15 de marzo de 2022).

- [22] «Ficha Seguridad..pdf». Accedido: 15 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: [https://pruebacorreoescuolaingeducomy.sharepoint.com/personal/laura\\_baez\\_mail\\_escuelaing\\_edu\\_co/Documents/Microsoft%20Teams%20Chat%20Files/Ficha%20Seguridad..pdf](https://pruebacorreoescuolaingeducomy.sharepoint.com/personal/laura_baez_mail_escuelaing_edu_co/Documents/Microsoft%20Teams%20Chat%20Files/Ficha%20Seguridad..pdf)
- [23] P. S. Cáceres, «Ensayo de tracción», *Blog de Tecnología - IES José Arencibia Gil - Telde*, 23 de septiembre de 2015. <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/fsancac/2015/09/23/elongacion/> (accedido 19 de julio de 2022).