



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Optimización de procesos y calidad en la fabricación de bolsas plásticas de polietileno de alta densidad con enfoque en la extrusión, composición y reciclado

POR

Cristobal Felipe Fierro Mellado

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dra. Meylí Valin
Profesor Co-Guía:
Dr. Carlos Medina

Marzo 2024
Concepción (Chile)

Resumen

Este proyecto se centró en estandarizar y optimizar el proceso de extrusión de películas sopladas de polietileno en la empresa Fabriplast. El objetivo principal fue normalizar la composición de las mangas de polietileno de alta densidad (HDPE) mediante el análisis de los materiales y parámetros operativos utilizados.

Inicialmente, se realizó un estudio detallado del proceso de extrusión y los materiales empleados, como HDPE, LLDPE (polietileno lineal de baja densidad), pigmentos y material reciclado. Se identificaron como variables críticas la proporción de LLDPE y pigmento en la mezcla. A través de pruebas experimentales de tracción y punción, se evaluó el impacto de variar las cantidades de LLDPE y pigmento sobre propiedades mecánicas como resistencia máxima, resistencia al esfuerzo y alargamiento. Los resultados demostraron que un incremento de un 5% más en la concentración de LLDPE aumenta la resistencia máxima, mientras que una reducción de un 1% en el contenido de pigmento mejora tanto la resistencia como la elongación.

En conclusión, se recomienda ajustar las proporciones de LLDPE y pigmento en la mezcla para optimizar las propiedades mecánicas de las películas, obteniendo productos más resistentes y alargables que cumplan con los requisitos de calidad. Se sugiere continuar monitoreando los efectos de estas variaciones para determinar las proporciones óptimas mediante un enfoque sistemático basado en datos.

Este estudio sienta las bases para la estandarización del proceso y la mejora continua en Fabriplast, contribuyendo a maximizar la eficiencia, reducir costos y obtener productos de la mejor calidad.

Abstract

This project focused on standardizing and optimizing the extrusion process of high-density polyethylene (HDPE) blown film at Fabriplast company. The main objective was to standardize the composition of HDPE sleeves by analyzing the materials and operating parameters used.

Initially, a detailed study of the extrusion process and the materials employed, such as HDPE, linear low-density polyethylene (LLDPE), pigments, and recycled material, was conducted. The proportion of LLDPE and pigment in the mix was identified as critical variables.

Through experimental tests of tensile and puncture properties, the impact of varying LLDPE and pigment quantities on mechanical properties such as maximum strength, tensile strength, and elongation was evaluated. The results demonstrated that a moderate increase in LLDPE concentration enhances maximum strength, while a slight reduction in pigment content improves both strength and elongation.

In conclusion, adjusting the proportions of LLDPE and pigment in the mix is recommended to optimize the mechanical properties of the films, obtaining stronger and more elongatable products that meet quality requirements. It is suggested to continue monitoring the effects of these variations to determine the optimal proportions through a systematic data-driven approach. This study lays the groundwork for process standardization and continuous improvement at Fabriplast, contributing to maximizing efficiency, reducing costs, and obtaining high-quality products that meet market demands.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iv
Lista de Tablas	vi
Lista de Figuras	vii
1 CAPÍTULO 1: Introducción y planteamiento del problema.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis de trabajo	3
1.5 Metodología.....	3
2 Capítulo 2: Antecedentes teóricos.....	5
2.1 Proceso de extrusión	5
2.2 Extrusora de husillo simple	5
2.3 Componentes de la extrusora.....	6
2.3.1 Tolva	6
2.3.2 Tornillo de extrusión o husillo.....	7
2.3.3 Cabezal de soplado o boquilla	7
2.3.4 Unidad de enfriamiento.....	8
2.3.5 Unidad de tiro	9
2.3.6 Unidad de bobinado	9
2.4 Revolvedor (mezclador) de material	9
2.5 Parámetros del proceso de extrusión de películas sopladas	10
2.5.1 Perfil de temperatura.....	11
2.5.2 Velocidad de giro del tornillo	11
2.5.3 Presión de soplado	12
2.5.4 Velocidad de estiramiento.....	12
2.6 Materiales	13
2.6.1 Polietileno de alta densidad	13
2.6.2 Polietileno lineal de baja densidad.....	14
2.6.3 Pigmento	15
2.6.4 Material Reciclado	16

3 Capítulo 3: Antecedentes y caracterización experimental	17
3.1 Antecedentes.....	17
3.2 Implementación	18
3.3 Propiedades mecánicas	19
3.3.1 Ensayo de tracción-deformación.....	19
3.3.2 Ensayo de punción	20
3.4 Banco de ensayos de punción.....	21
3.5 Preparación de probetas.....	24
4 Capítulo 4: Experimentos y discusión.....	25
4.1 Pruebas experimentales ensayo de tracción.....	25
4.1.1 Muestras aleatorias.....	25
4.1.2 Muestra focalizada en el pigmento	30
4.1.3 Muestra focalizada en el LLDPE (Polietileno Lineal).....	33
4.2 Pruebas experimentales ensayo de punción.....	36
4.2.1 Muestra focalizada en el pigmento.	37
4.2.2 Muestra focalizada en LLDPE.....	39
5 Capítulo 5: Conclusión y discusión.....	43
5.1 Por objetivos específicos	¡Error! Marcador no definido.
5.2 Comportamiento mecánico y mezclas	¡Error! Marcador no definido.
5.3 Trabajos futuros	43
Referencias	44
Anexo A: Carta Gantt.....	44
Anexo B: Base para adaptación ensayo de punción.....	45
Anexo C: Base porta muestra ensayo de punción	46
Anexo D: Placas de fijación de muestras ensayo de punción	47
Anexo E: Punzón ensayo de punción	48

Lista de Tablas

Tabla 1: Composición de muestras aleatorias.	26
Tabla 2: Propiedades mecánicas promedio de muestras aleatorias.	26
Tabla 3: Tabla de correlaciones muestras aleatorias en tracción.	28
Tabla 4: Correlaciones en pareja de Pearson para muestras aleatorias.	29
Tabla 5: Composición muestras con variación de pigmento.....	30
Tabla 6: Tabla de correlaciones muestras con variación de pigmento en tracción.	31
Tabla 7: Composición de muestras con variación de LLDPE.	33
Tabla 8: Tabla de correlaciones muestras con variación de LLDPE en tracción.....	34
Tabla 9: Tabla de correlaciones muestras con variación de LLDPE en punción.....	37
Tabla 10: Tabla de correlaciones muestras con variación de LLDPE en punción.....	40

Lista de Figuras

Figura 1: Productos de la empresa: a) bolsa especial, b) bolsa camiseta, c) bolsa de basura, d) rollo prepicado.	1
Figura 2: Esquema de Extrusión de película soplada.....	6
Figura 3: Tolva.	7
Figura 4: Tornillo.	7
Figura 5: Cabezal de soplado.	8
Figura 6: Unidad de enfriamiento.	8
Figura 7: Unidad de bobinado.	9
Figura 8: A la izquierda a) Revolvedor y a la derecha b) mezcla que ingresa al revolvedor.....	10
Figura 9: Panel de control: a la izquierda a) Temperatura de resistencias, a la derecha b) velocidades.	11
Figura 10: Marcador de diámetro.....	12
Figura 11: Mezcla de materiales.	13
Figura 12: Polietileno de alta densidad.	14
Figura 13: Polietileno lineal de baja densidad.	15
Figura 14: MasterBatch pigmento.....	16
Figura 15: Extrusora de doble cabezal Polystar	17
Figura 16: Extrusora Polystar en la fabrica.....	18
Figura 17: Esquema de probetas para ensayo de tracción.....	20
Figura 18: Ensayo de punción.....	20
Figura 19: Modelo banco de ensayos de punción.	21
Figura 20: Base de banco de ensayo de punción.....	22
Figura 21: Base porta muestra.....	22
Figura 22: Clamps.	23
Figura 23: Placa para fijar muestra.	23
Figura 24: Plataforma de ensayos en maquina universal.	24
Figura 25: Grafica de matriz de correlación en muestras aleatorias	27
Figura 26: Correlograma muestras aleatorias en tracción.	28
Figura 27: Grafica de matriz de correlación: probetas con variación de pigmento en tracción.....	31
Figura 28: Correlograma de muestras con variación de pigmento en tracción.....	32
Figura 29: Graficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de pigmento en tracción.	33
Figura 30: Grafica de matriz de correlación: probetas con variación de LLDPE en tracción.	34
Figura 31: Correlograma de muestras con variación de LLDPE en tracción.....	35
Figura 32: Graficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de LLDPE en tracción.	36
Figura 33: Grafica de matriz de correlación: probetas con variación de pigmento en punción.....	37
Figura 34: Correlograma de muestras con variación de pigmento en punción.	38
Figura 35: Graficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de pigmento en punción.	39

Figura 36: Grafica de matriz de correlación: probetas con variación de LLDPE en punción.	40
Figura 37: Correlograma de muestras con variación de LLDPE en punción.....	41
Figura 38: Graficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de LLDPE en punción.	42

Glosario

ε_T	:	Elongación máxima por unidad de tensión
ε_M	:	Elongación máxima
σ_{x1}	:	Esfuerzo de fluencia
σ_M	:	Esfuerzo máximo
LDPE	:	Polietileno de baja densidad
HDPE	:	Polietileno de alta densidad
LLDPE	:	Polietileno lineal de baja densidad
S		Tensión
TEB	:	Tension Energy to Break

CAPÍTULO 1: Introducción y planteamiento del problema

En este capítulo, se introduce el tema con respecto a la importancia en la industria de la estandarización de procesos. Además, se aborda el contexto en el cual la empresa presenta el problema, considerando tanto su dimensión técnica como económica. Esto facilita la cuantificación del problema mediante los objetivos del proyecto. Además, se exponen las tareas y desafíos que serán abordados para alcanzar una solución integral.

1.1 Contexto

Este proyecto se lleva a cabo en Fabriplast, una empresa ubicada en la comuna de Talcahuano, dedicada a la fabricación de bolsas plásticas de diversos tipos, como se ilustra en la Figura 1. Estos incluyen bolsas tipo camiseta, bolsas de alta y baja densidad, rollos prepicados, mangas de riego, bolsas de basura, entre otros.



Figura 1: Productos de la empresa: a) bolsa especial, b) bolsa camiseta, c) bolsa de basura, d) rollo prepicado.

Con más de 20 años de experiencia, Fabriplast produce anualmente más de 90,000 kilos anuales de bolsas plásticas, lo que se traduce en ventas que abarcan los \$3.000 millones de pesos anuales. A pesar de su éxito en producción y ganancias, la empresa ha seguido un enfoque de 'prueba y error' desde sus inicios. Esta metodología, o la falta de una, genera que la fabricación presente leves variaciones que luego se traducen en inconsistencias en los productos. Considerando el actual dinamismo del mercado, caracterizado por una competencia creciente y demandas cada vez más rigurosas por parte de los consumidores, se resalta la importancia de la estandarización en las líneas de producción. En este entorno altamente competitivo, donde la calidad y la eficiencia son primordiales, las empresas se enfrentan al reto de satisfacer las exigencias de un mercado en constante evolución. Por ejemplo, en sectores como la industria alimentaria, donde la uniformidad y el control de los productos son fundamentales, la ausencia de un manual o guía que establezca proporciones definidas representa un desafío significativo para la empresa. En este contexto, la estandarización emerge como una estrategia clave para garantizar la consistencia en la calidad y responder de manera efectiva a las demandas del mercado y los consumidores. La adopción de normas como la ISO 9001 puede proporcionar a Fabriplast un marco sólido para desarrollar sistemas de gestión de calidad efectivos, lo que ayudaría a establecer procesos estandarizados y mejorar la calidad de sus productos.

La estandarización de procesos y normas dentro de una empresa u organización tiene como objetivos principales ahorrar dinero y tiempo. Según se menciona en [1], una estandarización de los procesos de producción permitirá establecer metodologías de trabajo y estructuración, buscando organizar la producción en etapas para beneficiar la eficiencia de los procesos y la reducción de costos. Para lograr este objetivo, es fundamental visualizar el conjunto de pasos y prácticas comunes que ocurren en las líneas de producción y evaluar los componentes esenciales que incurren en la eficiencia del trabajo y la calidad de los productos. En línea con lo anterior, se sugiere en [2] que estudiar y establecer parámetros definidos en la composición de los productos, especialmente en las proporciones de material utilizado, podría aumentar la productividad, garantizar la calidad, mejorar la eficiencia e impulsar la mejora continua.

La empresa ha expresado su interés en adherirse a la norma ISO 9001, la cual establece un conjunto de requisitos de calidad que las organizaciones deben cumplir para garantizar la satisfacción de sus clientes. La adopción de esta norma implica desarrollar Sistemas de Gestión de la Calidad (SGC) dentro de la organización, asegurando su capacidad para ofrecer productos y servicios que satisfagan las necesidades del cliente, cumpliendo con los requisitos legales y reglamentarios pertinentes y buscando mejorar continuamente sus procesos.

La norma ISO 9001 es ampliamente reconocida como el estándar principal en las relaciones entre clientes y proveedores, siendo relevante para una variedad de sectores y especialmente para las PYMES y empresas emergentes. Esta norma ha simplificado los requisitos considerados como "burocráticos" y ha promovido un enfoque centrado en la mejora continua, el análisis del contexto empresarial y la gestión de riesgos. Además, ha adoptado una estructura de ciclo de mejora que facilita la integración con otros aspectos de gestión, como los ambientales, de seguridad y salud en el trabajo, y de responsabilidad social. [3]

1.2 Planteamiento del problema

La fabricación de los productos de Fabriplast presenta variaciones tanto en la proporción como en la composición de los materiales, así como en los parámetros de operación de la maquinaria y los turnos de los operadores. Los materiales empleados comprenden principalmente polímeros termoplásticos como el polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y polietileno lineal (LDPE). Además, para la coloración de las bolsas, se utilizan pigmentos correspondientes a colores primarios (rojo, amarillo y azul) y neutros (negro y blanco), permitiendo una amplia gama de colores.

En cuanto a los parámetros de la máquina, los operadores ajustan variables como la temperatura de fundición, la velocidad del rotor de empuje y la velocidad de los rodillos de estiramiento, entre otros, sin contar con un control definido durante el proceso. Esta combinación de factores es determinada por el operador en turno, basándose en inspecciones visuales y táctiles de las mangas.

Es relevante resaltar que surgen fallas en los globos soplados de película durante la etapa de extrusión, lo cual se presume está relacionado con cambios en las mezclas, parámetros y operadores. Este aspecto será objeto de estudio en una escala menor, dado que genera pérdidas de tiempo y cortes en la producción, especialmente cuando no se detectan a tiempo, ya que la máquina carece de un sistema o sensor que identifique estas fallas. Por otro lado, los operadores comentaron, que según sus observaciones el material reciclado de PE que se utiliza puede ser el detonante de inconsistencias debido a que el grano generalmente presenta diferencias de tamaño y dureza.

El objetivo principal de este proyecto es lograr la optimización de los procesos y la estandarización de la composición. Esto se llevará a cabo directamente con una extrusora de película soplada de la marca Polystar, la cual procesa mezclas de HDPE. La meta es unificar la composición de los productos, lo que generará beneficios económicos y productivos para la empresa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Normalizar la composición de material de las mangas obtenidas en la línea de extrusión del polietileno de alta densidad.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar y esquematizar el proceso de producción de la línea de extrusión del polietileno de alta densidad.
- Analizar la composición de los materiales y la proporción introducida a la máquina para producir distintos gramajes, espesores y colores de mangas.
- Evaluar el comportamiento de la manga en relación con la composición y proporción de los materiales.
- Realizar pruebas de resistencia para establecer parámetros de fabricación óptimos.

1.4 Hipótesis de trabajo

Se obtienen variaciones de proporción de material ideales para la operación de la máquina extrusora de polietileno de alta densidad, que concluya en una estandarización de las proporciones que busque unificar las propiedades mecánicas, además de disminuir en un 20% las fallas que se presentan en el globo (manga).

1.5 Metodología

Para contextualizar el problema, se iniciará el estudio abordando la composición y el funcionamiento de la máquina extrusora mediante el análisis detallado del manual proporcionado por

el proveedor [4]. Este enfoque permitirá identificar las etapas fundamentales del proceso de producción de mangas de polietileno de alta densidad.

A continuación, se llevará a cabo un estudio de las variables de operación del proceso, donde se consulta a los operadores de diferentes turnos para recopilar información sobre las proporciones específicas de materiales empleadas para distintos gramajes, espesores y colores de manga. Esta información será esencial como punto de referencia para establecer las proporciones de estudio.

El análisis del comportamiento de la manga será una fase crucial de la metodología. Se examinarán detalladamente factores como el espesor, la resistencia y el color, entre otras características relevantes. Se buscarán métodos efectivos para evaluar la resistencia de las mangas, estableciendo criterios sólidos para determinar la calidad del producto final.

Con los datos recopilados, se procederá a analizar las composiciones y parámetros de operación óptimos que maximicen la calidad y eficiencia del proceso. Se realizarán pruebas adicionales para validar y refinar los resultados obtenidos, proponiendo ajustes a la composición y parámetros de operación de la máquina extrusora con el objetivo de mejorar la producción y reducir las fallas en el proceso.

Se validará la efectividad de los resultados mediante pruebas adicionales y comparación con estándares de la industria. Se llevarán a cabo consultas con operadores y supervisores para asegurar la viabilidad y aplicabilidad práctica de los nuevos parámetros propuestos, garantizando así la normalización de la composición de las mangas y la optimización del proceso de producción.

Cabe destacar que la estadística y correlaciones que nos ayudaran a interpretar los resultados de los ensayos se realizara en un software llamado Minitab, el cual está diseñado para ejecutar funciones estadísticas. Con este programa obtendremos 3 resultados fundamentales: matriz de correlación, correlograma y dispersión.

Finalmente, se comentarán los resultados obtenidos con el supervisor a cargo, presentando los resultados estadísticos y concluyendo cuales son los objetivos de producción y terminación del producto.

Capítulo 2: Antecedentes teóricos

En este capítulo, se expone el proceso de extrusión tal cual ocurre en la planta, detallando la maquinaria utilizada y sus parámetros operativos. Haciendo énfasis en la descripción y propiedades de los materiales esenciales, así como en el proceso específico de extrusión diseñado para películas sopladas delgadas. Se expone con minuciosidad los materiales y parámetros de la máquina, evidenciando la carencia de un control definido en el método de producción.

2.1 Proceso de extrusión

La extrusión consiste en un proceso industrial en el cual un material polimérico se funde y moldea por compresión. Este material fundido es dirigido a través de una boquilla para la producción de productos con formas específicas. La eficiencia de este proceso destaca especialmente cuando se busca transformar polímeros en productos de sección continua.

El componente central de la extrusión es la máquina extrusora, el equipo principal encargado de este proceso. La extrusora consta esencialmente de un husillo que transporta el material en estado sólido hacia una boquilla. La plastificación del polímero ocurre mediante la combinación de la temperatura generada por resistencias eléctricas y la fricción generada por el elemento giratorio. El termoplástico es impulsado a salir bajo presión a través de una boquilla que le proporciona una forma definida, seguido de un proceso de enfriamiento que induce su solidificación y estabilización. [5]

En el caso particular de la extrusión de películas sopladas, se distingue por la formación de una burbuja continua, lograda mediante el uso de una boquilla de soplado. Este método difiere del proceso de extrusión convencional al permitir la creación de películas con propiedades particulares y aplicaciones específicas.

2.2 Extrusora de husillo simple

Para el estudio de este proyecto, se empleará una máquina extrusora de husillo simple con doble cabezal. Este diseño implica la presencia de un solo cañón y un husillo en el sistema. En la operación del proceso, el material en forma de pellets o granos se carga en la tolva, la cual, por gravedad, alimenta a la extrusora. En este punto, el polímero experimenta un proceso que implica calentamiento, mezclado, fusión y es forzado a salir por la boquilla.

Particularmente, en el proceso de soplado de película plástica, se funde un polímero termoplástico que se estira y sopla para formar una película continua. El uso de una máquina de doble cabezal permite la producción simultánea de dos películas mediante dos extrusores y dos cabezales de soplado, lo que facilita la creación de materiales con diferentes secciones.

En el caso específico de la extrusora de la marca Polystar utilizada en la fábrica, se destaca la presencia de un tornillo bimetálico que facilita el procesamiento de un alto porcentaje de material reciclado y muestra una excelente resistencia a compuestos presentes en los pigmentos.

La Figura 2 esclarece de manera gráfica el proceso de extrusión vinculado con nuestra investigación. Desde la introducción del material en la tolva hasta la formación del rollo con los metros precisos para la siguiente etapa de la línea, que involucra el sellado inferior de la bolsa y el corte en la parte superior. En el caso específico de las películas sopladas, esta técnica fusiona extrusión y soplado, dando origen a un tubo vertical continuo de pared delgada. Esta combinación ofrece beneficios notables, como la variabilidad en el ancho y espesor de la película, mejorando las propiedades mecánicas gracias a la orientación longitudinal y transversal del material. Este proceso inicia con la fusión de la resina, sometida a calor y presión en el cilindro de la extrusora, seguido por la formación de un tubo inflado y enfriado mediante una corriente de aire del anillo de enfriamiento.[6]

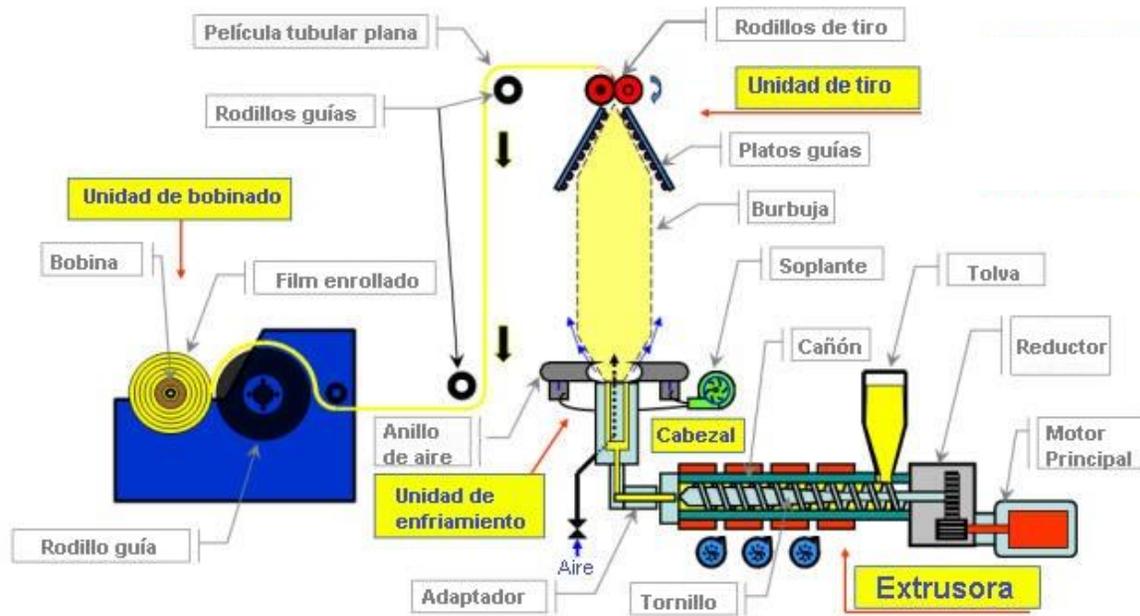


Figura 2: Esquema de Extrusión de película soplada.

2.3 Componentes de la extrusora.

En esta sección, se abordarán de manera detallada los componentes fundamentales de la extrusora, siguiendo el flujo del proceso.

2.3.1 Tolva

La tolva, como componente integral de la extrusora, desempeña un papel fundamental en la introducción del polímero en formato de granos al proceso. Su función primordial consiste en alimentar de manera continua la extrusora mediante el principio de gravedad. Es importante destacar que, dada la capacidad de carga limitada de las tolvas en general, se implementa un sistema tipo aspiradora para mantener un suministro constante, rellenándola periódicamente en intervalos programados.

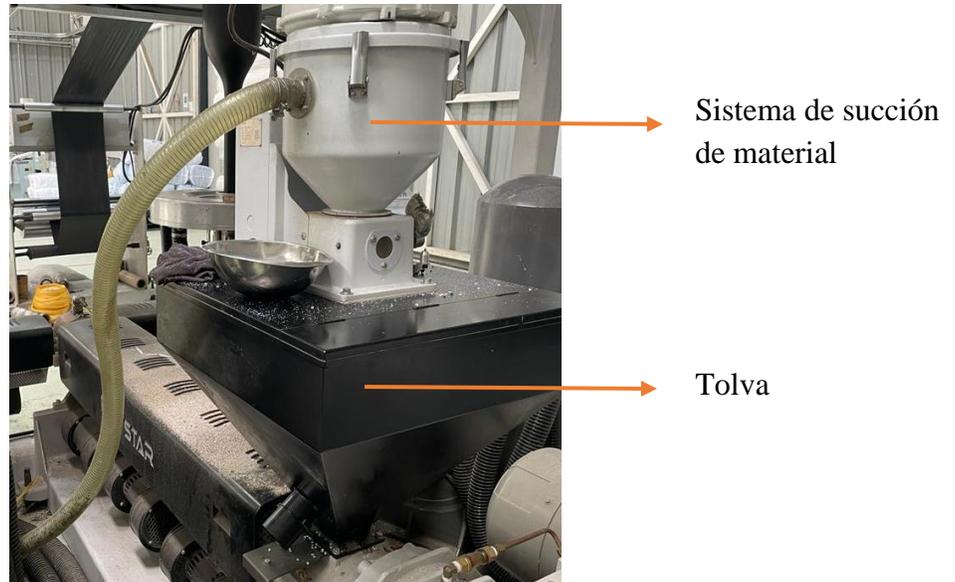


Figura 3: Tolva.

2.3.2 Tornillo de extrusión o husillo

El tornillo de extrusión o husillo juega un papel crucial en el proceso, ya que impulsa y funde el polímero mediante su rotación. Su función principal incluye generar el movimiento de avance del material, presionándolo para que salga a través de la boquilla, dando lugar a la formación posterior de la película. Este componente es esencial para el flujo y la plastificación efectiva del polímero durante el proceso de extrusión.



Figura 4: Tornillo.

2.3.3 Cabezal de soplado o boquilla

El cabezal de soplado, también conocido como boquilla, es la parte crítica por la cual el material emerge del husillo, siendo responsable de darle al polímero fundido la forma de burbuja

continua. Este componente desempeña un papel decisivo en la definición de la geometría y espesor de la película resultante, siendo esencial para el control preciso del proceso de extrusión y la calidad del producto final.

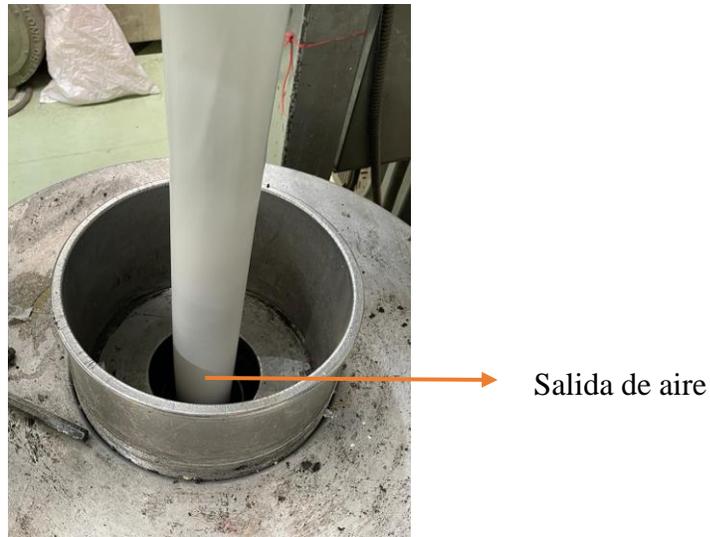


Figura 5: Cabezal de soplado.

2.3.4 Unidad de enfriamiento

La unidad de enfriamiento, integrada por una bomba y un anillo, constituye un sistema fundamental para lograr la solidificación y estabilización de la película. A través de la circulación controlada de aire frío, este componente desempeña un papel esencial en el proceso al garantizar que la película adquiera las propiedades deseadas mediante un enfriamiento eficiente y controlado.

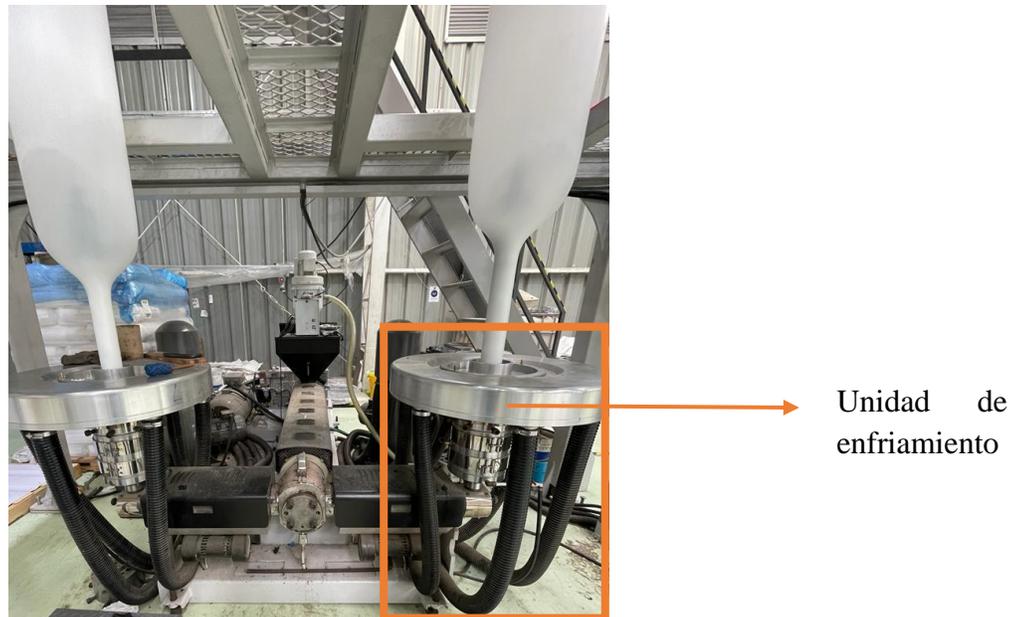


Figura 6: Unidad de enfriamiento.

2.3.5 Unidad de tiro

La unidad de tiro, esencial en el proceso de extrusión, despliega un sistema de tracción que estira y ajusta el ancho de la película. Su función principal es controlar las dimensiones finales de la película y mejorar la orientación molecular. Conformada por tres rodillos o más, estos giran a una velocidad regulada y están diseñados para eliminar rugosidades de la película, contribuyendo así a la obtención de un producto final con características óptimas.

2.3.6 Unidad de bobinado

La unidad de bobinado, componente final del proceso de extrusión, cumple la función crucial de enrollar y recolectar la película extruida. Su contribución es esencial para facilitar la manipulación y almacenamiento eficiente del producto. El rollo resultante de esta etapa se dirige directamente a la línea de corte y sellado, donde se procede a la fabricación de la bolsa, cerrando así el ciclo del proceso productivo.

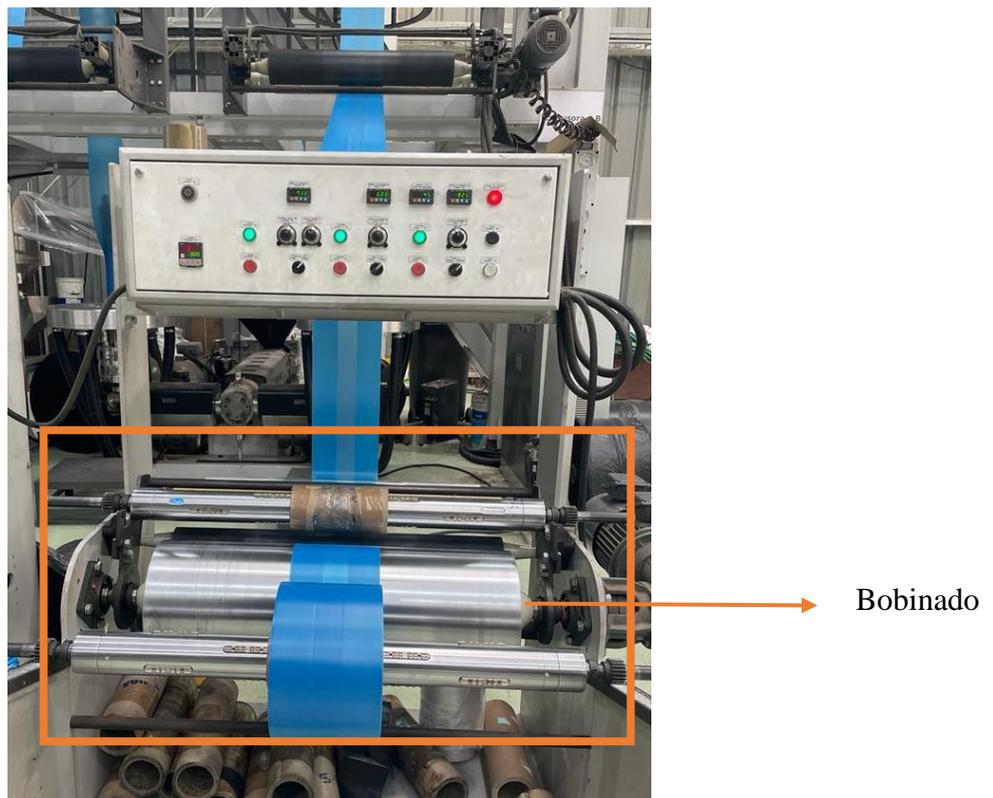


Figura 7: Unidad de bobinado.

2.4 Revolvedor (mezclador) de material

El revolvedor, también conocido como mezclador, se presenta como un dispositivo esencial destinado a lograr una homogénea combinación de diversos materiales, tales como HDPE, LLDPE, pigmentos y material reciclado, dependiendo de la situación específica. Este proceso se lleva a cabo antes de cargar los materiales en la tolva de la extrusora, asegurando una mezcla uniforme que resulta

fundamental para alcanzar una composición homogénea durante la extrusión y, por ende, en la película final.

La mezcla adecuada entre los polímeros y pigmentos desempeña un papel clave en la prevención de la generación de heterogeneidades en la película soplada. Esta uniformidad contribuye significativamente a mantener propiedades mecánicas y estéticas consistentes, elevando así la calidad y el rendimiento del producto final.



Figura 8: A la izquierda a) Revolvedor y a la derecha b) mezcla que ingresa al revolvedor.

2.5 Parámetros del proceso de extrusión de películas sopladas

Como se mencionó anteriormente, la extrusión presenta ventajas notables en términos de alta productividad y facilidad para producir de manera continua bajo condiciones específicas. Sin embargo, para llevar a cabo el proceso de extrusión de plásticos de manera correcta y eficiente, es crucial considerar diversos aspectos variables.

En el proceso de extrusión, intervienen variables críticas, entre las cuales se encuentran el perfil de temperatura de extrusión, la velocidad del tornillo y la velocidad de halado. Además, para el soplado, se deben tener en cuenta la relación de soplado y la relación de estiramiento. La optimización

y control adecuado de estos parámetros resultan fundamentales para garantizar la calidad y eficiencia del proceso, así como para lograr las propiedades deseadas en la película final.



Figura 9: Panel de control: a la izquierda a) Temperatura de resistencias, a la derecha b) velocidades.

2.5.1 Perfil de temperatura

El perfil de temperatura se refiere a la cuidadosa regulación de las temperaturas internas a lo largo del cañón de la extrusora, controladas mediante resistencias eléctricas y adaptadas según el material y producto deseados. Estas resistencias, estratégicamente distribuidas a lo largo del husillo, mantienen la temperatura constante para prevenir obstrucciones o irregularidades en el proceso.

El objetivo de ajustar estas temperaturas es lograr una viscosidad óptima, maleabilidad adecuada y resistencia al fundido del polímero durante su procesamiento. Aunque los fabricantes proporcionan rangos sugeridos, la experiencia permite realizar ajustes específicos en estas temperaturas. Por lo general, para el polietileno (PE), estos rangos oscilan entre 160°C y 240°C, buscando siempre alcanzar condiciones que favorezcan la eficiencia y calidad del proceso de extrusión.

2.5.2 Velocidad de giro del tornillo

La velocidad de giro del tornillo se refiere a la cantidad de material que el tornillo expulsa a través del cabezal. Valores más altos en esta velocidad incrementan la producción, pero pueden dar lugar a problemas como la disminución de la estabilidad de la burbuja o la fractura del fundido, fenómeno conocido como "piel de naranja".

Esta variable, medida en Hertzios (Hz), desempeña un papel crucial en la producción, regulando el caudal o cantidad de material que se empuja hacia el sistema. Su control preciso es esencial para mantener la estabilidad del proceso y prevenir problemas asociados con la acumulación excesiva o insuficiente de material. En este sentido, encontrar un equilibrio óptimo en la velocidad de giro del tornillo se convierte en un factor determinante para el rendimiento eficiente del proceso de extrusión.

2.5.3 Presión de soplado

La presión de soplado se refiere a la cantidad de aire expulsada a través del cabezal de soplado. Es esencial ajustar esta variable para controlar la forma y dimensiones de la burbuja durante el proceso de extrusión. Un flujo de aire preciso asegura la estabilidad de la burbuja y contribuye a la uniformidad del grosor de la película.

Para gestionar esta variable de manera efectiva, las máquinas están equipadas con un sistema de marcado, visible en la figura adjunta. Este sistema se posiciona según el diámetro deseado y se ajusta el flujo de aire hasta que la burbuja alcanza dicho diámetro. Este control preciso de la presión de soplado resulta crucial para mantener la calidad y consistencia del proceso, evitando posibles problemas asociados con fluctuaciones indeseadas en la forma y grosor de la película.

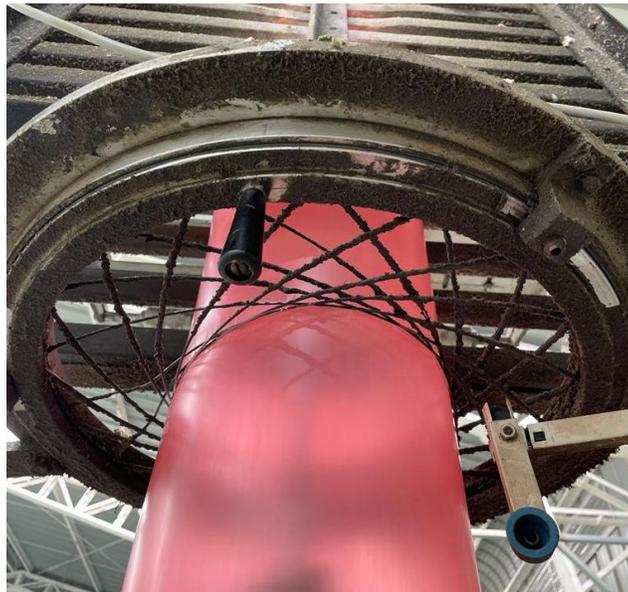


Figura 10: Marcador de diámetro.

2.5.4 Velocidad de estiramiento

La velocidad de estiramiento regula la rapidez con la que los rodillos estiran la película, influyendo de manera determinante en las propiedades finales del producto, especialmente en aspectos como la resistencia y la transparencia.

Ajustar de manera adecuada la velocidad de los rodillos de tiro en relación con la velocidad de extrusión es esencial para controlar la uniformidad del espesor de la película y optimizar sus propiedades mecánicas. Para mantener un control preciso sobre este parámetro, los operadores realizan inspecciones continuas de las mangas, asegurándose de que el espesor sea el correcto. Este proceso de monitoreo constante garantiza la conformidad con los estándares de calidad establecidos y la producción de películas con propiedades mecánicas consistentes.

2.6 Materiales

La primera fase del proceso se centra en la alimentación de la máquina, utilizando principalmente polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), junto con sus correspondientes pigmentos y material reciclado. Para suministrar la máquina con los pellets de polímero, se lleva a cabo un proceso inicial de mezclado. En un mezclador, como se ilustra en la Figura 8b, se cargan los kilogramos específicos de cada material y se mezclan durante un tiempo predeterminado. El objetivo es lograr que el material que ingresa al tornillo sinfín presente una mezcla tan homogénea como sea posible.

Cada uno de los materiales utilizados aporta propiedades particulares al producto final, y la calidad de la mezcla inicial desempeña un papel esencial en la uniformidad y consistencia de la película extruida.



Figura 11: Mezcla de materiales.

2.6.1 Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad, conocido por sus siglas en inglés HDPE (High Density Polyethylene), es un polímero termoplástico compuesto por múltiples unidades de etileno. Este polietileno se obtiene mediante la adición de unidades de etileno, y sus moléculas presentan escasas ramificaciones, otorgándole una densidad molecular considerable que resulta en una notable resistencia y dureza, así como una tolerancia a altas temperaturas. [7]

Destaca por su excepcional rigidez y resistencia, proporcionándole ventajas significativas frente a impactos, tracción y condiciones térmicas. Además, es notablemente resistente a ácidos y disolventes. Desde el punto de vista físico, contribuye a la mezcla con características como densidad y resistencia, mientras que desde la perspectiva química aporta resistencia frente a agentes químicos, humedad y transparencia. La presencia de HDPE en la mezcla juega un papel crucial en la definición de las propiedades físicas y químicas de la película final.



Figura 12: Polietileno de alta densidad.

2.6.2 Polietileno lineal de baja densidad

El polietileno lineal de baja densidad, conocido por sus siglas en inglés LLDPE (Linear Low Density Polyethylene), es otro polímero termoplástico ampliamente empleado en la fabricación de películas. Este material representa una variante del polietileno caracterizada por su estructura molecular lineal y una densidad relativamente baja en comparación con el HDPE. Esta configuración molecular única confiere al LLDPE diversas propiedades que complementan el proceso de fabricación.

En particular, este componente aporta características físicas como flexibilidad y maleabilidad, así como propiedades mecánicas, incluyendo resistencia a la tracción y aptitud para el sellado durante el procesamiento. Además, contribuye a proporcionar un acabado brillante en la película final. La presencia de LLDPE en la mezcla agrega cualidades específicas que contribuyen a la versatilidad y calidad del producto final.



Figura 13: Polietileno lineal de baja densidad.

2.6.3 Pigmento

El empleo de pigmento en plásticos, como el polietileno (PE), cumple la función de añadir color, mejorar la estética y diferenciar los productos. Esta práctica resulta especialmente útil para la identificación de productos destinados a diversas áreas, como alimentos, bienes de consumo, envases industriales, artículos de jardinería, entre otros. Además de agregar color, el pigmento aporta opacidad a la película, una característica crucial en este sector del mercado.

El MasterBatch es una solución concentrada de pigmento incorporada dentro de una resina plástica en formato de gránulos. La dosificación típica varía entre el 3% del peso total del plástico de fabricación, ya sea polietileno (PE), polipropileno (PP), PVC, plásticos reciclados, entre otros. El MasterBatch demuestra una capacidad excepcional para teñir con homogeneidad y proporcionar opacidad a cualquier pieza plástica, adaptándose eficientemente a las particularidades del proceso de transformación y a las características específicas del producto que el cliente desea fabricar. [8]



Figura 14: MasterBatch pigmento

2.6.4 Material Reciclado

La empresa Fabriplast implementa un enfoque sostenible al reutilizar todo el *scrap* que se genera en su línea productiva, incluyendo recortes, mangas con fallas, retazos, entre otros. Este *scrap* se incorpora de manera significativa en la fábrica y requiere un estudio meticuloso, dado que, como material reciclado, no es puro, sino que contiene polietileno de alta densidad, polietileno lineal, y cierto porcentaje de pigmento.

El material reciclado contribuye aproximadamente en un 15% del total de la materia prima utilizada en la producción de películas plásticas. Este material se clasifica según su tipo, ya sea de alta o baja densidad, y además por color, abarcando opciones como rojo, amarillo, azul, blanco o negro. Este enfoque de reciclaje no solo promueve la sostenibilidad, sino que también destaca la importancia de gestionar cuidadosamente los materiales reciclados para mantener la calidad y consistencia en los productos finales.

Capítulo 3: Antecedentes y caracterización experimental

En este capítulo, se exponen los antecedentes que se tienen para el proyecto, donde se considera la extrusora específica, las regulaciones y parámetros con los cuales se trabaja y como se manipulan. Además, se entregan los datos técnicos de los materiales que se utilizan en esta.

Por otro lado, se plantean los ensayos y sus normas que van a ser utilizados para el estudio y lo que se busca lograr con la realización de estos.

3.1 Antecedentes

Como se abordó previamente, el enfoque de este estudio recae en la extrusora Polystar de doble cabezal ubicada en la fábrica, la cual representa la tecnología que se pretende implementar en todas las líneas de producción. A diferencia de las extrusoras convencionales, esta máquina de doble cabezal permite la alimentación de plástico granulado a través de una tolva única. Tras su procesamiento por un husillo giratorio, el material se divide en dos cámaras separadas, cada una con su filtro y plato rompedor, y es expulsado por dos cabezales en paralelo.



Figura 15: Extrusora de doble cabezal Polystar

Este diseño ofrece una producción eficiente, permitiendo la fabricación simultánea de dos medidas distintas. La extrusora opera de manera casi autónoma, con el operador encargado de recargar la tolva, enhebrar la manga y fijar los parámetros de fabricación, delegando la producción automática a la máquina.



Figura 16: Extrusora Polystar en la fabrica

Como se comentó, el plástico granulado y los parámetros de extrusión utilizados en la máquina varían en según el producto deseado. No obstante, todas estas variables dependen del operador y del producto a fabricar, generando aproximadamente 300 combinaciones posibles para cada tipo de manga. La empresa enfrenta el desafío de unificar y estandarizar el producto, requiriendo un exhaustivo estudio de las diversas combinaciones y la colaboración con ambos operarios para obtener muestras representativas sometidas a pruebas.

3.2 Implementación

En el desarrollo de este estudio, se recopilarán muestras de mangas procedentes de diversos pedidos que atraviesen la línea de fabricación. Cada muestra será analizada en términos de la proporción de materiales utilizados, sus espesores y sus parámetros de producción. Posteriormente, se llevarán a cabo pruebas específicas para evaluar las propiedades mecánicas de las películas sopladas, aspecto crucial según la prioridad expresada por la empresa.

Además, se realizará una evaluación visual para verificar el color de las bolsas, siendo esta una consideración importante para el equipo de calidad. Cada muestra será representada por al menos 10 probetas destinadas a ensayos de tracción y al menos 5 probetas destinadas a ensayos de punción. Este enfoque experimental permitirá obtener una comprensión detallada de las características de las mangas y respaldará la búsqueda de la combinación ideal de parámetros para lograr la estandarización del producto.

3.3 Propiedades mecánicas

La evaluación del comportamiento de un material bajo esfuerzos mecánicos desempeña un papel crucial en el análisis de su diseño, la caracterización de los materiales y el control de calidad. Con el propósito de llevar a cabo estas evaluaciones, se empleará una máquina universal de ensayos para tracción-deformación. Este instrumento permitirá realizar pruebas precisas que proporcionarán datos valiosos sobre la resistencia y deformación de las películas sopladas, contribuyendo así a una comprensión detallada de sus propiedades mecánicas.

3.3.1 Ensayo de tracción-deformación

El ensayo de tracción en películas sopladas delgadas, como se representa en la Figura 17, se enfoca en medir la resistencia necesaria para fracturar la probeta y la elongación del material hasta el punto de fallo. Este proceso implica la aplicación de una fuerza que deforma la probeta al estirarla, simultáneamente reduciendo su espesor. La máquina de ensayos registra la fuerza aplicada y el cambio en la longitud de la probeta hasta su ruptura, recopilando datos cruciales para determinar las relaciones entre el esfuerzo y la deformación del material.

Este ensayo se realiza conforme a la norma ASTM D882, un método estándar para evaluar las propiedades de tracción en láminas de plástico delgadas. Esta norma, comúnmente utilizada para el control de calidad en línea, establece parámetros específicos, como una zona de prueba (L_0) de 100 ± 1 mm y un ancho de 10 ± 0.5 mm para la probeta. Además, basado en [9], la norma establece que la velocidad de estiramiento debe corresponder a 25 mm/min.

La norma nos sugiera trabajar con la magnitud de la energía de tensión de ruptura (TEB, por sus siglas en ingles Tensile Energy to Break) lo que se define como el área bajo la curva de tensión-deformación o la integral del esfuerzo en función del estiramiento. Esto se define bajo la ecuación:

$$TEB = \int_0^{\epsilon_T} S d\epsilon \quad (1)$$

Donde S es el estrés asociado a una deformación ϵ y ϵ_T es el estrés de ruptura.

Pese a que la norma sugiere utilizar este valor para la interpretación de resultados, la empresa prefiere utilizar los datos crudos obtenidos directos de los ensayos, como lo son: esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia y estiramiento. Esto debido a que necesitan que los datos sean lo mas comprensibles para los operadores, expuestos de una manera menos técnica pero interpretativa, sin dejar de lado los fundamentos ingenieriles.

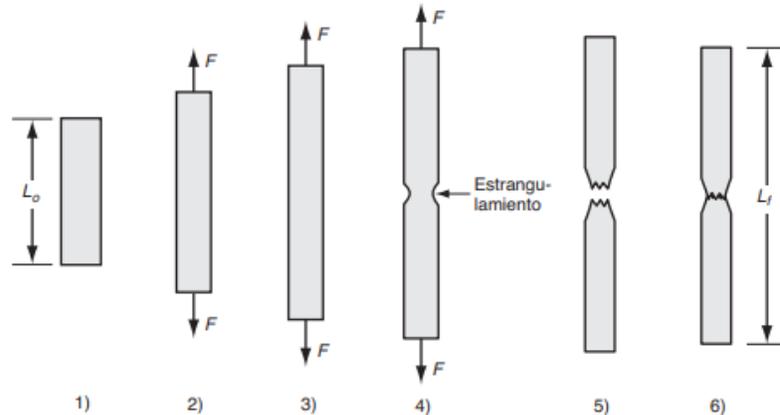


Figura 17: Esquema de probetas para ensayo de tracción.

3.3.2 Ensayo de punción

El ensayo de punción en películas sopladas delgadas se centra en analizar la capacidad del material para resistir cargas punzantes y evaluar la fuerza necesaria para perforar la probeta. Este proceso, representado esquemáticamente en la Figura 18, implica la aplicación controlada de una fuerza puntiaguda sobre la película, registrando tanto la fuerza aplicada como la profundidad de penetración de la punta puntiaguda en la probeta. La norma ASTM D5748 rige este ensayo, proporcionando directrices específicas para medir el estrés biaxial, especialmente en situaciones donde la película puede estar expuesta a cargas puntiagudas o cuadradas, como en el caso de las bolsas derivadas de la manga. La prueba evalúa la fuerza máxima, la fuerza de ruptura y la distancia de penetración, y requiere el diseño y fabricación de una punta en forma de pera [8]. Para este último, se comentó con la empresa si el diámetro normativo de 19 [mm] les parecía correcto para su aplicación, pero propusieron uno de 10 [mm], ya que se asemejaba a pruebas anteriores que se habían llevado a cabo.



Figura 18: Ensayo de punción

La norma D5748 no se presentaba precargada en el software de la máquina de ensayos, por lo que se optó en fijar una velocidad de ensayo en 20 mm/min. Además, de igual forma a la norma anterior, esta considera la utilización de cálculos más complejos para su procesamiento. Debido a esto, para este ensayo nos interesa obtener la fuerza máxima, la fuerza de rotura asociada a la fluencia y el estiramiento máximo.

3.4 Banco de ensayos de punción

El diseño y fabricación del banco de ensayos de punción representan un paso fundamental en el proceso experimental, ya que en la universidad no se contaba con una instalación específica para este tipo de ensayos. La adaptación de la plataforma al equipo de ensayos universal en el Laboratorio de la Universidad se llevó a cabo considerando las dimensiones de la base y el anclaje de la máquina. La estructura incluye una plataforma elevada que permite el estiramiento libre de la muestra, y se implementaron sujeciones para asegurar la fijación adecuada de la muestra durante el ensayo.

Basándose en el modelo más tradicional como el mostrado en la Figura 18, se tomaron ciertas consideraciones de diseño, pero utilizando medidas rectangulares. Además, se decidió fabricar el sistema en base a impresión 3D utilizando material PLA. Esta elección se fundamenta en su capacidad para ofrecer una fabricación económica y una mayor flexibilidad para descartar diseños de prueba.

Para llevar a cabo este proceso, utilizamos una impresora Ender 3, enfrentándonos a ciertas complicaciones de calibración que, finalmente, pudimos superar con éxito. Por otra parte, el punzón, ilustrado en la Figura 19, se confeccionó en acero mediante mecanizado, utilizando un acero bajo en carbono ASTM A36, ya que no experimenta cargas significativas en el caso de las películas plásticas.



Figura 19: Modelo banco de ensayos de punción.

Para el banco de ensayos, se comenzó fabricando la base, pieza que se observa en la Figura 20, la cual se diseñó pensando en que se asegurara a la máquina de ensayos para evitar movimientos no deseados.

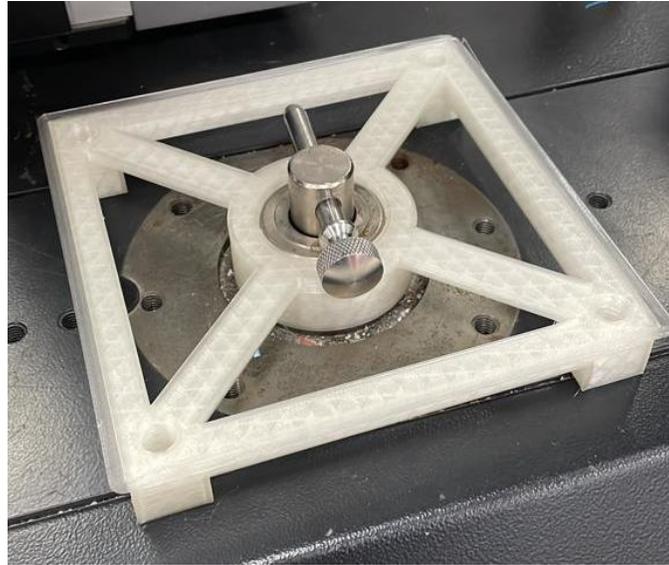


Figura 20: Base de banco de ensayo de punción.

Esta base y las demás piezas presentan orificios por los cuales irán los hilos metálicos que guiarán la correcta alineación de las piezas y proporcionarán soporte a la estructura. Mas arriba, presenta una placa de mayor dimensión, la cual es la base de la muestra y la cual tiene soportes para las sujeciones o *clamps* que aseguran la muestra. Para la correcta fijación de la placa que se observa en la Figura 21, se utilizarán unos clamps que sostendrán por presión la muestra.

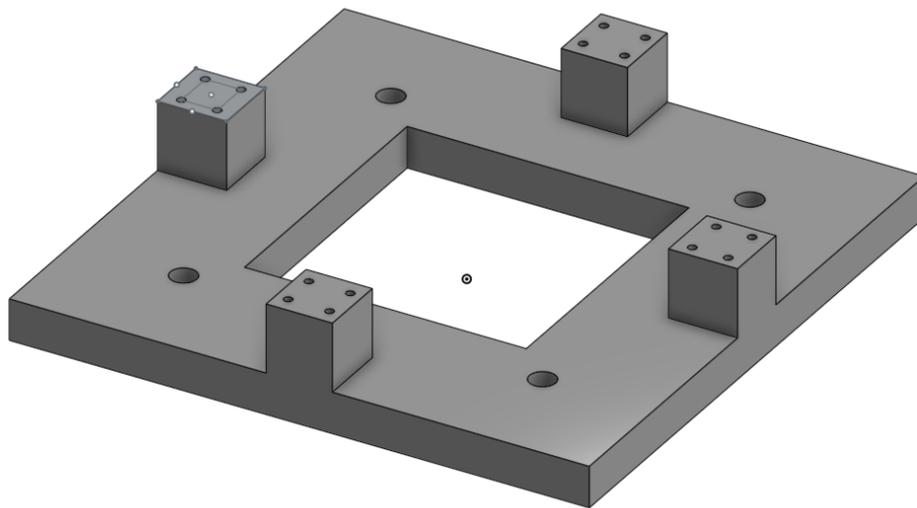


Figura 21: Base porta muestra.

La pieza representada en la Figura 21 presenta las 4 bases salientes diseñadas para la fijación de los clamps, los cuales tienen la función de asegurar la muestra. Para lograr una fijación efectiva, se diseñaron placas, como se muestra en la Figura 23, que se colocan sobre la muestra para garantizar su sujeción. Las abrazaderas o *clamps*, ilustradas en la Figura 22, se caracterizan por permitir una acción rápida de liberación y fijación, al tiempo que evitan empujes laterales indeseados.



Figura 22: Clamps.

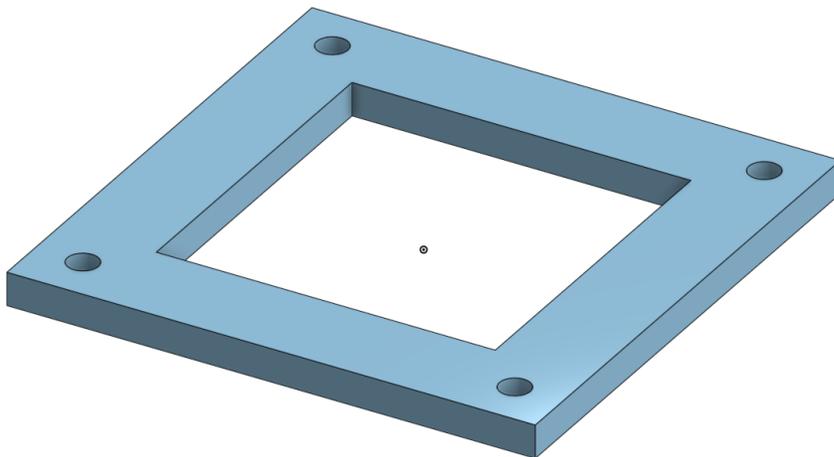


Figura 23: Placa para fijar muestra.

Con todas las piezas conectadas y niveladas, se integran en la máquina, tal como se aprecia en la Figura 24. De esta manera, se presenta la construcción y disposición de la base de ensayos.

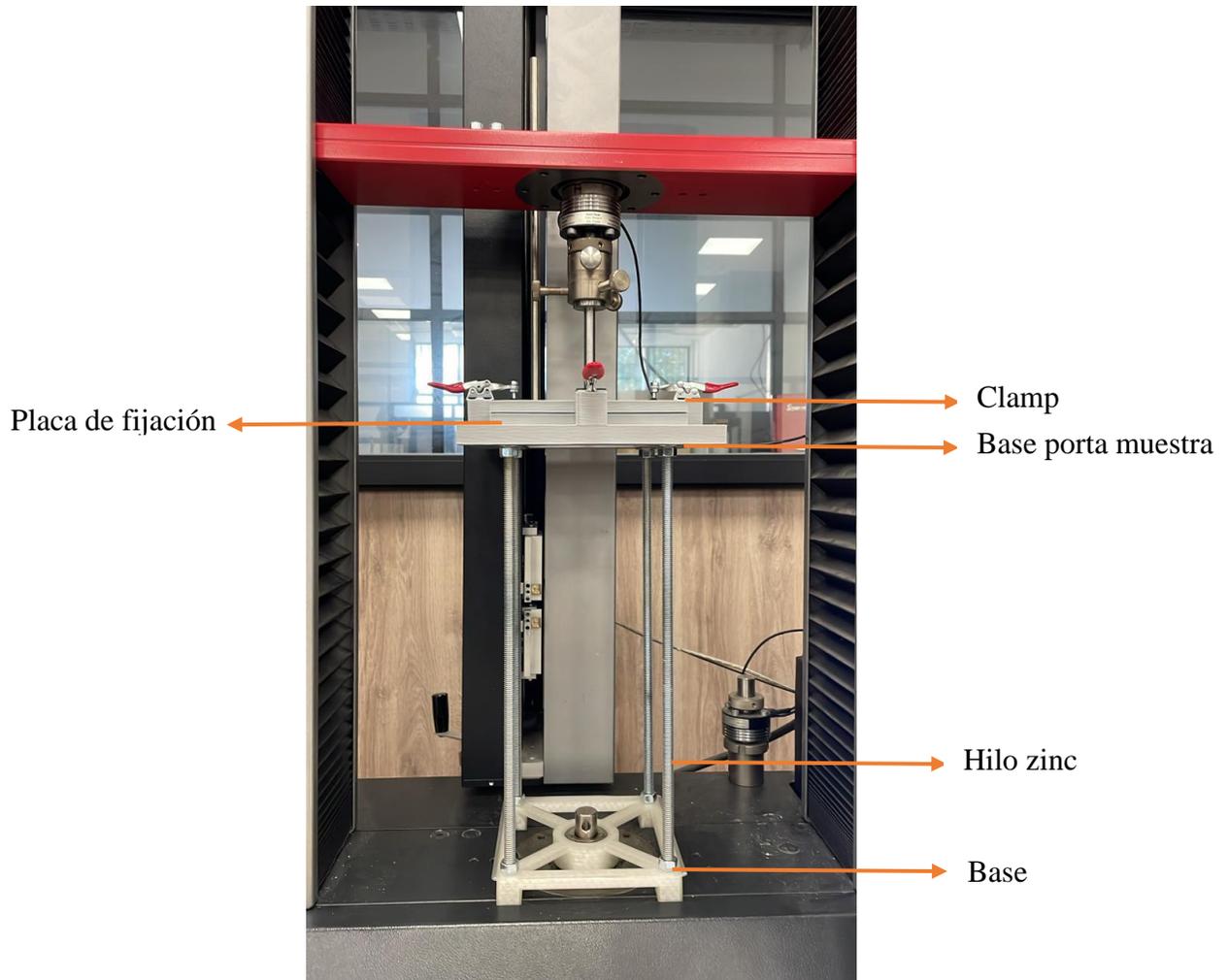


Figura 24: Plataforma de ensayos en maquina universal.

Los planos de los elementos fabricados en impresión 3D como la base, la base porta muestra, las placas de fijación y punzón se encuentran en los Anexos B, C, D y E, respectivamente.

3.5 Preparación de probetas

Las probetas se prepararon una a una, rigiéndose por las normas establecidas, las cuales consideran una zona de prueba (L_0) de 100 ± 1 mm y un ancho de 10 ± 0.5 mm para las probetas de ensayo de tracción. Para el ensayo de punción las probetas deben considerar una zona de prueba de 10×10 cm, dándole un margen de 5 cm por lado de agarre para el banco de ensayos para las probetas de ensayo de punción.

Para realizar estas se utilizó una base de corte, un cuchillo de precisión y elementos de medición. Cada una de estas probetas eran clasificadas según su tipo y espesor (el cual era un dato importante que se consideraba al momento de las mediciones).

Capítulo 4: Experimentos y discusión.

En este capítulo, se abordará el análisis de las mangas fabricadas por los operadores y aquellas producidas específicamente para llevar a cabo este estudio. Los resultados de los ensayos de tracción y punción, detallados en un archivo Excel, serán procesados para obtener correlaciones mediante el uso del software MiniTab. Este software nos permitió realizar análisis de datos, generar gráficos y explorar relaciones entre variables, proporcionando herramientas valiosas para la interpretación y comprensión de los resultados obtenidos en los experimentos.

4.1 Pruebas experimentales ensayo de tracción.

Inicialmente, se recopilaron muestras de forma aleatoria, esto quiere decir que las primeras muestras tomadas no comparten patrones en común más allá de las condiciones de operación de la máquina. Esto permitió adquirir conocimientos sobre el funcionamiento operativo de las máquinas, así como sobre la gestión de la producción y la toma de muestras, observando que esto consideraría corte en la manga y/o interrupción de la producción.

Sin embargo, se reconoció que tomar muestras aleatorias no era el método más eficiente para analizar la influencia de los materiales en el comportamiento mecánico de los productos, debido a que no teníamos variables en común ni de control, por sobre todo debido a que estas presentaban material reciclado el cual posee una composición variable incierta.

Así, más adelante se decidió tomar muestras que se enfocaran en estudiar como la cantidad de LLDPE y pigmentos presentes en la mezcla afectaban al producto final, la selección de elegir a estas variables como enfoque de estudio no es aleatorio. Por un lado, el pigmento (o MasterBatch) es el componente más caro en cuanto a las materias primas y además el LLDPE (material lineal) es el que se usa en menor cantidad, por lo que le parecía interesante a la empresa comprender y estimar su regulación.

A pesar de esta nueva dirección, se llevó a cabo ensayos de tracción en las muestras aleatorias, proporcionando una referencia sobre su comportamiento en resistencia y capacidad de estiramiento. Aunque se obtuvieron resultados numéricos concretos, no son concluyentes debido a las numerosas variaciones y la falta de variables de control.

4.1.1 Muestras aleatorias.

Como se mencionó con anterioridad, la toma de estas muestras tuvo como objetivo comprender el proceso de fabricación en la práctica y entender como generar muestras para nuestros ensayos. Además, nos proporcionó las primeras observaciones sobre el comportamiento en la máquina de ensayos universal, nos familiarizó con su utilización y nos ayudó a comprender el procesamiento de los datos. Los resultados de estas muestras se utilizaron para generar una referencia numérica y generar índices de correlación provisorios entre la proporción de los materiales y sus propiedades mecánicas. Esto nos brinda una primera visión sobre el análisis e interpretación de los datos que serán recopilados durante el estudio.

Las muestras aleatorias y su composición se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Composición de muestras aleatorias.

Muestra	Espesor				
	[mm]	LLDPE	HDPE	Reciclado	Pigmento
Muestra 1: Bolsa Negra Lisa	14	8%	30%	60%	3%
Muestra 2: Bolsa Blanca Rugosa	12	7%	60%	30%	3%
Muestra 3: Bolsa Negra Reciclado	20	10%	48%	38%	5%
Muestra 4: Bolsa Verde	12	9%	50%	36%	5%
Muestra 5: Bolsa Transparente 1	9	8%	92%	0%	0%
Muestra 6: Bolsa Transparente 2	8	8%	92%	0%	0%
Muestra 7: Bolsa Negra Reciclado	24	11%	43%	43%	3%

En la Tabla 1, se puede observar a simple vista que no existen patrones repetitivos en los tipos de muestra, sino más bien combinaciones aleatorias. Cada uno de los tipos de bolsas fabricadas tiene una 'fórmula', pero como se mencionó anteriormente, esta no es única y varía según el operador de turno. A pesar de esto, los materiales como el LLDPE, HDPE y pigmento siguen una proporción más o menos definida. Sin embargo, se pierde el control con el material reciclado, ya que, a criterio del operador, varía el uso de este y de las demás materias primas.

Tabla 2: Propiedades mecánicas promedio de muestras aleatorias.

Muestra	Ensayo de tracción		
	Esfuerzo fluencia [MPa]	Esfuerzo máximo [MPa]	Estiramiento porcentual
Muestra 1: Bolsa Negra Lisa	11,5	28,9	135%
Muestra 2: Bolsa Blanca Rugosa	10,1	31,2	45%
Muestra 3: Bolsa Negra Reciclado	8,3	31,2	166%
Muestra 4: Bolsa Verde	5,6	24,9	79%
Muestra 5: Bolsa Transparente 1	7,9	32	52%
Muestra 6: Bolsa Transparente 2	14,4	38,8	23%
Muestra 7: Bolsa Negra Reciclado	5	21,3	244%

Seguidamente, se presenta la Tabla 2, que contiene los promedios de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados en las 7 muestras aleatorias. Estos ensayos se llevaron a cabo con el propósito de obtener percepciones preliminares sobre cómo los materiales pueden influir en las propiedades de las bolsas, sin considerar aún factores o variables en común.

Los resultados de estos ensayos se han procesado para obtener correlaciones anticipadas sobre cómo los materiales pueden afectar las propiedades mecánicas. Sin embargo, es importante señalar nuevamente que estos resultados no son totalmente concluyentes. Por un lado, las muestras no poseen variables de control fijas, ya que presentan variadas proporciones de material y espesores variables. Además, contienen material reciclado, que, como se explicó anteriormente, abarca una variedad de componentes como LLDPE, HDPE, pigmento, entre otros.

Las correlaciones obtenidas para estas muestras se presentan en la Figura 25, donde, bajo la correlación de Pearson, se muestra una matriz de correlación, relacionando los datos con un índice de confianza del 95%.

Gráfica de matriz de correlación en muestras aleatorias

IC de 95% para la correlación de Pearson

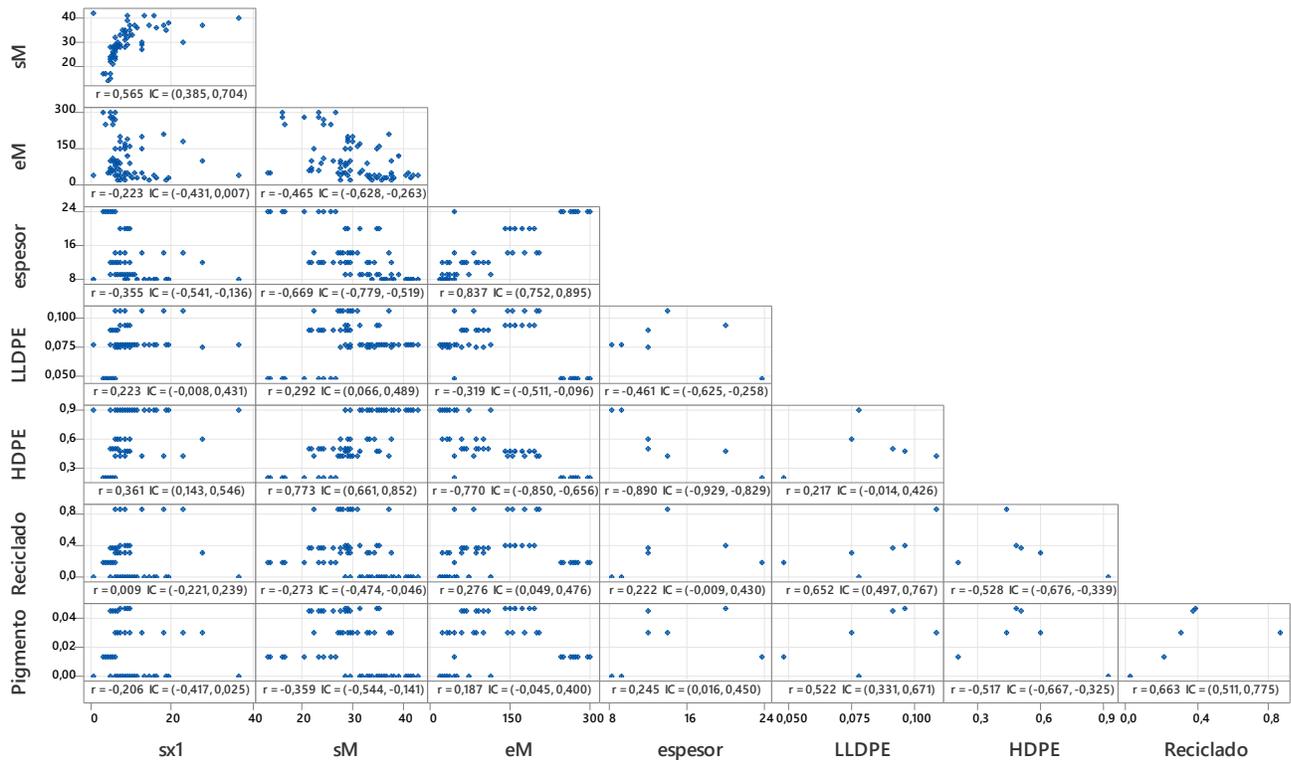


Figura 25: Gráfica de matriz de correlación en muestras aleatorias

Lo más relevante de este procesamiento es la relación entre los materiales y las propiedades mecánicas. La matriz de correlación nos proporciona información sobre cómo se agrupan los datos en relación con un comportamiento o patrón específico.

Dado que las muestras aleatorias involucran múltiples factores, se ha generado un correlograma para simplificar su visualización. Este gráfico permite observar de manera clara cómo se correlacionan las variables entre sí y determinar si la relación es directa o inversa.

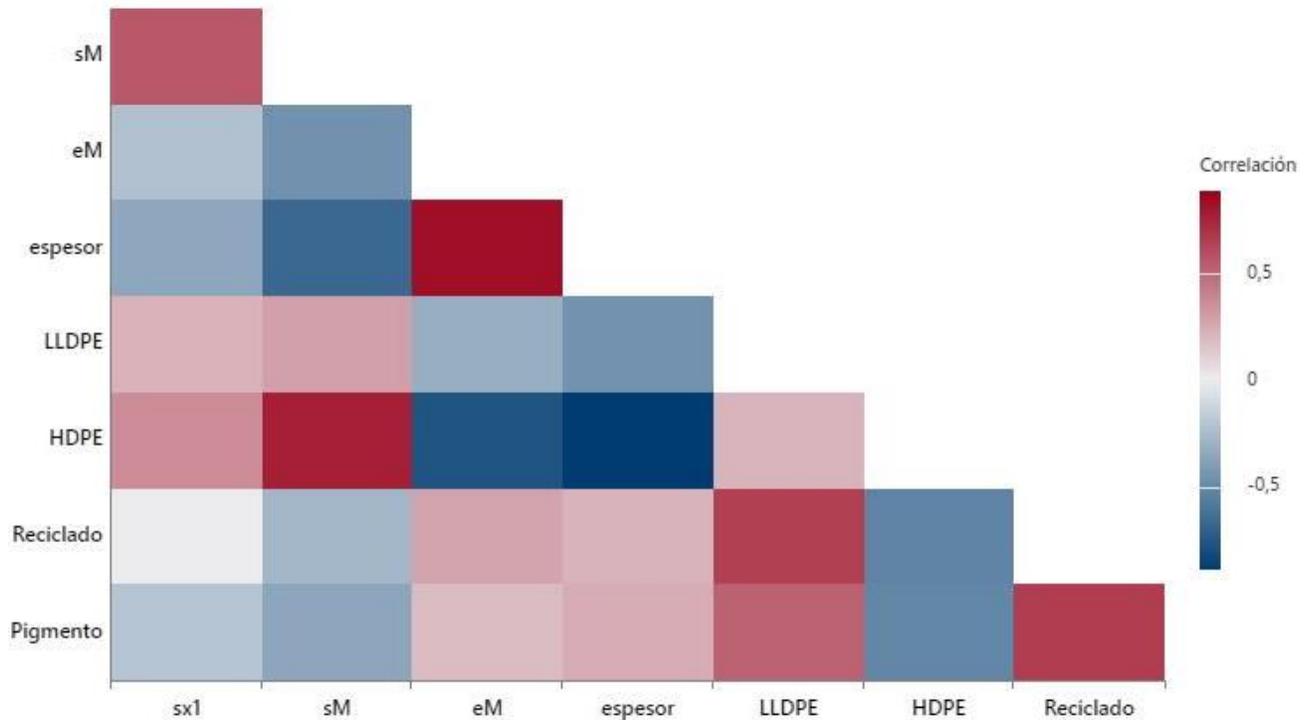


Figura 26: Correlograma muestras aleatorias en tracción.

Este gráfico proporciona una representación más visual de las correlaciones, donde un tono más rojizo indica una correlación directa más fuerte, mientras que un tono más azulado indica una correlación inversa más fuerte. No obstante, para obtener datos numéricos precisos, se presentan en la Tabla 3 las correlaciones detalladas.

Tabla 3: Tabla de correlaciones muestras aleatorias en tracción.

Variable	σ_{x1}	σ_M	ε_M	Espesor	LLDPE	HDPE	Reciclado
σ_M	0,565						
ε_M	-0,223	-0,465					
Espesor	-0,355	-0,669	0,837				
LLDPE	0,223	0,292	-0,319	-0,461			
HDPE	0,361	0,773	-0,770	-0,890	0,217		
Reciclado	0,009	-0,273	0,276	0,222	0,652	-0,528	
Pigmento	-0,206	-0,359	0,187	0,245	0,522	-0,517	0,663

Las correlaciones más significativas se observan entre la resistencia máxima (σ_M), el espesor y el material HDPE. En cuanto a la resistencia máxima, existe una fuerte correlación negativa entre σ_M y el espesor (-0,669), indicando que a medida que el espesor disminuye, la resistencia máxima tiende a aumentar. Además, se destaca una correlación positiva sustancial entre σ_M y HDPE (0,773), lo que sugiere que a mayores proporciones de HDPE en la muestra, la resistencia máxima también tiende a aumentar. Asimismo, σ_{x1} muestra correlaciones notables con HDPE (-0,770) y el espesor (-0,669), indicando una fuerte relación inversa con estas variables. Por último, ε_M presenta una correlación significativa con el espesor (0,837) y HDPE (-0,770), sugiriendo que el espesor y la proporción de HDPE influyen en la elongación máxima de la muestra.

A pesar de que las correlaciones actuales no muestran una influencia directa y significativa del pigmento y LLDPE en las propiedades mecánicas evaluadas, el estudio seguirá enfocándose en comprender cómo estos componentes afectan al producto final. Dado que el pigmento y el LLDPE están presentes en proporciones relativamente pequeñas, es crucial entender a qué factores se atribuyen y si, bajo diferentes condiciones o proporciones, podrían tener un impacto más relevante en las propiedades mecánicas de las bolsas.

Tabla 4: Correlaciones en pareja de Pearson para muestras aleatorias.

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
σ_M	σ_{x1}	0,565	(0,385; 0,704)	0,000
ε_M	σ_{x1}	-0,223	(-0,431; 0,007)	0,058
Espesor	σ_{x1}	-0,355	(-0,541; -0,136)	0,002
LLDPE	σ_{x1}	0,223	(-0,008; 0,431)	0,058
HDPE	σ_{x1}	0,361	(0,143; 0,546)	0,002
Reciclado	σ_{x1}	0,009	(-0,221; 0,239)	0,938
Pigmento	σ_{x1}	-0,206	(-0,417; 0,025)	0,080
ε_M	σ_M	-0,465	(-0,628; -0,263)	0,000
Espesor	σ_M	-0,669	(-0,779; -0,519)	0,000
LLDPE	σ_M	0,292	(0,066; 0,489)	0,012
HDPE	σ_M	0,773	(0,661; 0,852)	0,000
Reciclado	σ_M	-0,273	(-0,474; -0,046)	0,019
Pigmento	σ_M	-0,359	(-0,544; -0,141)	0,002
Espesor	ε_M	0,837	(0,752; 0,895)	0,000
LLDPE	ε_M	-0,319	(-0,511; -0,096)	0,006
HDPE	ε_M	-0,770	(-0,850; -0,656)	0,000
Reciclado	ε_M	0,276	(0,049; 0,476)	0,018
Pigmento	ε_M	0,187	(-0,045; 0,400)	0,114
LLDPE	Espesor	-0,461	(-0,625; -0,258)	0,000
HDPE	Espesor	-0,890	(-0,929; -0,829)	0,000
Reciclado	Espesor	0,222	(-0,009; 0,430)	0,059
Pigmento	Espesor	0,245	(0,016; 0,450)	0,037
HDPE	LLDPE	0,217	(-0,014; 0,426)	0,065
Reciclado	LLDPE	0,652	(0,497; 0,767)	0,000
Pigmento	LLDPE	0,522	(0,331; 0,671)	0,000
Reciclado	HDPE	-0,528	(-0,676; -0,339)	0,000
Pigmento	HDPE	-0,517	(-0,667; -0,325)	0,000
Pigmento	Reciclado	0,663	(0,511; 0,775)	0,000

En las próximas pruebas, se ajustarán las proporciones de LLDPE y pigmento, manteniendo constantes otros factores. Es decir, se estudiarán las correlaciones marcadas en color rojo en la tabla 4 relacionadas con LLDPE y pigmento serán el foco principal buscando insights valiosos sobre su impacto en el rendimiento de las bolsas. Esta elección estratégica se basa en su importancia económica y en las características únicas de cada material. El pigmento, como componente costoso, se estudiará para optimizar costos sin sacrificar la calidad del producto final. Por su parte, el LLDPE, al ser

utilizado en menor cantidad, se analizará para comprender su influencia específica en las propiedades mecánicas.

4.1.2 Muestra focalizada en el pigmento

En uno de los casos específicos, se decidió estudiar como la variación en la cantidad de pigmento en la muestra, influye en su comportamiento mecánico. Para esto, junto al operador, se realizan 3 variaciones de mezclas. En este caso, se decide realizar la prueba con bolsa blanca virgen, es decir, sin material reciclado.

En primer lugar, se conversó con el operador como el realiza una bolsa de este tipo en el día a día. Obteniendo que su mezcla, cada 25 kilos (o 1 saco) de HDPE, contiene 3.8 kilos de LLDPE y 1.5 kilos de pigmento (blanco). Se determinó, que esta mezcla contiene un 5.2% de pigmento, por lo que se le pidió realizar 2 mezclas más, que con la misma cantidad de HDPE y LLDPE contuvieran 1 y 0.5 kilos de pigmento, es decir, 3.3% y 1.7% de pigmento, respectivamente. Esto se presenta de mejor manera en la siguiente tabla.

Tabla 5: Composición muestras con variación de pigmento.

Muestra	LLDPE	HDPE	Reciclado	Pigmento
Muestra 8: Pigmento 1	12,5%	82,5%	0,0%	5,0%
Muestra 9: Pigmento 2	12,7%	83,9%	0,0%	3,3%
Muestra 10: Pigmento 3	13,0%	85,3%	0,0%	1,7%

Para la muestra realizada disminuyendo en 0.5 kilos lo utilizado por el operario comúnmente, ya se observan algunos cambios, físicamente una bolsa menos suave y más translúcida. Para la muestra realizada disminuyendo en 1 kilo lo utilizado por el operario comúnmente, ya se observan más cambios, físicamente una bolsa rugosa, chiclosa y casi translúcida, muy cercana a la transparente.

Realizados los ensayos, se procesan los datos en MiniTab generando la matriz de correlación observada en la Figura 27, grafico que muestra el comportamiento de las distintas probetas en función de las variables.

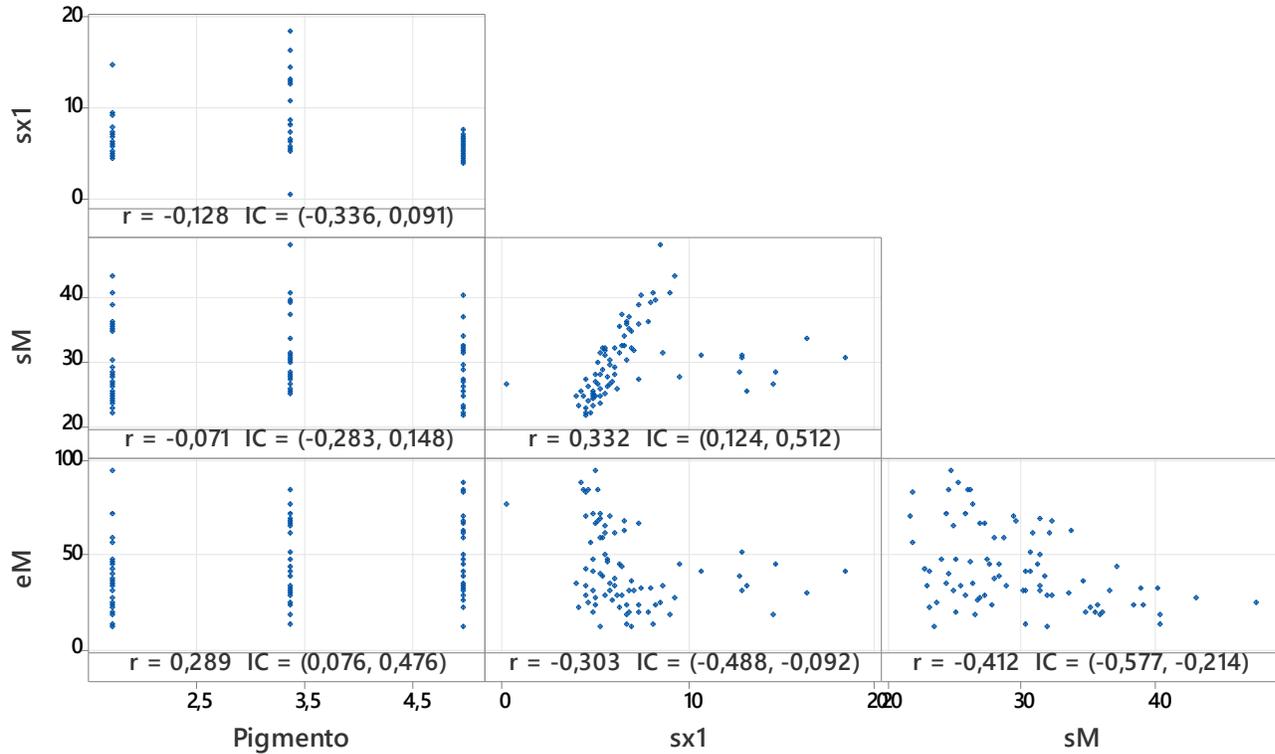


Figura 27: Gráfica de matriz de correlación: probetas con variación de pigmento en tracción

Las correlaciones establecidas del procesamiento de datos y observado en la gráfica 27 se expone numéricamente en la Tabla 6.

Tabla 6: Tabla de correlaciones muestras con variación de pigmento en tracción.

Variable	Pigmento	σ_{x1}	σ_M
σ_{x1}	-0,128		
σ_M	-0,071	0,332	
ε_M	0,289	-0,303	-0,412

Datos que al mismo tiempo se presentan de manera representativa y comparativa en el correlograma presentado en la Figura 28.

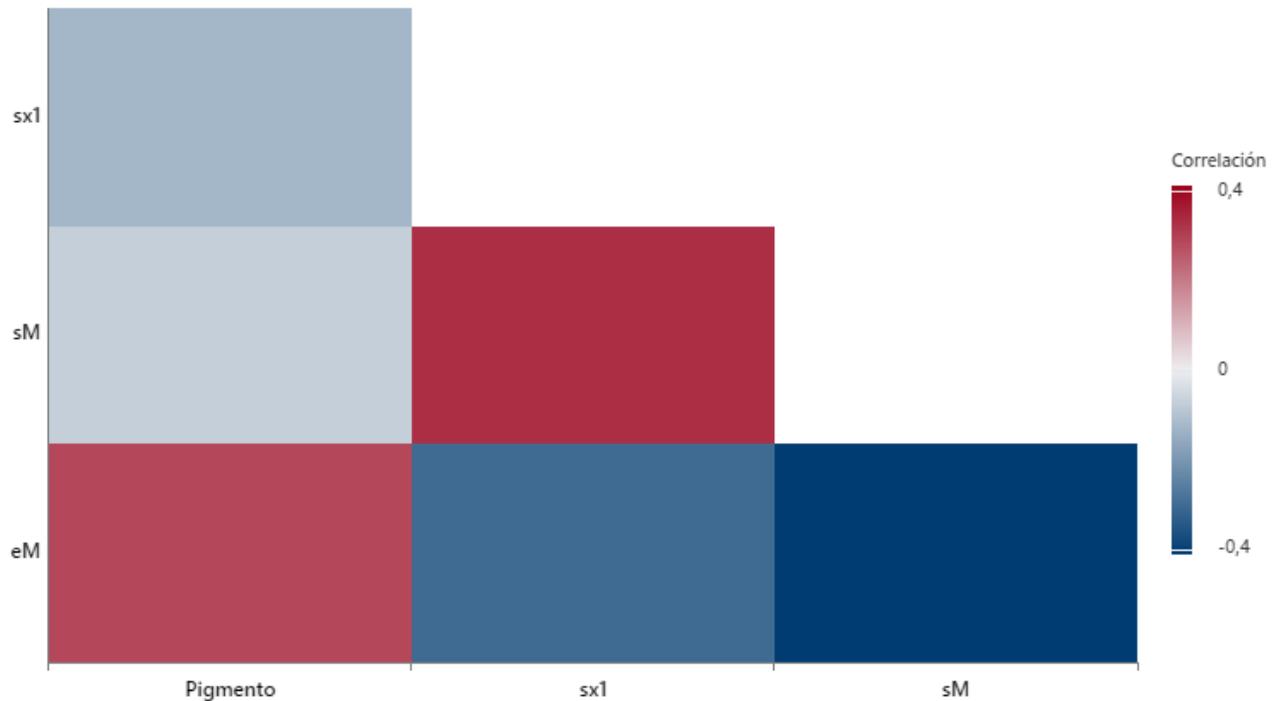


Figura 28: Correlograma de muestras con variación de pigmento en tracción

En las pruebas de tracción enfocadas en la variación del pigmento, se destacan correlaciones significativas entre las propiedades mecánicas y la composición de pigmento, como se expone en la Tabla 6. La resistencia máxima (σ_M) presenta una correlación negativa de -0,071, indicando que un aumento en el contenido de pigmento se relaciona con una disminución en la resistencia máxima. Similarmente, la resistencia al esfuerzo (σ_{x1}) exhibe una correlación negativa de -0,128 con el pigmento, sugiriendo que una mayor concentración de pigmento está asociada con una menor resistencia al esfuerzo. Por otro lado, el alargamiento antes de la rotura (ϵ_M) muestra una correlación positiva de 0,289 con la proporción de pigmento, indicando que un incremento en el contenido de pigmento está vinculado a un mayor estiramiento antes de la rotura, según se detalla en los valores numéricos de la Tabla 6. Estas correlaciones ofrecen una perspectiva precisa sobre cómo la variación en la concentración de pigmento impacta las propiedades mecánicas de las bolsas.

Es importante mencionar, que además de las pruebas mecánicas realizadas, las muestras que poseen 1 kg menos de pigmento, es decir, un 1.7% de pigmento en su composición, no son aprobadas bajo la inspección visual, debido a que es una bolsa muy traslucida.

En el párrafo anterior, ya se describió como las variaciones de material influyen en las propiedades. Así, en la Figura 29, una recta que representa el comportamiento del material versus la propiedad mecánica. Describiendo una correlación negativa en cuanto a la resistencia tanto en fluencia como máxima y una correlación positiva en cuanto a la deformación.

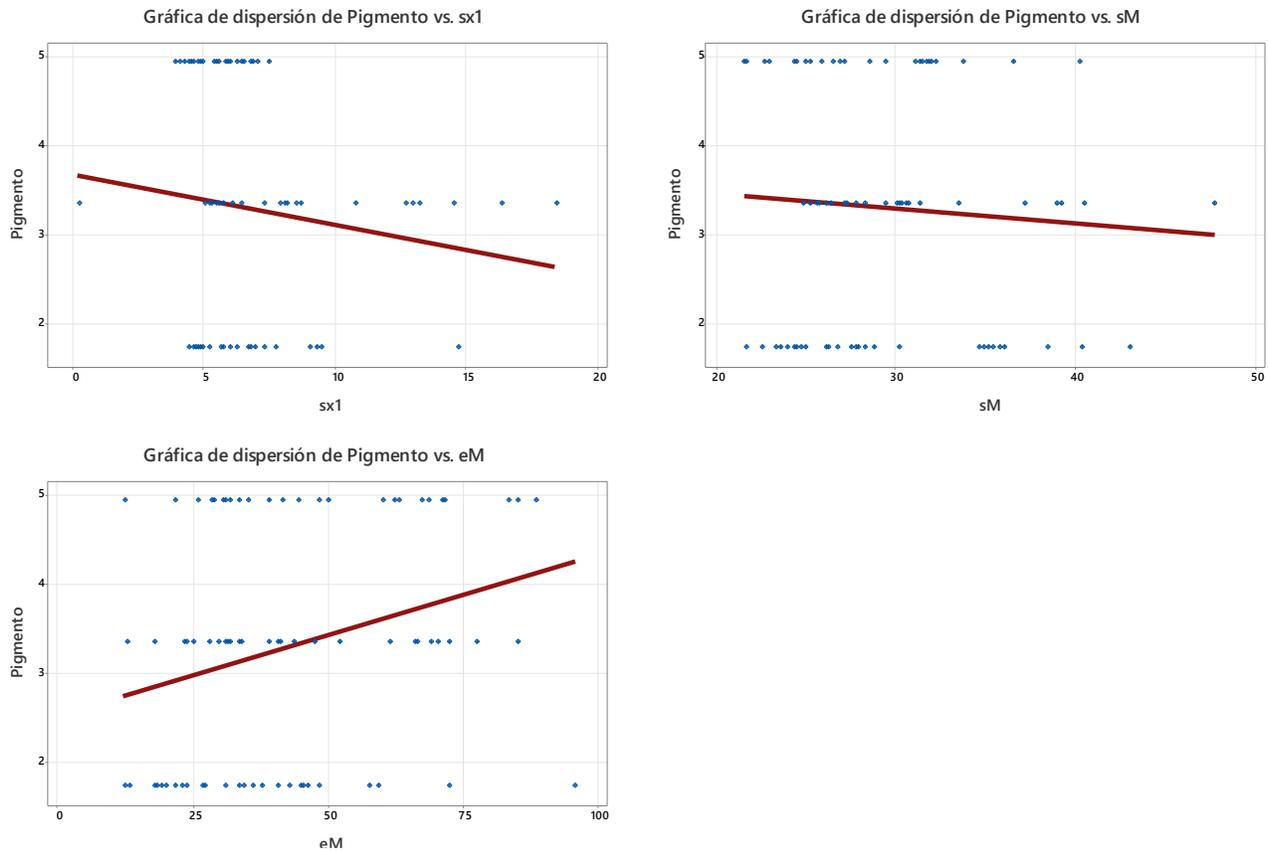


Figura 29: Gráficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de pigmento en tracción.

4.1.3 Muestra focalizada en el LLDPE (Polietileno Lineal).

Este caso específico explora la influencia de la variación en la cantidad de LLDPE en la muestra sobre su comportamiento mecánico. Se realizaron cinco variaciones de mezclas para bolsas transparentes sin pigmento, considerando diferentes proporciones de material base (HDPE) y LLDPE. Con la colaboración del operador, se establecieron las composiciones de estudio expuestas en la que la mezcla estándar para este tipo de bolsa es de un 92% de HDPE y un 8% de LLDPE. Se realizaron variaciones proporcionales del 2%, con dos mezclas adicionales con un 2% más y dos con un 2% menos de LLDPE respecto al estándar.

Tabla 7: Composición de muestras con variación de LLDPE.

Muestra	LLDPE [kg]	HDPE [kg]
Muestra 11: Lineal 0	1,20	8,80
Muestra 12: Lineal 1	1,00	9,00
Muestra 13: Lineal 2	0,80	9,20
Muestra 14: Lineal 3	0,60	9,4
Muestra 15: Lineal 4	0,40	9,6

Realizados los ensayos, se procesan los datos en MiniTab generando la matriz de correlación observada en la Figura 30, grafico que muestra el comportamiento de las distintas probetas en función de las variables.

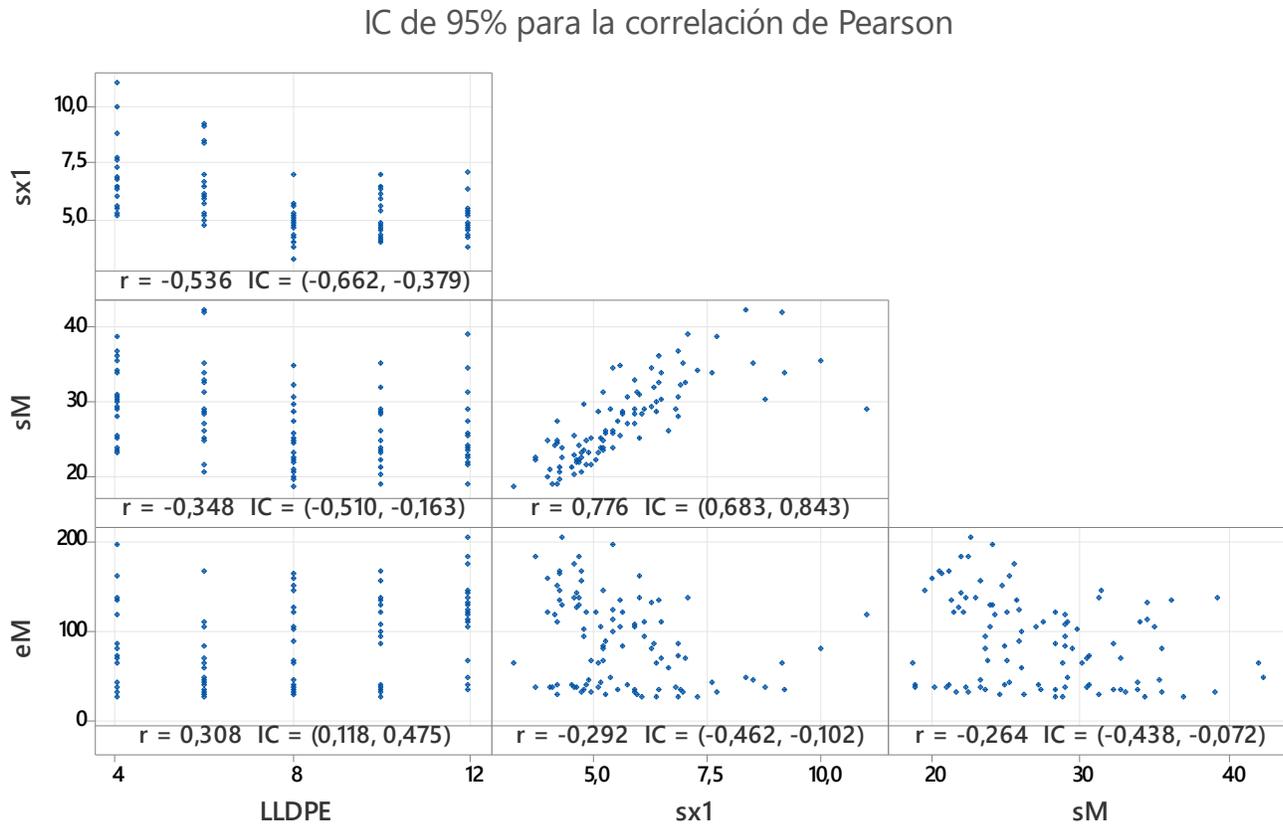


Figura 30: Grafica de matriz de correlación: probetas con variación de LLDPE en tracción.

Las correlaciones establecidas del procesamiento de datos y observado en la gráfica se expone numéricamente en la Tabla 8.

Tabla 8: Tabla de correlaciones muestras con variación de LLDPE en tracción.

Variable	LLDPE	σ_{sx1}	σ_M
σ_{sx1}	-0,536		
σ_M	-0,348	0,776	
ϵ_M	0,308	-0,292	-0,264

Datos que al mismo tiempo se presentan de manera representativa y comparativa en el correlograma presentado en la Figura 31.

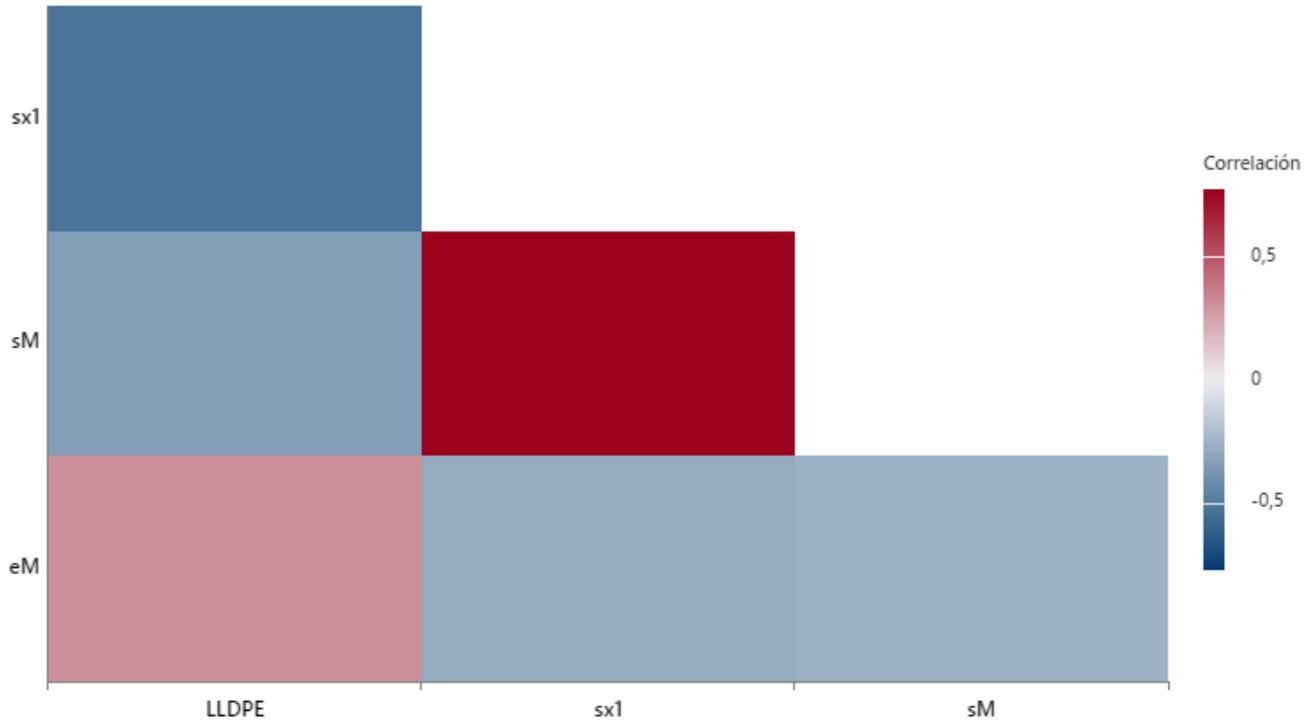


Figura 31: Correlograma de muestras con variación de LLDPE en tracción.

En las pruebas de tracción centradas en la variación de la cantidad de LLDPE en la muestra, se revelan correlaciones sustanciales entre las propiedades mecánicas y la composición de LLDPE, tal como se presenta en la Tabla 8. La resistencia máxima (σ_M) exhibe una correlación positiva de 0,776 con el LLDPE, indicando que un aumento en la cantidad de LLDPE se relaciona con un incremento en la resistencia máxima. Similarmente, la resistencia al esfuerzo (σ_{x1}) presenta una fuerte correlación negativa de -0,536 con el LLDPE, sugiriendo que un mayor contenido de LLDPE está asociado con una disminución en la resistencia al esfuerzo. En cuanto al alargamiento antes de la rotura (ϵ_M), se observa una correlación negativa de -0,292 con el LLDPE, indicando que un aumento en la cantidad de LLDPE está vinculado a un menor estiramiento antes de la rotura, según se detalla en los valores numéricos de la Tabla 8. Estas correlaciones ofrecen valiosos insights sobre cómo la variación en la concentración de LLDPE impacta las propiedades mecánicas de las bolsas.

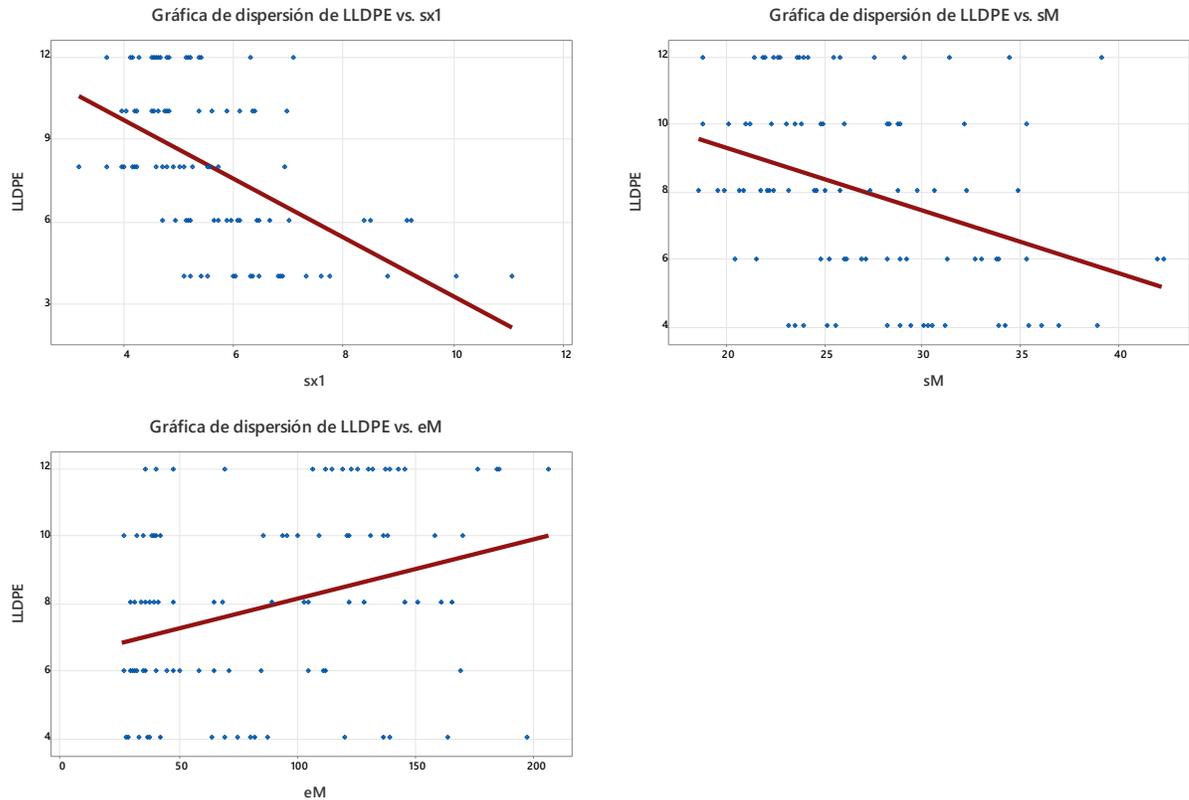


Figura 32: Gráficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de LLDPE en tracción.

En el párrafo anterior, ya se describió como las variaciones de material influyen en las propiedades. Así, en la Figura 32, una recta que representa el comportamiento del material versus la propiedad mecánica. Describiendo una correlación negativa en cuanto a la resistencia tanto en fluencia como máxima y una correlación positiva en cuanto a la deformación.

4.2 Pruebas experimentales ensayo de punción.

Observando cómo los operarios y el personal de la fábrica evaluaban la resistencia de las bolsas frente a elementos punzantes mediante pruebas manuales, surgió la idea de realizar ensayos de punción en los productos. Para llevar a cabo estos ensayos, se emprendió una investigación en busca de normativas sugerentes. Se procedió a fabricar probetas de 15x15 cm, las cuales fueron sometidas a pruebas de punción utilizando la misma máquina universal adaptada mediante el sistema previamente presentado.

La realización de ensayos de punción proporcionará información valiosa sobre las propiedades mecánicas de las bolsas. Al medir la fuerza máxima, fuerza de rotura, elongación máxima y elongación de rotura, se obtendrán datos cruciales sobre la resistencia y deformación de las bolsas frente a situaciones de punción. La fuerza máxima indicará la carga máxima que la bolsa puede soportar antes de romperse, mientras que la fuerza de rotura representará la carga necesaria para completar la rotura. La elongación máxima y la elongación de rotura ofrecerán insights sobre la capacidad de estiramiento de las bolsas antes de ceder frente a la punción. Estos parámetros son esenciales para evaluar y mejorar la resistencia de las bolsas en condiciones de uso real.

4.2.1 Muestra focalizada en el pigmento.

En este caso, se probaron las mismas 3 probetas con variación de pigmento expuestas en la Tabla 5. Pero los datos procesados fueron distintos. La matriz de correlación observada en la Figura 33, muestra el comportamiento de las distintas probetas en función de las variables.

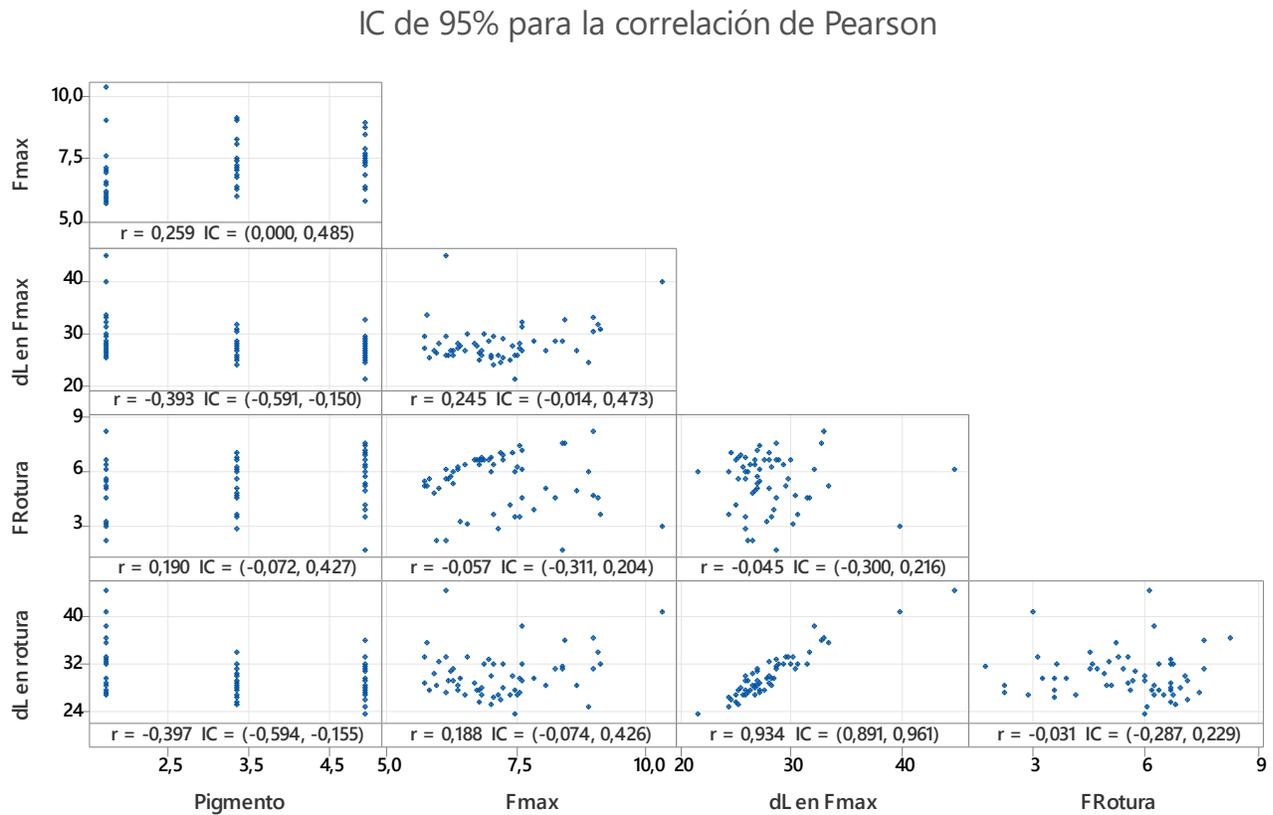


Figura 33: Grafica de matriz de correlación: probetas con variación de pigmento en punción.

Realizados los ensayos, se procesan los datos en MiniTab generando la matriz de correlación observada en la Figura 33, grafico que muestra el comportamiento de las distintas probetas en función de las variables.

Tabla 9: Tabla de correlaciones muestras con variación de LLDPE en punción.

Variable	LLDPE	F_{max}	dL_{max}	F_{rotura}
F_{max}	0,259			
dL_{max}	-0,393	0,245		
F_{rotura}	0,190	-0,057	-0,045	
dL_{rotura}	-0,397	0,188	0,934	-0,031

Datos que al mismo tiempo se presentan de manera representativa y comparativa en el correlograma presentado en la Figura 34.

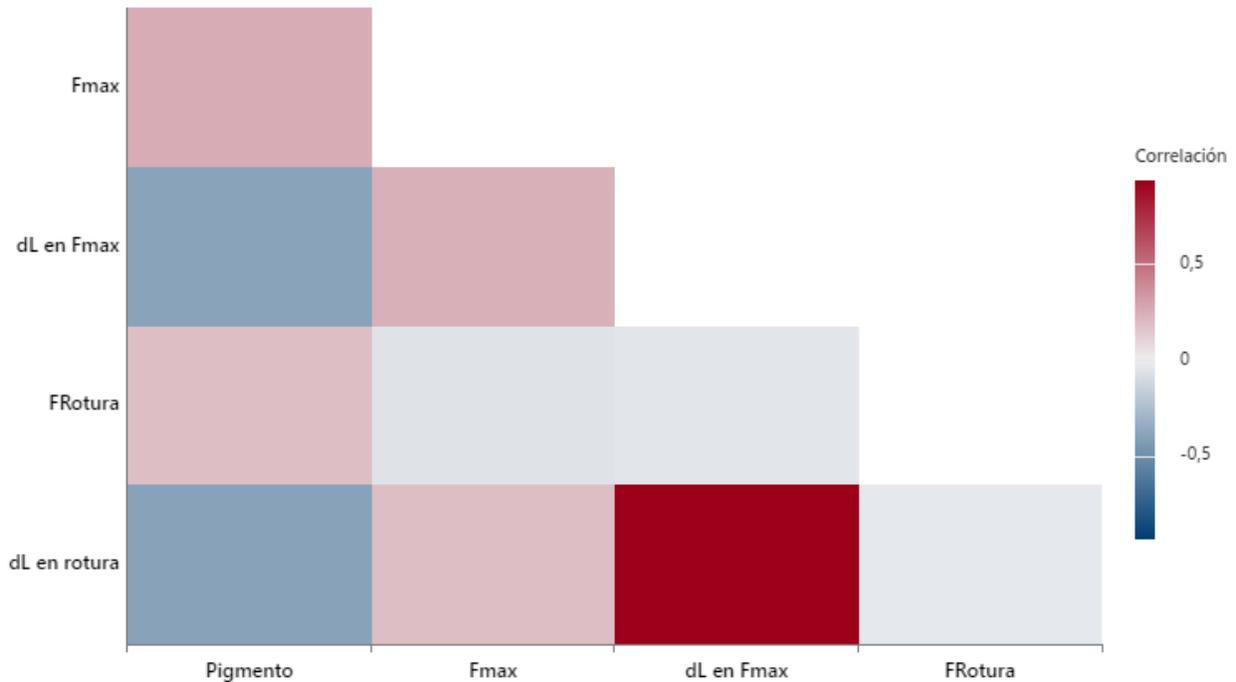


Figura 34: Correlograma de muestras con variación de pigmento en punción.

En los análisis de punción, se revelan correlaciones significativas entre las propiedades mecánicas y la composición de LLDPE, tal como se ilustra en la Tabla 9. Destacablemente, la máxima fuerza de punción (F_{max}) exhibe una correlación positiva de 0,259 con el LLDPE, sugiriendo que un aumento en la cantidad de este material se relaciona con un incremento en la fuerza máxima de punción. Por otro lado, la deformación máxima en F_{max} (dL_{max}) muestra una correlación negativa de -0,393 con el LLDPE, lo que indica que un mayor contenido de LLDPE está asociado con una menor deformación en la máxima fuerza de punción. En cuanto a la fuerza en el momento de rotura (F_{rotura}), se observa una correlación positiva de 0,190 con el LLDPE, lo que sugiere que un incremento en la cantidad de LLDPE está vinculado a un aumento en la fuerza de rotura. Finalmente, la deformación en el momento de rotura (dL_{rotura}) muestra una correlación negativa de -0,397 con el LLDPE, indicando que un aumento en la concentración de este material se asocia con una menor deformación en el momento de la rotura. Estas relaciones destacan la influencia significativa que la composición de LLDPE puede tener en las propiedades mecánicas evaluadas en los ensayos de punción.

En el párrafo anterior, ya se describió como las variaciones de material influyen en las propiedades. Así, en la Figura 35, se observa como a mayor % de pigmento, el producto posee mayor resistencia a la fuerza de punción, pero inversamente un menos estiramiento.

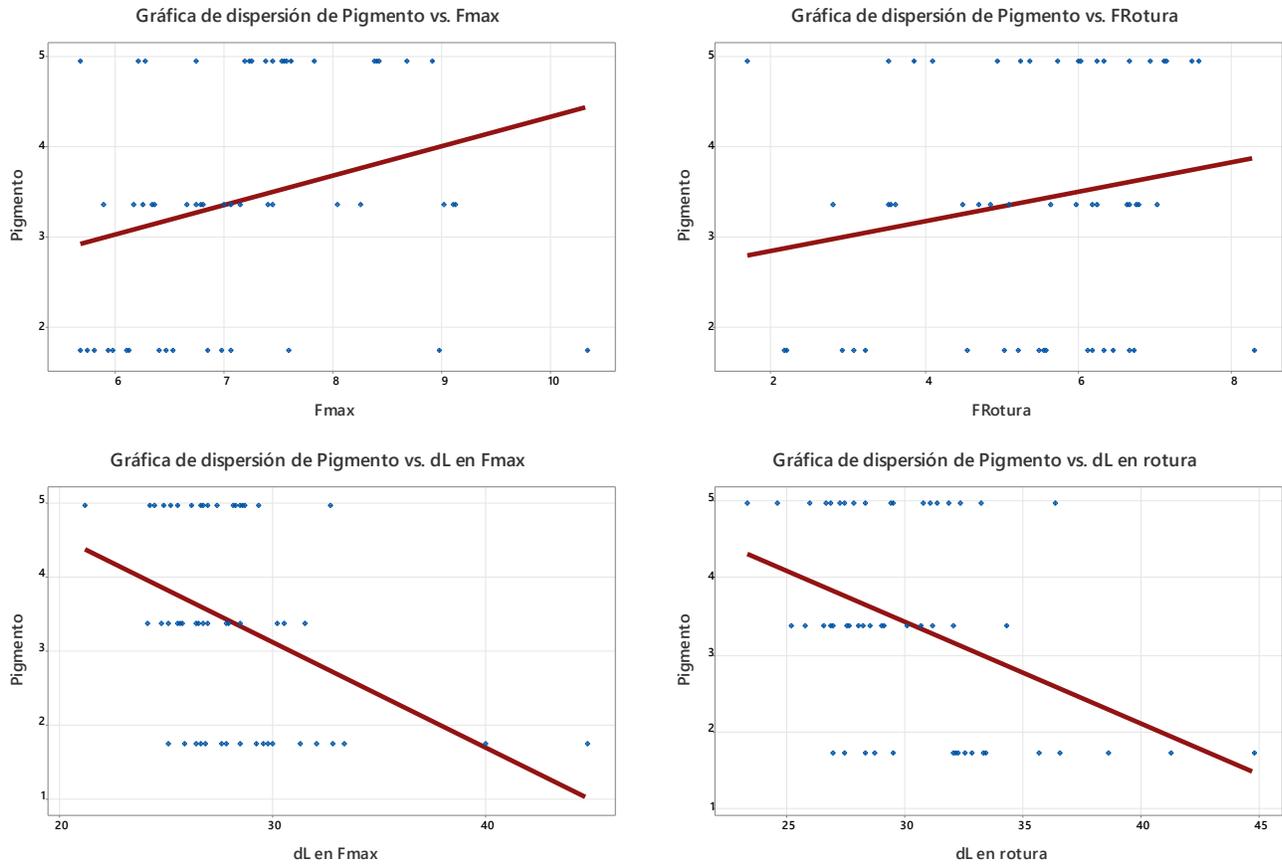


Figura 35: Gráficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de pigmento en punción.

4.2.2 Muestra focalizada en LLDPE.

En este caso, se probaron las mismas 5 probetas con variación de pigmento expuestas en la Tabla 7. Pero los datos procesados fueron distintos. La matriz de correlación observada en la Figura 33, muestra el comportamiento de las distintas probetas en función de las variables.

Realizados los ensayos, se procesan los datos en MiniTab generando la matriz de correlación observada en la Figura 36, grafico que muestra el comportamiento de las distintas probetas en función de las variables.

IC de 95% para la correlación de Pearson

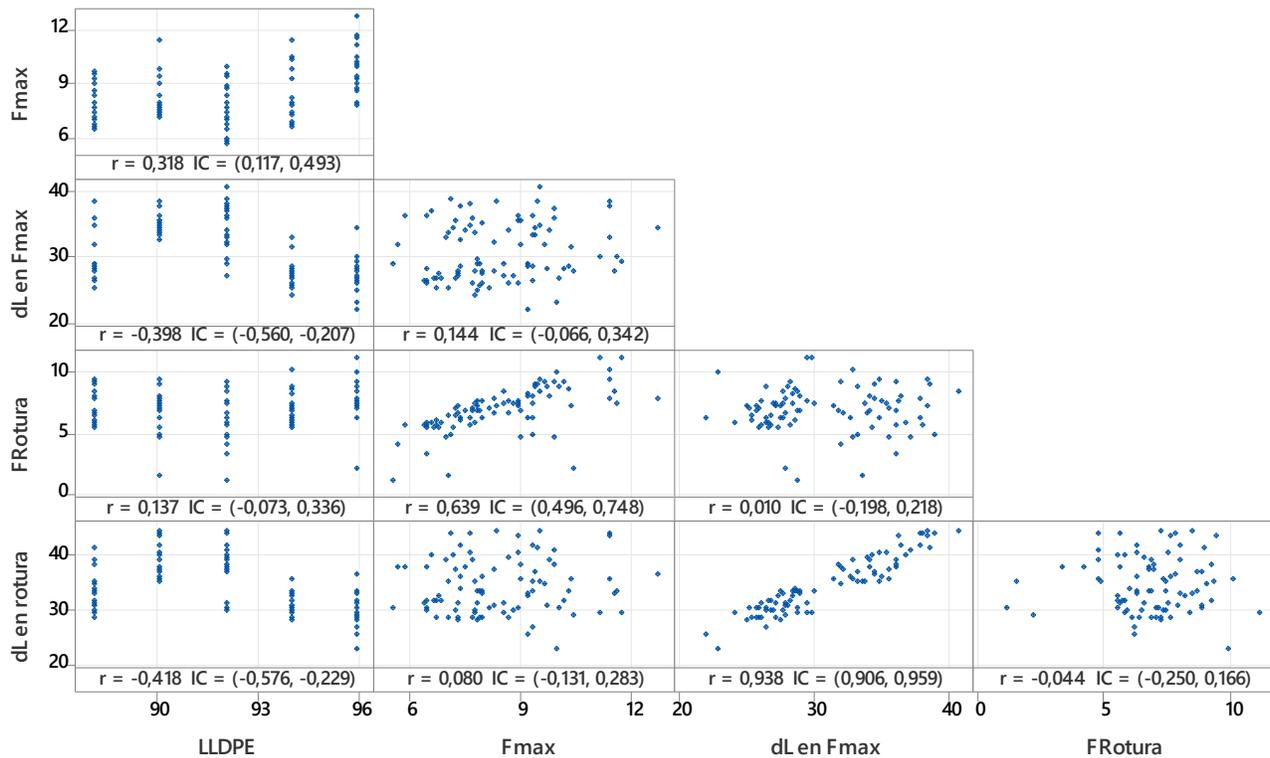


Figura 36: Grafica de matriz de correlación: probetas con variación de LLDPE en punción.

Así, las correlaciones obtenidas son las presentadas en la Tabla 1.

Tabla 10: Tabla de correlaciones muestras con variación de LLDPE en punción.

Variable	Pigmento	F_{max}	dL_{max}	F_{rotura}
F_{max}	0,318			
dL_{max}	-0,398	0,144		
F_{rotura}	0,137	0,639	0,010	
dL_{rotura}	-0,418	0,080	0,938	-0,044

Datos que al mismo tiempo se presentan de manera representativa y comparativa en el correlograma presentado en la Figura 37.

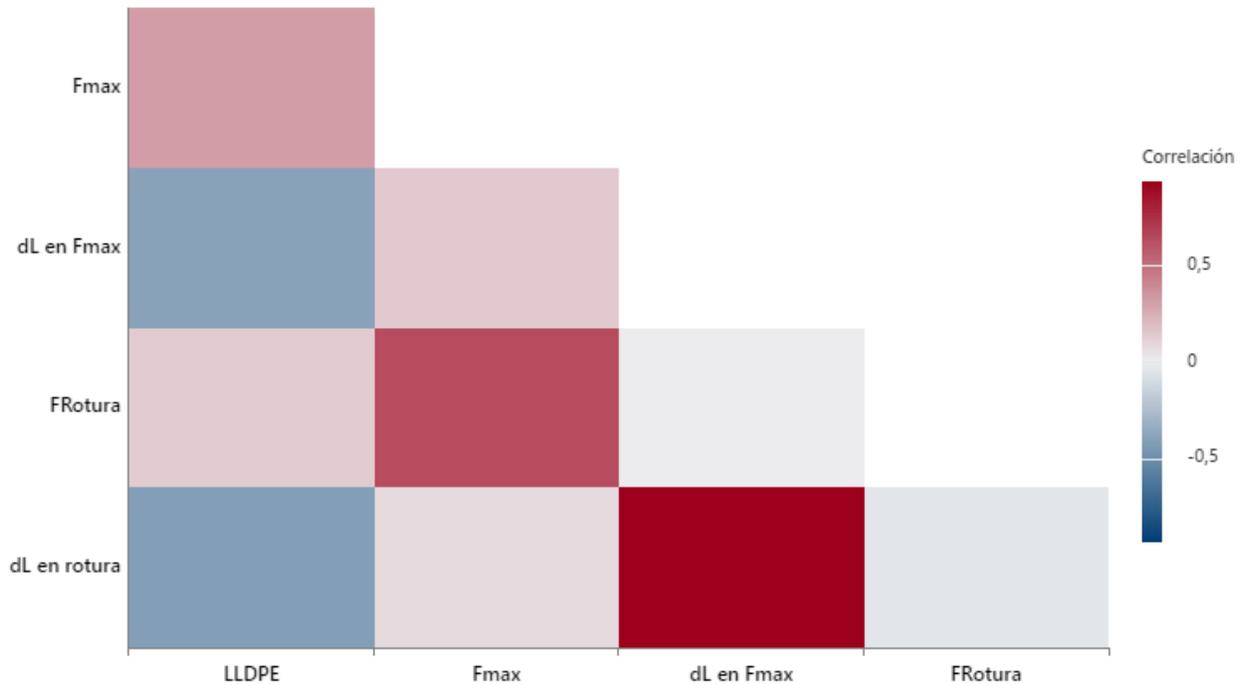


Figura 37: Correlograma de muestras con variación de LLDPE en punción.

En los ensayos de punción centrados en la variación del pigmento, se revelan correlaciones significativas entre las propiedades mecánicas y la presencia de este componente, como se muestra en la Tabla. Resalta especialmente que la máxima fuerza de punción (F_{max}) exhibe una correlación positiva de 0,318 con el pigmento, indicando que la presencia de pigmento en la muestra está asociada con un aumento en la fuerza máxima de punción. Por otro lado, la deformación máxima en F_{max} (dL_{max}) muestra una correlación negativa de -0,398 con el pigmento, sugiriendo que la presencia de pigmento está relacionada con una menor deformación en la máxima fuerza de punción. En cuanto a la fuerza en el momento de rotura (F_{rotura}), se observa una correlación positiva de 0,137 con el pigmento, lo que indica que su presencia se asocia con un incremento en la fuerza de rotura. Finalmente, la deformación en el momento de rotura (dL_{rotura}) muestra una correlación negativa de -0,418 con el pigmento, sugiriendo que la presencia de pigmento está relacionada con una menor deformación en el momento de la rotura. Estas correlaciones destacan la influencia que la presencia de pigmento puede tener en las propiedades mecánicas evaluadas en los ensayos de punción.

Igualmente, a lo sucedido en el caso del pigmento, en la Figura 38, se observa como a mayor % de LLDPE, el producto posee mayor resistencia a la fuerza de punción, pero inversamente un menos estiramiento.

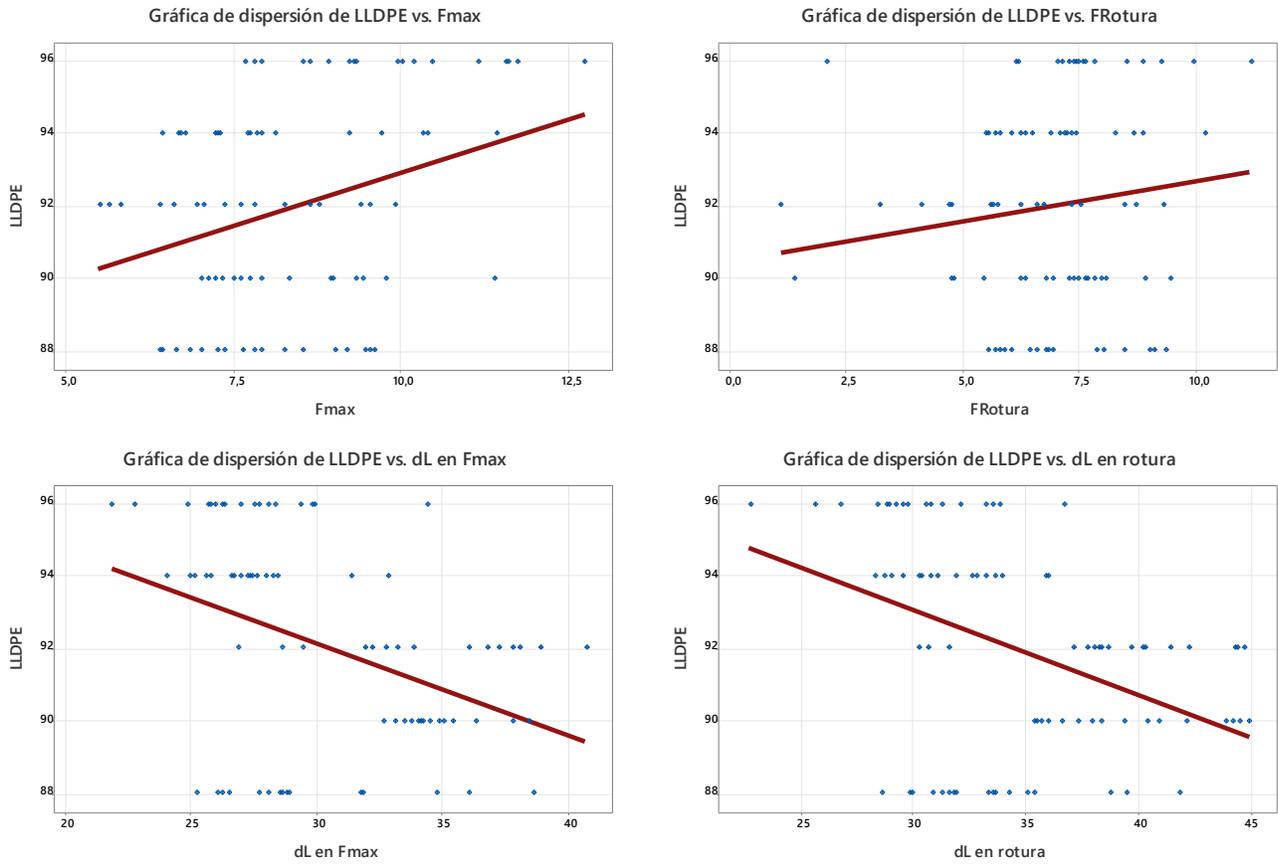


Figura 38: Gráficas de dispersión y tendencia para muestras con variación de LLDPE en punción.

Capítulo 5: Conclusión y discusión

Se expone el estudio del proceso de extrusión tal como ocurre en la empresa Fabriplast, identificando las etapas claves desde la introducción de la mezcla de materiales hasta la obtención del rollo final (previo a sellado y corte). Permitiendo analizar exhaustivamente la proporción de materias primas que se utilizan para la fabricación de distintos productos, estableciendo las proporciones típicas de cada material.

Se aplicaron pruebas mecánicas de tracción-deformación y de punción, logrando evaluar el efecto de la concentración de LLDPE y pigmento sobre las propiedades de resistencia y deformación de los productos. Obteniendo resultados experimentales sobre la variación entre un 4-12% de LLDPE y 1,7-5% para el pigmento.

Finalmente, los resultados experimentales permitieron proponer ajustes operativos enfocado en las proporciones de concentración de LLDPE y pigmento en las composiciones de los diferentes productos con tal de optimizar las propiedades mecánicas y mejorar la eficiencia operativa.

Se recomienda incrementar en un rango de 6 a 12% la concentración de LLDPE para aumentar la resistencia máxima sin comprometer excesivamente la elongación, además de reducir a un 1,7 hasta 3,3% el contenido de pigmento para mejorar la resistencia sin afectar drásticamente las propiedades ópticas. Esto permitiría obtener películas más resistentes y alargables, cumpliendo los requerimientos mecánicos y estéticos del producto final. Es importante monitorear continuamente el efecto de estas variaciones para determinar las proporciones óptimas mediante un enfoque sistemático y basado en datos.

Trabajos futuros

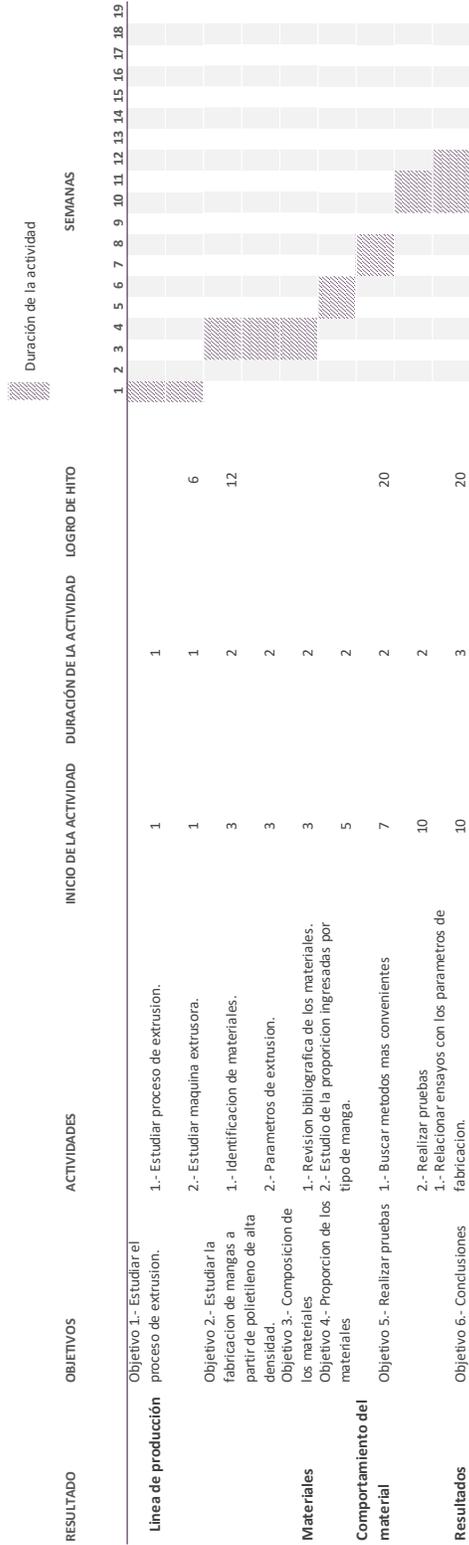
Queda pendiente extender el estudio a otras variables como temperatura, velocidad de extrusión y proporción de material reciclado. Además, de realizar una exposición respecto al tema a operadores y gerencia de la empresa, esto con tal de hacer posible la progresiva variación en las proporciones.

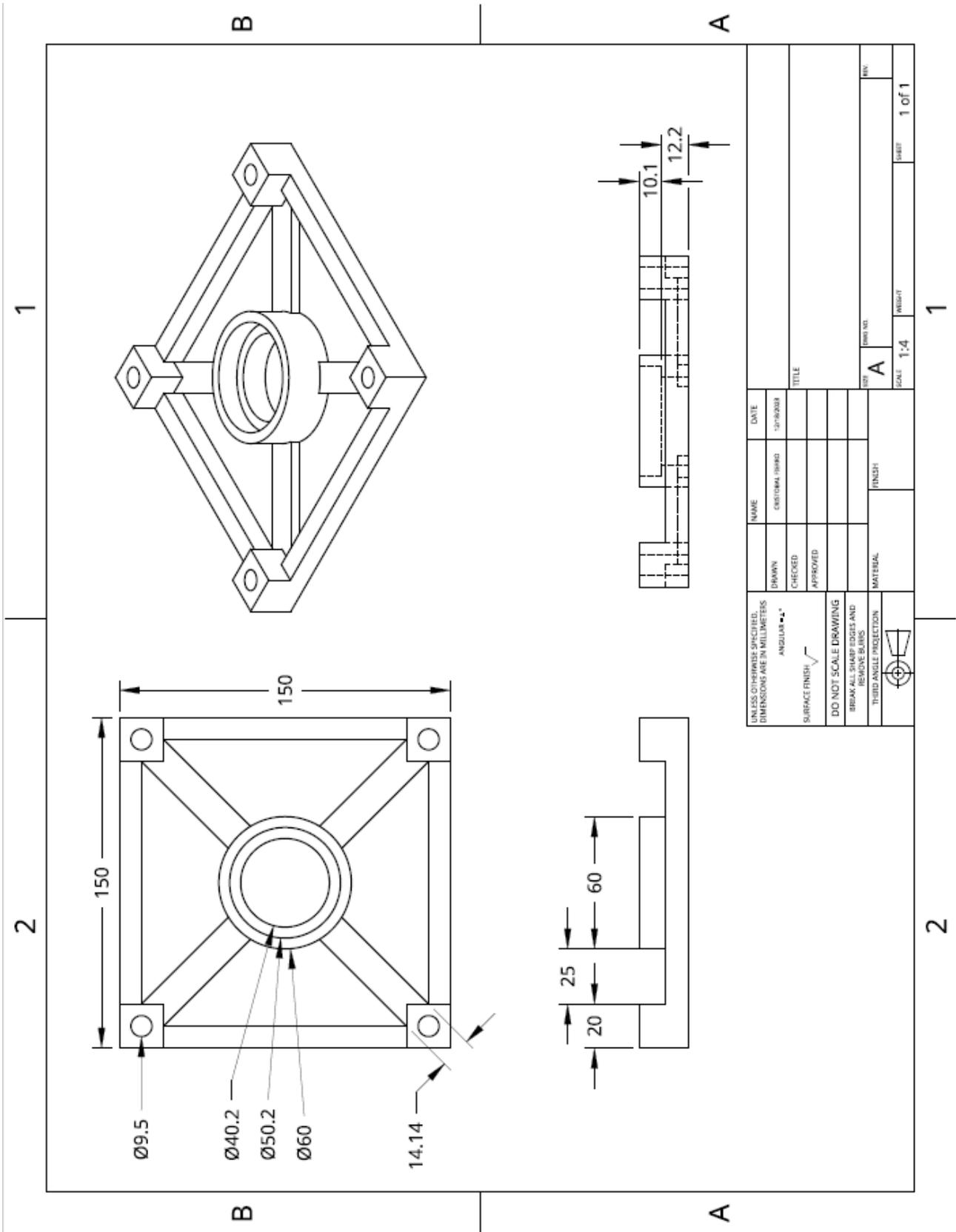
Referencias

- [1] L., N. (14 de abril de 2023). 7 grandes ventajas de la estandarización de procesos en tu empresa. LinkedIn.
- [2] CorpoNet. Estandarización de procesos y sus 5 beneficios principales.
- [3] AENOR Chile. ISO 9001.
- [4] Polystar Machinery Co. Ltd, *Installation and operation instrucciones - Model DM55-750*, Taiwan, China.
- [5] M. Beltran, A. Marcilla, “Tecnología de polímeros,”
- [6] Mariano. (s. f.). EXTRUSIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>
- [7] Qué es el polietileno de alta densidad HDPE ó PEAD. (s. f.). <https://www.ensavelia.com/blog/que-es-el-polietileno-de-alta-densidad-hdpe-o-pead-id18.htm#:~:text=El%20polietileno%20de%20alta%20densidad%20es%20un%20pol%C3%ADmero%20termopl%C3%A1stico%20formado,o%20polietileno%20de%20alta%20densidad>
- [8] Masterbatch para PP y múltiples aplicaciones del Masterbatch. (2020, 26 agosto). Colortec Química (ES). <https://colortec.es/masterbatch/>
- [9] ASTM International. (2018). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting (Designation: D882 - 18).
- [10] Instron. ASTM D882. Instron. <https://www.instron.com/es-es/testing-solutions/astm-standards/astm-d882>
- [11] ADMET. (Año). ASTM D5748 Stretch Wrap Puncture Resistance Testing. <https://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d5748-stretch-wrap-puncture-resistance-testing/>
- [12] Medida Fuerza y Torsión. (Año). Resistencia a la Punción - ASTM D5748. <https://www.medidafuerzaytorsion.com/index.php/es/equipos-de-medicion/product/136-resistencia-puncion-astm-d5748>
- [13] Procesos de extrusión. (2018, 26 noviembre). WordPress.com. <https://todoenpolimeros.com/procesos-de-extrusion/>
- [14] Mariano. (s. f.-b). PROPIEDADES MECANICAS. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/propiedades-mecanicas.html>

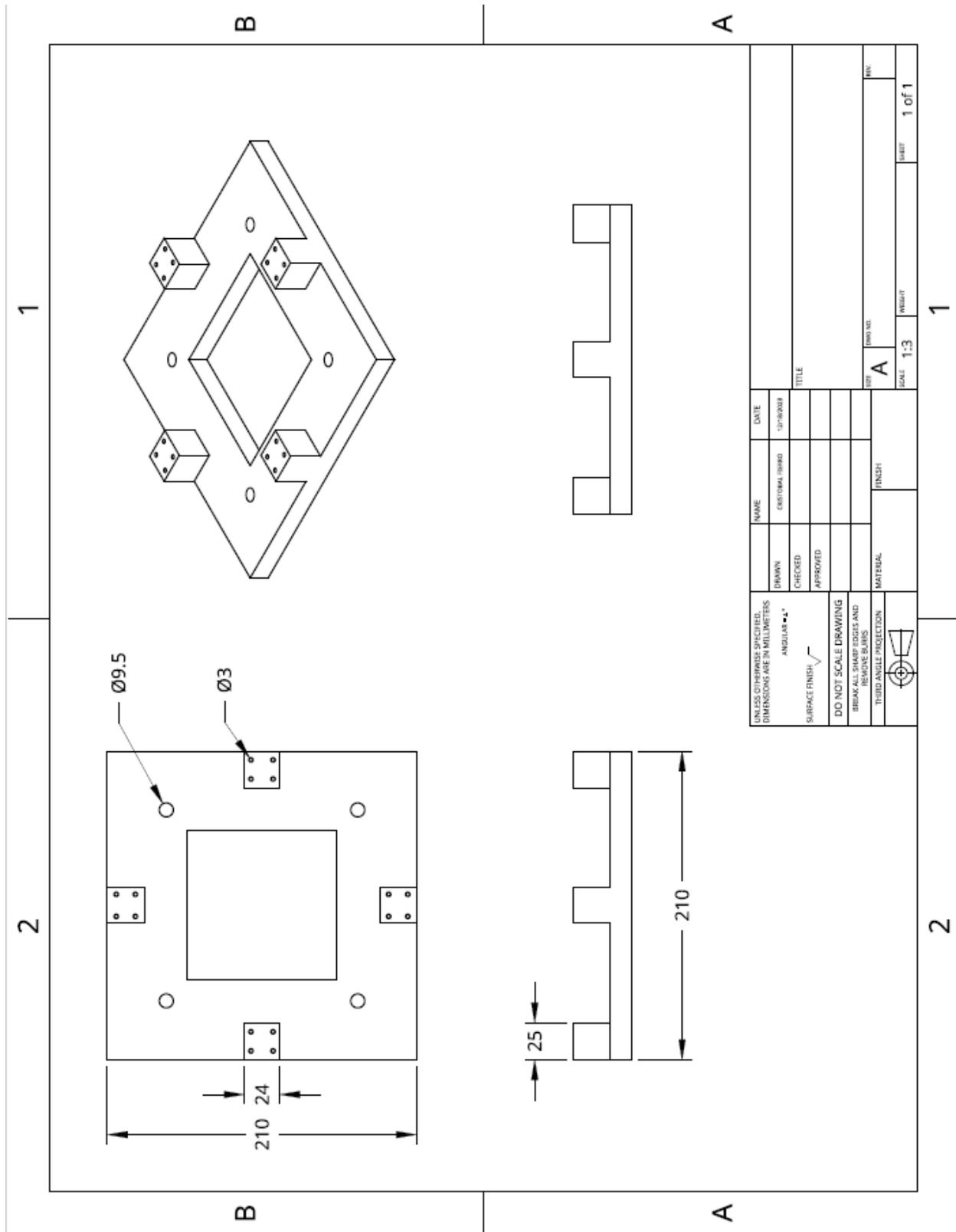
Anexo A: Carta Gantt

CARTA GANTT - Memoria de título - Cristobal Fierro

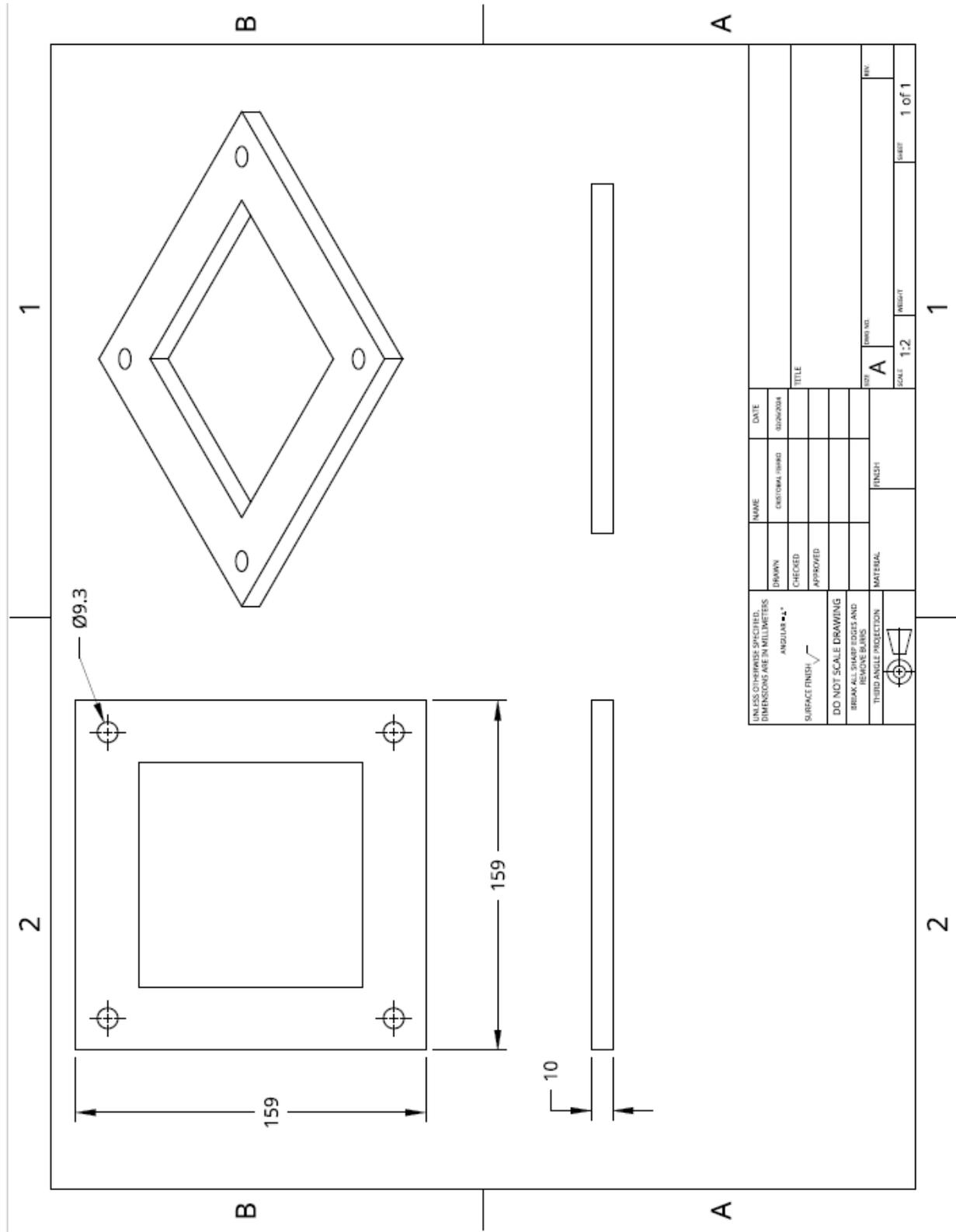




Anexo C: Base porta muestra ensayo de punción



Anexo D: Placas de fijación de muestras ensayo de punción



Anexo E: Punzón ensayo de punción

