

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



**“DISEÑO DE UNA NUEVA ESTRUCTURA DE EMPAQUE
FLEXIBLE PARA EL ENVASADO DE LECHE ENTERA EN POLVO -
FORMATO 120g”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR
EL TÍTULO DE INGENIERA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

JOHANNA FABIOLA FUSTAMANTE BURGA

Lima – Perú

2024

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

Document Information

Analyzed document	Trabajo de suficiencia profesional.pdf (D151004076)
Submitted	11/25/2022 10:56:00 PM
Submitted by	Fernando Vargas
Submitter email	fervargas@unalmolina.edu.pe
Similarity	1%
Analysis address	fervargas.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: http://www.empaque.com/temas/Metodo-IMPEE,-comportamiento-de-envases-flexibles-ante-cambios-... Fetched: 11/25/2022 10:57:00 PM	 2
W	URL: https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1594&context=all_theses Fetched: 11/25/2022 10:56:00 PM	 2
SA	8119-Legua Ramírez, Ulises Jesús.pdf Document 8119-Legua Ramírez, Ulises Jesús.pdf (D34820370)	 1
SA	47-huanuco_cr.pdf Document 47-huanuco_cr.pdf (D29672374)	 1

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL "DISEÑO DE UNA NUEVA ESTRUCTURA DE EMPAQUE FLEXIBLE PARA EL ENVASADO DE LECHE ENTERA EN POLVO - FORMATO 120g" Presentado por: JOHANNA FABIOLA FUSTAMANTE BURGA Lima – Perú 2020

2	ÍNDICE GENERAL	1
7	II. PRESENTACIÓN	
8	III. INTRODUCCIÓN	
9	IV. OBJETIVOS	
10	V. CUERPO DEL TRABAJO	
11	5.1 REVISIÓN DE LITERATURA	11
11	5.1.1 TIPOS DE EMPAQUES	11
11	5.1.2 MATERIALES UTILIZADOS EN EMPAQUES FLEXIBLES	11
12	5.1.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN EN EMPAQUES FLEXIBLES	12
16	5.1.4 LÁMINAS MULTICAPA	16
22	5.2 CONTEXTO DEL CASO DE ESTUDIO	22
23	5.3 MATERIALES Y MÉTODOS	23
35	5.4 RESULTADOS Y DISCUSIONES DE EVALUACIONES	35
40	5.4.1 APLICACIÓN DE COMPETENCIAS PROFESIONALES	40
42	5.4.2 EVALUACIONES INTERNAS	42
42	5.4.3 EVALUACIONES EXTERNAS	42
75	5.4.4	75
75	VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
79	6.1 CONCLUSIONES	79
79	6.2 RECOMENDACIONES	79
80	VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
81	VIII. ANEXOS	81
84		84

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**“DISEÑO DE UNA NUEVA ESTRUCTURA DE EMPAQUE
FLEXIBLE PARA EL ENVASADO DE LECHE ENTERA EN POLVO -
FORMATO 120g”**

Presentado por:

JOHANNA FABIOLA FUSTAMANTE BURGA

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

**M.Sc. Walter F. Salas Valerio
PRESIDENTE**

**Dr. Edwin O. Baldeón Chamorro
MIEMBRO**

**Mg.Sc. Silvia M. Garcia Torres
MIEMBRO**

**Dr. Luis F. Vargas Delgado
ASESOR**

Lima – Perú

2024

DEDICATORIA

*A mis padres, Carmen e Ytalo,
por su gran apoyo y ser mi mayor
inspiración.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISION DE LITERATURA	2
2.1. EMPAQUES FLEXIBLES	2
2.1.1. TIPOS DE EMPAQUES	2
2.1.2. MATERIALES UTILIZADOS EN EMPAQUES FLEXIBLES	4
2.1.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN EN EMPAQUES FLEXIBLES	8
2.1.4. LÁMINAS MULTICAPA	15
III. METODOLOGÍA	18
3.1. CONTEXTO DEL CASO DE ESTUDIO	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1. APLICACIÓN DE COMPETENCIAS PROFESIONALES	35
4.2. EVALUACIONES INTERNAS	37
4.2.1. GRAMAJE	40
4.2.2. FUERZA DE LAMINADO (gf/pulg)	47
4.2.3. FUERZA DE SELLO	53
4.2.4. RATIO DE TRANSMISIÓN DE OXÍGENO (OTR)	63
4.2.5. MICROSCOPIA DE ESTRUCTURAS	70
4.3. EVALUACIONES EXTERNAS	72
V. CONCLUSIONES	78
VI. RECOMENDACIONES	79

VII. BIBLIOGRAFÍA	80
VIII. ANEXOS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de propiedades de lámina extruida en película soplada y tensión mecánica.....	11
Tabla 2: Grado de protección a la permeabilidad durante un año a 25°C.....	22
Tabla 3: Composición de estructura convencional.....	24
Tabla 4: Composición de estructura 1	25
Tabla 5: Composición de estructura 2	26
Tabla 6: Composición de estructura 3	27
Tabla 7: Cuadro comparativo de costos de las estructuras propuestas.....	28
Tabla 8: Estructuras propuestas y procesos de fabricación	29
Tabla 9: Etapas de las evaluaciones internas del empaque flexible	31
Tabla 10: Etapas de análisis externos del empaque flexible	35
Tabla 11: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en el desempeño laboral.....	35
Tabla 12: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en el desarrollo de empaques flexibles para alimentos	37
Tabla 13: Especificaciones técnicas de estructura 1 (PET – LDPE coextruido con EVOH blanco negro).....	38
Tabla 14: Especificaciones técnicas de estructura 2 (Poliéster – Poliéster metalizado – LDPE).....	38
Tabla 15 Especificaciones técnicas de estructura 3 (Poliéster – Aluminio – LDPE).....	39
Tabla 16: Resultados de mediciones de gramaje de las estructuras en evaluación.	40
Tabla 17: Especificación técnica de fuerza de laminado de estructura 1 (PET/LDPE coextruido EVOH blanco negro).....	48
Tabla 18: Resultados de fuerza de laminado de estructura 1 (Poliéster – Polietileno blanco negro coextruido EVOH).....	48
Tabla 19: Resultados de fuerza de laminado de estructura 2 (Poliéster – Poliéster metalizado	49
Tabla 20: Resultados de fuerza de laminado de estructura 2 (PET/LDPE).....	50

Tabla 21: Resultados de fuerza de laminado de estructura 3 (PET/Aluminio)	51
Tabla 22: Resultados de fuerza de laminado de estructura 3 (Aluminio/LDPE)	52
Tabla 23: Resultados de fuerza de sello de la estructura 1 (Poliéster – Polietileno blanco negro coextruido EVOH).....	54
Tabla 24: Resultados de fuerza de laminado de estructura 2 (Poliéster – Poliéster metalizado – LDPE).....	57
Tabla 25: Resultados de fuerza de laminado de estructura 3 (PET – Aluminio – LDPE)	60
Tabla 26. Condiciones de proceso durante el envasado de leche en polvo	72
Tabla 27. Resultados de las evaluaciones realizadas a los empaques después del envasado.	74
Tabla 28. Prueba de transporte Lima – Huancayo de empaques de leche en polvo.....	75
Tabla 29. Resultados de prueba de transporte	75
Tabla 30. Condiciones de estudio de tiempo de vida acelerado (laboratorio externo)...	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de extrusión de película soplada (Ashter, 2016).	10
Figura 2: Esquema de línea de coextrusión de película soplada de 3 capas (izquierda) (Cheremisinoff, 2001). Extrusora de película soplada de 7 capas (derecha) (Trupal S.A., 2016).....	12
Figura 3: Esquema de proceso de impresión flexográfica (Morris, 2016).	13
Figura 4: Laminadora de adhesivo con y sin solvente (Trupal, 2016).	14
Figura 5: Esquema de laminadora sin solvente (Cheruvathur, 2009).....	14
Figura 6: Cortadora Novagraf (Trupal, 2016).	15
Figura 7: Diagrama de flujo de desarrollo de nuevos productos en Empaques Flexibles (Trupal, 2016).....	20
Figura 8: Microfotografía de lámina LDPE-EVOH-LDPE (Trupal, 2016).	26
Figura 9: Equipo Mocon OX-TRAN 2/21 (Trupal, 2016).	33
Figura 10: Esquema de sensor coulométrico (oxígeno en color rojo y nitrógeno en color azul) (Gu, 2017).....	34
Figura 11: Prueba de normalidad - Gramaje de estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE).....	41
Figura 12: Gráfico de caja – Gramaje de estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)	42
Figura 13: Prueba de normalidad - Gramaje de estructura 2 (PET/PET/LDPE).....	43
Figura 14: Gráfico de caja – Gramaje de estructura 2 (PET/PET/LDPE).....	44
Figura 15: Prueba de normalidad - Gramaje de estructura 3 (PET/AL/LDPE).....	45
Figura 16: Gráfico de caja – Gramaje de estructura 3 (PET/AL/LDPE).....	46
Figura 17: Dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 (Thwing Albert) (izquierda) y Evaluación de fuerza de laminado (derecha) (Trupal S.A., 2016).	47
Figura 18: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE).....	49
Figura 19: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 2 (PET/PET)	50
Figura 20: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 2 (PET/LDPE)	51
Figura 21: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 3 (PET/AL).....	52
Figura 22: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 3 (AL/LDPE).....	53
Figura 23: Dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 (Thwing Albert) (Trupal, 2016).	54
Figura 24: Prueba de normalidad - Fuerza de sello de estructura 1 (PET/LDPE).....	56

Figura 25: Gráfico de caja - Fuerza de sello de estructura 1 (PET/LDPE).	57
Figura 26: Prueba de normalidad - Fuerza de sello de estructura 2 (PET/PET/LDPE). 58	
Figura 27: Gráfico de caja - Fuerza de sello de estructura 2 (PET/PET/LDPE).	59
Figura 28: Prueba de normalidad - Fuerza de sello de estructura 3 (PET/AL/LDPE)... 61	
Figura 29: Gráfico de caja - Fuerza de sello de estructura 3 (PET/AL/LDPE).	62
Figura 30: Prueba de normalidad – Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE).	64
Figura 31: Gráfico de caja - Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE).	65
Figura 32: Prueba de normalidad – Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 2 (PET/PET/LDPE).	66
Figura 33: Gráfico de caja - Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 2 (PET/PET/LDPE).	67
Figura 34: Prueba de normalidad – Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 3 (PET/AL/LDPE).	68
Figura 35: Gráfico de caja - Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 3 (PET/AL/LDPE).	69
Figura 36: Microscopio óptico Leica DM 750M (Trupal, 2016).	70
Figura 37: Micrografía de estructura 1 (PET/ LDPE-EVOH-LDPE) (Trupal, 2016).	71
Figura 38: Micrografía de estructura 2 (Poliéster – Poliéster metalizado - Polietileno) (Trupal, 2016).	71
Figura 39: Micrografía de estructura 3 (Poliéster – Aluminio - Polietileno) (Trupal, 2016).	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE RATIO DE TRANSMISIÓN DE OXIGENO (OTR) DE LAS ESTRUCTURAS PROPUESTAS.....	83
ANEXO 2: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE ESTRUCTURA 1 (PET/LDPE).....	85
ANEXO 3: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE ESTRUCTURA 2 (PET/PET/LDPE)...	86
ANEXO 4: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE ESTRUCTURA 3 (PET/ALUMINIO/LDPE).....	87

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se describe el desarrollo de una lámina para envasado de leche entera en polvo, con el fin de reducir el costo del producto. Se plantearon tres propuestas de estructuras de láminas: Estructura 1 (PET/LDPE), Estructura 2 (PET/PET/LDPE) y Estructura 3 (PET/AL/LDPE), que permitan mantener las propiedades de funcionalidad y resistencia mecánica durante su transporte y distribución. Se realizaron las siguientes evaluaciones a los materiales antes del envasado: medición de gramaje, fuerza de laminado, fuerza de sello y ratio de transmisión de oxígeno. Y las siguientes evaluaciones después del envasado: pruebas de transporte y hermeticidad. Adicionalmente se comparó el ahorro que representaba cada alternativa. Los valores promedio de fuerza de laminado fueron estructura 1 (PET/LDPE) 558.1gf/25.4mm, estructura 2 (PET/PET) 188.8gf/25.4mm, estructura 2 (PET/LDPE) 441.9gf/25.4mm, estructura 3 (PET/AL) 334.0gf/25.4mm y estructura 3 (AL/LDPE) 609.2gf/25.4mm; fuerza de sello fueron estructura 1 (PET/LDPE) 2833.8gf/25.4mm, estructura 2 (PET/PET/LDPE) 2814.2gf/25.4mm y estructura 3 (PET/AL/LDPE) 2862.2gf/25.4mm; ratio de transmisión de oxígeno fueron estructura 1 (PET/LDPE) $1.051\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$, estructura 2 (PET/PET/LDPE) $1.227\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$ y estructura 3 (PET/AL/LDPE) $0.023\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$. En las pruebas después del envasado la estructura 1, estructura 2 y estructura 3 resultaron aprobadas a las pruebas de hermeticidad y prueba de transporte. En la evaluación de costos se observa una reducción de la estructura 1 (PET/LDPE) en 3.3%, estructura 2 (PET/PET/LDPE) en 13.3% y estructura 3 (PET/AL/LDPE) en 14.8%. La propuesta que resultó seleccionada fue la estructura 3 (PET/AL/LDPE) considerando que representaba mayor reducción de costo, mejores especificaciones de fuerza de laminado y ratio de transmisión de oxígeno frente a las otras estructuras propuestas.

Palabras clave: estructura de lámina, envase, gramaje, fuerza de laminado, fuerza de sello.

ABSTRACT

The present research paper describes the development of a sheet for packaging whole milk powder, in order to reduce the cost of the product. Three proposals for sheet structures were proposed: Structure 1 (PET/LDPE), Structure 2 (PET/PET/LDPE) and Structure 3 (PET/AL/LDPE), that allow to maintain the properties of functionality and mechanical resistance during its transport and distribution. The following evaluations were made to the materials before packaging: grammage measurement, lamination strength, seal strength and oxygen transmission ratio. And the following evaluations after packaging: transport and hermeticity tests. Additionally, the savings represented by each alternative were compared. The average values of laminating strength were structure 1 (PET/LDPE) 558.1gf/25.4mm, structure 2 (PET/PET) 188.8gf/25.4mm, structure 2 (PET/LDPE) 441.9gf/25.4mm, structure 3 (PET/AL) 334.0gf/25.4mm and Structure 3 (AL/LDPE) 609.2gf/25.4mm; seal strength were structure 1 (PET/LDPE) 2833.8gf/25.4mm, structure 2 (PET/PET/LDPE) 2814.2gf/25.4mm and structure 3 (PET/AL/LDPE) 2862.2gf/25.4mm; Oxygen transmission ratio were structure 1 (PET/LDPE) 1,051cm³/m²-24h, structure 2 (PET/PET/LDPE) 1,227cm³/m²-24h and structure 3 (PET/AL/LDPE) 0.023cm³/m²- 24h. About the evaluations after packaging, structure 1 (PET/LDPE), structure 2 (PET/PET/LDPE) and structure 3 (PET/AL/LDPE) were approved in the hermetic and transport tests. The cost evaluation shows a reduction of structure 1 (PET/LDPE) by 3.3%, structure 2 (PET/PET/LDPE) by 13.3% and structure 3 (PET/AL/LDPE) by 14.8%. The proposal that was selected was Structure 3 (PET/AL/LDPE) considering that it represented a greater cost reduction, better lamination force specifications and oxygen transmission ratio compared to the other proposed structures.

Keywords: sheet structures, packaging, grammage measurement, lamination strength, seal strength.

I. INTRODUCCIÓN

En la unidad de Empaques Flexibles de Trupal S.A., el 80 por ciento de los productos están destinados al envasado de alimentos, los principales productos a envasar son: productos lácteos y derivados, salsas, azúcar, fideos, snacks, entre otros; por lo que se presentan diversos casos de productos en desarrollo principalmente por reducción de costos, mejoras en estructura y productos nuevos. Por lo mencionado resulta importante el aporte de un miembro del equipo que conozca la composición del producto a envasar y los factores de deterioro a los que son vulnerables para elegir de forma adecuada los materiales de la estructura de empaque.

Durante el desarrollo de la experiencia laboral se aportó a través del conocimiento de la composición de alimentos a envasar, factores de deterioro, procesos por los que pasa el producto previo al envasado; por lo que orientado al caso de estudio que se explicará más adelante los cursos que contribuyeron directamente fueron Fenómenos de Transporte, Resistencia de Materiales y Tecnología de Leche. Otras funciones realizadas durante la experiencia laboral fueron dar seguimiento a las solicitudes de desarrollo de materiales, gestionar la fabricación de las muestras, realizar análisis de laboratorio, realizar planos mecánicos de los empaques, dar soporte técnico al área Comercial.

En el caso que se presentará a continuación, se describe el plan de desarrollo de una lámina para envasado de leche entera en polvo, con el fin de reducir costos de la estructura que se tenía validada hasta ese momento. Se plantearon tres propuestas de estructuras que permitirían mantener las propiedades de funcionalidad y resistencia mecánica durante su transporte y distribución.

Por lo tanto, en el presente trabajo se planteó sobre los siguientes objetivos:

Objetivo general:

- Diseñar una nueva estructura de empaque flexible para el envasado de leche entera en polvo - formato 120g.

Objetivos específicos:

- Detallar el proceso de desarrollo de las estructuras propuestas para el envasado de leche entera en polvo, formato 120g.
- Evaluar las propiedades de gramaje, fuerza de laminado, fuerza de sello, ratio de transmisión de oxígeno de las estructuras propuestas para el envasado de leche entera en polvo, formato 120g.
- Evaluar la hermeticidad de las estructuras propuestas para envasado de leche entera en polvo, formato 120g, en la prueba de envasado y transporte.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. EMPAQUES FLEXIBLES

2.1.1. TIPOS DE EMPAQUES

Todos los envases se desarrollan a partir de algunos materiales de envasado básicos, que pueden ser de naturaleza semirrígida, rígida o flexible. Estos materiales tienen determinadas propiedades físicas, químicas y funcionales que los hacen adecuados para determinados tipos de usos. Los requisitos de embalaje de un producto en particular corresponden con las propiedades funcionales que ofrece un material de embalaje en particular. Además, los requisitos de los envases al por menor son diferentes de los envases a granel para el mismo producto (Hanlon *et al.*, 1998). A continuación, se menciona mayor detalle de los tipos de empaque:

a. Empaques semi rígidos

Este tipo de empaques está destinado a mantener una forma definida, pero pueden presentar cierto grado de deformación bajo diferentes tipos de esfuerzos. Un claro ejemplo de este empaque son las botellas de plástico, las cuales pueden ser muy moldeables en términos de forma, tamaño y color. Dentro de esta clasificación podemos encontrar al cartón, botellas de plástico, entre otros (Packaging Materials, citado por Velásquez, 2019).

b. Empaques rígidos

Son aquellos que tienen una forma definida y no moldeable. Su rigidez permite apilar el producto sobre sí mismo sin sufrir daños. Entre este tipo de empaques se destacan el vidrio y la hojalata para el sector de alimentos (Packaging Materials, citado por Velásquez, 2019).

c. Empaques flexibles

Los empaques flexibles son los que están hechos de materiales elásticos – flexibles que se forman fácilmente después de llenarlos con un producto. El principal material utilizado en la producción son los plásticos. A los envases flexibles pertenecen las monocapas y laminados flexibles utilizados como empaque primario y secundario. Se utilizan en productos alimentarios y no alimentarios, en aplicaciones industriales, minoristas, bolsas, láminas termocontraíbles, entre otros (Izdebska-Podsiadły, 2015).

Los materiales para empaques flexibles se pueden enrollar, doblar, formar y fraccionar, para posteriormente formar cuerpos tridimensionales. En general, este tipo de envase ofrece una reducción de materiales y peso, en comparación con los envases rígidos (Illanes, 2004).

2.1.2. MATERIALES UTILIZADOS EN EMPAQUES FLEXIBLES

a. Polietileno

El polietileno es el material menos costoso disponible en envases, puede variar en densidades de 0,890 a 0,960 y se puede clasificar como polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE) (Cheruvathur, 2009).

El polietileno de baja densidad (LDPE) tiene buenas propiedades de barrera frente a la humedad, es inodoro e insípido cuando es procesado correctamente. La superficie de la película de LDPE es apolar y debe someterse a tratamientos superficiales para que sea susceptible a tintas, coatings y adhesivos (Cheruvathur, 2009).

La película de polietileno tiene propiedades de termosellado por lo que generalmente en estructuras laminadas se ubica como capa sellante, también se utiliza en estructuras monocapa y se puede imprimir superficialmente. Se utiliza para envasar productos frescos donde se desea una alta tasa de transmisión de oxígeno, y también se puede combinar con otras películas para aumentar las propiedades de barrera a aromas y gases como son EVOH y poliamida (PA) (Mieth *et al.*, 2016).

b. Polipropileno (PP)

La película de polipropileno es uno de los materiales de embalaje más versátiles, es económico debido a su baja densidad. En la producción de películas se utilizan tanto copolímeros aleatorios como homopolímeros, las películas pueden estar no orientadas, orientadas uniaxialmente u orientadas biaxialmente (Ebnesajjad, 2012).

Las películas de polipropileno no orientadas tienen un tacto muy suave y se sellan fácilmente con calor, presentan buena estabilidad térmica, excelente resistencia a la perforación, excelente resistencia al impacto y baja permeabilidad a la humedad; sin embargo, presenta barreras bajas a los gases, como el oxígeno y el dióxido de carbono, algunos perfumes y aceites como el aceite de menta. Las aplicaciones incluyen empaques para camisas, calcetería, pan y productos agrícolas, se usa como capa de resistencia y barrera en pañales desechables (Ebnesajjad, 2012).

Los procesos de fundición se utilizan generalmente para producir películas orientadas uniaxialmente, es decir, orientadas en dirección máquina. Las propiedades físicas de la película dependen del grado de orientación, la película es transparente y brillante, con alta resistencia a la tracción. Es aproximadamente tres veces más rígida y resistente que la película de polietileno de baja densidad y proporciona buenas propiedades de barrera contra la humedad. La iniciación del desgarro, por impacto, perforación o desgarro, es difícil en películas de polipropileno orientado (OPP); una vez iniciado, sin embargo, la resistencia a la propagación del desgarro es baja (Ebnesajjad, 2012).

La película de polipropileno orientada biaxialmente (BOPP) se estira en la dirección de máquina y transversal, lo que produce una orientación de la cadena molecular en dos direcciones. La orientación biaxial da como resultado una mayor tenacidad, rigidez, claridad, resistencia al aceite y grasa, y mejores propiedades de barrera al vapor de agua y al oxígeno. La resistencia al impacto a baja temperatura y resistencia al agrietamiento por flexión se modifican sustancialmente. Las películas de BOPP se utilizan en el envasado de alimentos y están reemplazando al celofán en aplicaciones como el envasado de snacks y tabaco debido a sus propiedades favorables y su bajo costo (Ebnesajjad, 2012).

La película de polipropileno debe ser tratada superficialmente para oxidar la superficie y lograr adherencia de la impresión y adhesivos. El rango de temperatura de sello, deslizamiento y brillo se pueden mejorar con revestimientos de la película con acrílicos y otros productos. El polipropileno orientado se puede metalizar para mejorar la apariencia y mejorar la barrera a la humedad, la luz y los gases. La metalización es el proceso de recubrimiento de la superficie de la película con una fina capa de polvo metálico, este proceso se realiza en condiciones de vacío (Cheruvathur, 2009).

c. Poliéster (PET)

El PET resulta de la reacción entre el ácido tereftálico y el etilenglicol, se llama reacción de condensación porque el subproducto es agua. Es un poliéster aromático ya que contiene tanto grupos carboxílicos como grupos bencénicos (aromáticos), los pesos moleculares medios oscilan entre 18.000 y 42.000 (Whelan, 1994).

El PET se pueden clasificar por su cristalinidad o grado de orden dentro de la estructura general del polímero, algunos polímeros forman cristales con relativa lentitud, de modo que el proceso de fabricación puede tener un impacto sustancial en las propiedades finales. En el caso del PET, su lenta velocidad de cristalización se aprovecha al hacer películas y láminas (Morris, 2016).

De acuerdo a la clasificación mencionada tenemos el APET (poliéster amorfo), en el proceso de este material la película se enfría rápidamente para que el PET permanezca en estado amorfo (los polímeros fundidos son amorfos porque todos los cristales se han fundido), la película resultante es transparente y flexible, pero tiene poca resistencia a la temperatura. Las aplicaciones incluyen recipientes termoformados para alimentos refrigerados. La película amorfa se puede estirar en una película orientada biaxialmente (BOPET), durante el proceso de estiramiento las cadenas de polímero se alinean y organizan en cristales, produciendo una película semicristalina transparente y resistente (Morris, 2016).

En el caso del CPET (PET cristalino), en el proceso se agrega un agente nucleante al PET para que cristalice cuando se enfría. Las bandejas hechas de CPET se utilizan para envasar alimentos de doble horneado, que el consumidor puede calentar en un microondas o en un

horno de convección. Una consecuencia de los cristales grandes es una deficiente tenacidad a baja temperatura, por lo que a menudo se agregan copolímeros de etileno para aplicaciones de congelación con el fin de mejorar la resistencia al impacto (Morris, 2016).

Entre los materiales mencionados el BOPET es usado en el sector de embalajes en vista de los buenos valores de rigidez, propiedades de deslizamiento, excelente maquinabilidad, buena imprimibilidad y apariencia óptica. Con la coextrusión, se pueden lograr superficies sellables o mates, además una ventaja de la tecnología de coextrusión que se aplica con frecuencia es la aplicación de aditivos inorgánicos en las capas exteriores delgadas, con el fin de ajustar el coeficiente de fricción requerido sin tener una influencia negativa sobre la transparencia (Ebnesajjad, 2012).

d. Etilen vinil alcohol (EVOH)

Es una de las resinas de alta barrera al oxígeno que se utilizan en envases flexibles. El EVOH es un copolímero aleatorio con una estructura química que es una combinación de unidades de etileno y alcohol vínico. El EVOH se caracteriza por su porcentaje molar de etileno e índice de fusión. El contenido de etileno representa una compensación entre la facilidad de procesamiento y el desempeño de barrera. A medida que disminuye el porcentaje en moles de etileno, la velocidad de transmisión de oxígeno disminuye (a baja HR) pero el procesamiento se vuelve más difícil (Morris, 2016).

Proporciona una barrera muy alta a los gases, aceites y disolventes orgánicos. El problema del EVOH es que es soluble en agua y su barrera a los gases se reduce cien veces con un aumento de 0 a 100 por ciento en la humedad relativa. Por esta razón, el EVOH se utiliza en sándwich de películas que proporcionan una buena barrera a la humedad, como el polipropileno y polietileno. En tales aplicaciones, a menudo se requieren adhesivos para crear una unión satisfactoria entre EVOH y otros plásticos (Hanlon *et al.*, 1998).

Las características de EVOH o etileno vinil alcohol son (Wagner, 2016):

- Buena barrera al oxígeno.
- Casi siempre se procesa en coextrusión.

- Sensibilidad a la humedad.
- Buenas propiedades ópticas.
- Alta rigidez.
- Sensibilidad al agrietamiento por flexión.

e. Foil de Aluminio

El foil de aluminio se presenta en una amplia variedad de envases, proporciona una excelente barrera a la luz, el oxígeno y otros gases; previene la pérdida de sabor. La lámina también se puede utilizar para aumentar el atractivo estético del empaque, tiene una excelente conductividad térmica, que es útil en aplicaciones de sellado por inducción. Una de las desventajas del foil de aluminio es la formación de pinholes que pueden afectar las propiedades de barrera que ofrece el material, para contrarrestar este efecto se usa el material en laminaciones con materiales poliméricos (Cheruvathur, 2009).

El foil de aluminio tiene una alta resistencia a la mayoría de las grasas y solventes orgánicos. Generalmente resiste los productos ácidos mejor que los álcalis, aunque se deben evitar los ácidos fuertes. Los ácidos alimentarios débiles normalmente no afectan al foil de aluminio, a excepción de los ácidos acéticos, donde se debe usar un recubrimiento para proteger el material (Hanlon *et al.*, 1998).

El foil de aluminio se dobla sin recuperación elástica, esto facilita darle la forma deseada. Sin embargo, también hace que se arrugue fácilmente, por lo que se debe tener mucho cuidado al manipularlo para evitar dañar su superficie lisa (Hanlon *et al.*, 1998).

2.1.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN EN EMPAQUES FLEXIBLES

A continuación, se describirán los procesos más comunes en plantas de empaques flexibles.

a. Extrusión

La extrusión de materiales poliméricos para producir productos terminados para aplicaciones industriales o de consumo es un proceso integrado, donde la extrusora comprende un componente de toda la línea. En algunas aplicaciones, las líneas de producción son muy largas con numerosas operaciones, lo que requiere que los operadores se comuniquen y trabajen juntos para producir un producto terminado aceptable. En este proceso hay diversos factores a tener en cuenta como perfil de temperatura de la extrusora, formulación de los materiales a extruir, temperatura de fusión al final de la extrusora, temperatura del baño de enfriamiento, entre otras. Cada paso del proceso agrega valor; en consecuencia, el producto alcanza su valor máximo al final de la línea. Una configuración incorrecta al comienzo del proceso puede hacer que el producto sea inaceptable al final de la línea (Wagner, 2013).

En el proceso de extrusión el material polimérico pasa por las siguientes etapas: alimentación, fundido o plastificado de polímeros, transporte hacia adelante a través del tornillo extrusor, mezclado por fusión y formado. El proceso adecuado en cada etapa producirá un producto aceptable con buen rendimiento, estética adecuada y equilibrio correcto de propiedades (Wagner, 2013).

a.1. Extrusión de película soplada

El proceso de extrusión de película soplada consiste en convertir el polímero que se encuentra en forma de resina en una película. Los pellets de polímero se introducen en una extrusora, donde se funden y bombean a través de una matriz tubular (Morris, 2016).

En este proceso, el polímero extruido sale del cabezal del extrusor al interior de la boquilla, fluye alrededor del mandril y emerge a través de una abertura redonda (también llamada anillo) para formar un tubo. A continuación, se insufla aire a través del cabezal del troquel hacia el interior del anillo, lo que infla el tubo en una burbuja tubular delgada. Luego, este tubo se aplana en los rodillos de presión y se lleva a la bobinadora (Ashter, 2016).

Este proceso se usa para la fabricación de materiales como el polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad.

En la Figura 1 se muestra el esquema de extrusión en el proceso de fabricación de materiales flexibles.

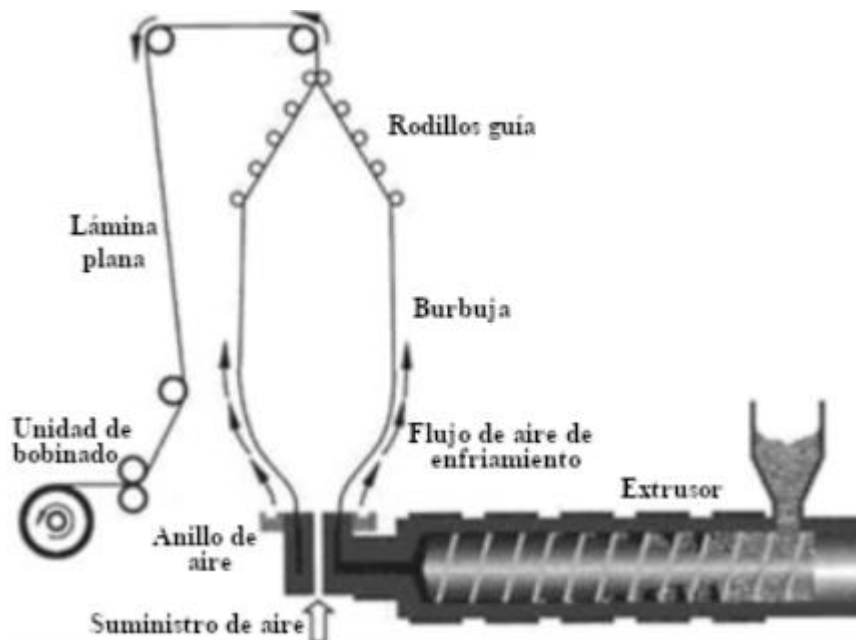


Figura 1: Esquema de extrusión de película soplada

FUENTE: Ashter (2016)

a.2. Extrusión cast (Tensión mecánica)

El proceso de extrusión mediante tensión mecánica consiste en extruir el polímero a través de una matriz plana, estirarlo hasta el espesor final fijando el extruido fundido en un rodillo frío giratorio y enfriarlo rápidamente (Morris, 2016).

Este proceso se puede utilizar para orientar uniaxialmente (dirección máquina) u orientar biaxialmente (dirección máquina y transversal), se usa en materiales como polipropileno para obtener OPP y BOPP, y polyester (BOPET).

a.3. Comparación de procesos de película soplada y fundida

En el proceso de película soplada, la masa fundida se enfría y estira simultáneamente tanto en la dirección de la máquina como en la dirección transversal durante un tiempo de proceso relativamente largo (del orden de 1 segundo o más), la mayor parte del estiramiento se realiza

cerca del punto de congelación. En el proceso de extrusión cast, el polímero se estira principalmente en la dirección de la máquina antes de que el polímero se enfríe, pero durante un tiempo de proceso mucho más corto (del orden de 0,1 segundos o menos). El resultado es que la película soplada normalmente tiene más cristalinidad y tiene una orientación más equilibrada en las direcciones de la máquina y transversales. Una mayor cristalinidad produce una película más densa, mayor turbidez, menor transparencia y mayores propiedades de barrera. Mientras que la película del proceso de tensión mecánica suele ser más suave y transparente, también puede termoformarse más fácilmente (Morris, 2016). En la Tabla 1 se observa las propiedades de la lámina extruida en película soplada y la tensión mecánica.

Tabla 1: Comparación de propiedades de lámina extruida en película soplada y tensión mecánica

Atributo	Película soplada	Tensión mecánica (cast)
Cristalinidad	Alta	Baja
Turbidez	Alta	Baja
Brillo	Baja	Alta
Barrera	Alta	Baja
Rigidez	Alta	Baja
Termoformado	Baja	Alta
Orientación	Dirección máquina y transversal	Dirección máquina

FUENTE: Morris (2016)

a.4. Coextrusión

Es la extrusión múltiple de varias capas en simultáneo que permite una mejor distribución de los materiales, con la finalidad de lograr las características deseadas en cada capa. El uso de 3 o más capas, permite formar láminas con propiedades y características específicas (color, barrera, capa sellante, entre otras).

La coextrusión es una técnica mediante la cual se unen diferentes polímeros en la fase de fusión. La compatibilidad reológica y la adhesión entre capas son críticas. Para unir polímeros incompatibles, se deben utilizar capas de unión (Cheremisinoff, 2001).

La coextrusión permite combinar propiedades interesantes de diferentes materiales en un producto, por ejemplo, propiedades de barrera y sellado, sellado en un solo lado, diferente color interior y exterior (película de hidrocultivo blanco – negro) para dar opacidad y reflexión de la luz (Cheremisinoff, 2001).

La coextrusión se puede usar tanto en el proceso de película soplada como el proceso de extrusión cast.

En la figura 2 se muestra el esquema de línea de coextrusión de 3 capas y 7 capas respectivamente.

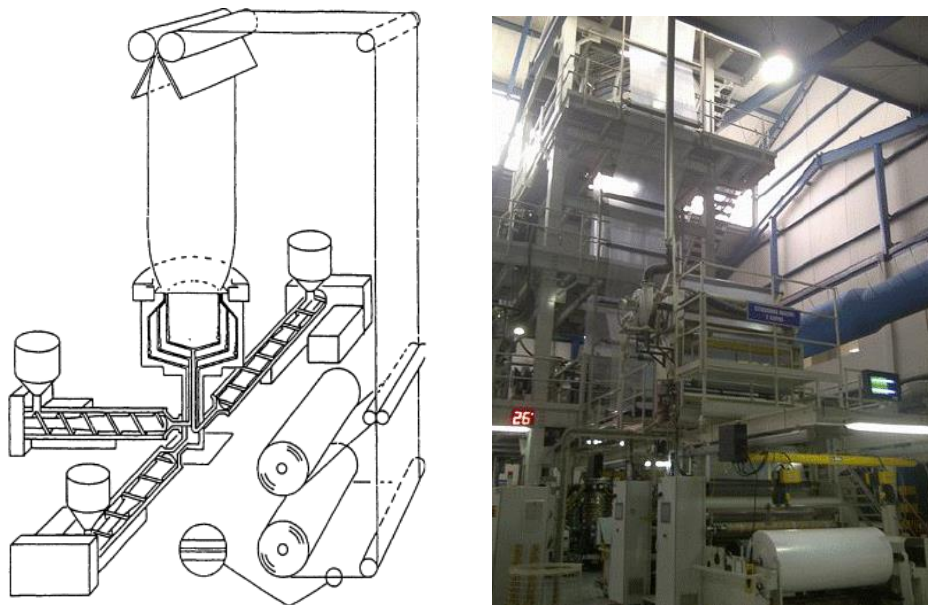


Figura 2: Esquema de línea de coextrusión de película soplada de 3 capas (izquierda). Extrusora de película soplada de 7 capas (derecha)

FUENTE: Cheremisinoff (2001)

b. Impresión flexográfica

En el proceso de impresión flexográfica se usa una plancha de impresión flexible como soporte de imagen. La tinta se dosifica sobre la superficie de la plancha mediante un rodillo grabado de cromo o cerámica con una distribución uniforme de celdas (tamaño, forma y profundidad) este rodillo se llama 'anilox', la especificación del anilox determina el volumen

de tinta transferido a la plancha de impresión. La tinta se introduce en estas celdas y el exceso de tinta se elimina posteriormente mediante un conjunto de rasquetas. La plancha transfiere la película de tinta del anilox al sustrato por imprimir (Emblem, 2012).

El proceso implica la transferencia de tinta, un color a la vez, desde la superficie de una plancha flexible a un sustrato. Se agregan colores adicionales, cada uno registrado en las ubicaciones de acuerdo al diseño a imprimir. Las planchas flexográficas utilizan caucho vulcanizado o materiales fotopoliméricos que se adhieren a cilindros giratorios (Dunn, 2015).

En la Figura 3 se observa el esquema de impresión flexográfica aplicada sobre un sustrato de lámina flexible.

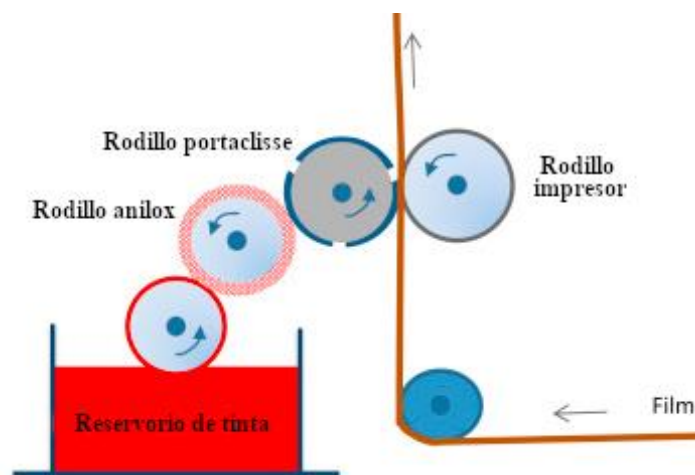


Figura 3: Esquema de proceso de impresión flexográfica

FUENTE: Morris (2016)

c. Laminación adhesiva

La laminación adhesiva es un método para unir sustratos en un proceso continuo, la técnica implica la aplicación de un adhesivo líquido a uno o ambos sustratos. El adhesivo puede ser a base de solvente, a base de agua o "sin solvente". Los adhesivos sin solvente son líquidos de baja viscosidad, como poliuretanos o isocianatos, que se aplican a uno o ambos sustratos y posteriormente se curan (Morris, 2016).

A través de la laminación, es posible unir los beneficios de los materiales, contrarrestando las deficiencias que puede presentar los materiales individualmente. La unión se logra calentando y secando la capa adhesiva y con la aplicación de presión [4]. La unión entre los materiales y el adhesivo se logra por medios químicos con adhesivos y agentes de curado o usando solo la temperatura. El modo de vinculación puede ser químico, mecánico o una combinación de ambos (Cheruvathur, 2009).

En la Figura 4 se observa una máquina laminadora de adhesivo con y sin solvente que se usa para la unión entre materiales.



Figura 4: Laminadora de adhesivo con y sin solvente

FUENTE: Trupal (2016)

En la Figura 5 se detalla el esquema de laminado sin solvente de 2 sustratos de lámina flexible.

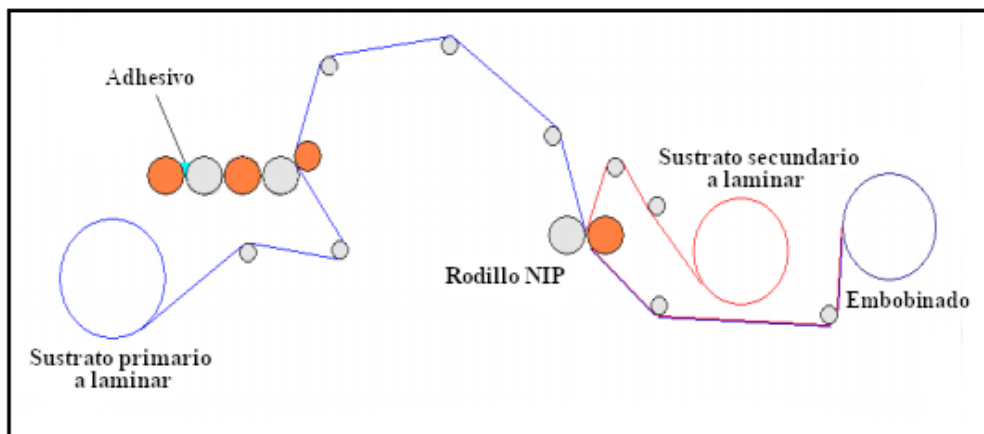


Figura 5: Esquema de laminadora sin solvente

FUENTE: Cheruvathur (2009)

d. Corte

Este proceso permite habilitar las bobinas de acuerdo a las medidas requeridas para el siguiente proceso o con las medidas finales solicitadas por el cliente. Este proceso permite cortar el material excedente en los extremos de la bobina (refile) y a su vez obtener 2 o más bobinas, de acuerdo al formato requerido.

En la Figura 6 se observa la cortadora Novagraf, usada para habilitar el material en proceso a las medidas finales solicitadas.



Figura 6: Cortadora Novagraf

FUENTE: Trupal (2016)

2.1.4. LÁMINAS MULTICAPA

Las láminas multicapa se pueden fabricar mediante coextrusión o laminación. La coextrusión se puede realizar como extrusión de película soplada o extrusión cast. En ambos casos, las resinas de los diferentes polímeros se funden por separado y las masas fundidas se juntan en la extrusora. Los polímeros combinados se extruyen luego como un solo producto en el que las capas coextruidas se unen directamente entre sí (Mieth *et al.*, 2016).

Para lograr la unión de dos capas de polímero fundido durante la coextrusión, puede ser necesario aplicar un tercer polímero en el medio ("adhesivo extruible"). Por ejemplo, el

polietileno modificado con anhídrido o EVA modificado con anhídrido pueden actuar como un adhesivo extruible en la coextrusión de PE y PA (Mieth *et al.*, 2016).

A diferencia de la coextrusión, la laminación combina dos o más materiales plásticos o no plásticos (por ejemplo: aluminio) en forma de banda aplicando un tipo de adhesivo entre ellos. Se pueden distinguir tres principios fundamentales de laminación. Se trata de laminación por extrusión, laminación adhesiva y laminación hot melt. En la laminación por extrusión, se aplica un polímero fundido (por ejemplo: LDPE) a una de las bandas y se alimenta una segunda banda desde la parte superior. En la laminación adhesiva, se aplica un adhesivo en su lugar, estos pueden ser adhesivos de uno o dos componentes, en base solvente, agua o sin solvente (solventless lamination), adhesivos por curado UV (Mieth *et al.*, 2016).

En la laminación hot melt, se aplica una capa de cera fundida entre dos laminas y luego se enfría para unir las. La cera permanece sensible al calor por lo tanto esta técnica no es adecuada si el embalaje se sellará con calor posteriormente o se llenará muy caliente (Mieth *et al.*, 2016).

III. METODOLOGÍA

3.1. CONTEXTO DEL CASO DE ESTUDIO

La estructura que usaba el cliente para el envasado de leche entera en polvo en todas sus presentaciones era BOPP/ALUMINIO/LDPE, en la búsqueda de optimizar costos de estructura manteniendo la funcionalidad del empaque y características del producto a envasar, se solicitó plantear estructuras alternativas que permitan lograr este objetivo.

Se realizaron tres propuestas combinando materiales alternativos y reduciendo el gramaje en algunos casos, para el planteamiento de estas alternativas como parte del equipo de Investigación y Desarrollo de Empaques Flexibles de Trupal S.A. se aportó con propuestas de estructuras que permitan mantener el nivel de protección del producto frente a factores que afecten el tiempo de vida útil, hermeticidad, funcionalidad del empaque durante el envasado y las propiedades mecánicas de las estructuras. Las consideraciones que se tuvo en cuenta para las propuestas son la suma de los conocimientos adquiridos durante la carrera principalmente en los cursos de Fenómenos de Transporte, Resistencia de Materiales, y Tecnología de Leche; sumado a la experiencia laboral que obtuve en la empresa Trupal S.A. en el rubro de Empaques Flexibles.

Las estructuras propuestas fueron las siguientes:

- Poliéster cristal (PET)/Polietileno de baja densidad coextruido con EVOH (LDPE-EVOH-LDPE).
- Poliéster cristal (PET)/Poliéster metalizado (PET)/Polietileno de baja densidad (LDPE).
- Poliéster cristal (PET)/Aluminio (AL)/Polietileno de baja densidad (LDPE).

Para el planteamiento de las estructuras propuestas se consideraron nuevos materiales como el PET cristal, PET metalizado y polietileno coextruido con EVOH. A continuación, las consideraciones que se tuvieron:

Morris (2016) menciona que los materiales rígidos que se usan generalmente para la integridad estructural, son polipropileno orientado (OPP) o poliéster orientado (OPET). También indica entre las propiedades de los materiales los valores de puntos de fusión de los sustratos, siendo el del OPP 161°C y OPET 254°C. Boyens (2015), evalúa la estabilidad dimensional del PET y BOPP al incrementar la temperatura, observando que a una temperatura de 140°C las dimensiones del BOPP muestran una reducción de 1.5mm, mientras que el PET se mantiene estable dimensionalmente. De acuerdo a lo mencionado, para la propuesta de estructuras se consideró el PET cristal (polietilentereftalato), teniendo en cuenta la estabilidad térmica que aportaría a la estructura, permitiendo tener mayor resistencia durante el sellado en el proceso de envasado y mejorando la apariencia de los sellos.

Morris (2016) menciona que la película metalizada se utiliza para proporcionar barrera contra la humedad, el oxígeno y la luz, y por motivos estéticos. Se utiliza una variedad de películas de sustrato para metalización en envases flexibles, incluidos PET, PP, PA y PE. De estos, PET y PP orientados son los más comunes. Considerando la especificación técnica de Flex Films (2020) los valores de barrera del poliéster metalizado de 12µm son OTR 1.1cc/m²-24h a 23°C y 0 por ciento de humedad relativa y WVTR 1g/m²-24h a 38°C y 90 por ciento de humedad relativa. Teniendo en cuenta, que los valores de barrera del PET metalizado son cercanos a los valores de barrera de la estructura actual y además provee barrera a la luz, se consideró este sustrato en la composición de una de las estructuras propuestas.

Para la elección de la lámina polietileno coextruida con EVOH con coloración blanco – negro se tuvo en cuenta lo siguiente, que la resina de EVOH aporta barrera al oxígeno, según especificación técnica de Kuraray America, Inc. (2015) el copolímero EVOH (38 por ciento mol de etilen-vinil alcohol) presenta una permeabilidad al oxígeno de 0.7 cc/m².24h.atm a condiciones de 20°C y 65 por ciento de humedad relativa (espesor de lámina 20 µm) y WVTR de 32 cc/m².24h.atm a 40°C y 90 por ciento de humedad relativa (espesor de lámina

30 μm). Así mismo, Morris (2016) indica que la transmisión de vapor de agua (WVTR) del LDPE y LLDPE, se encuentra en el rango de 15 – 20 y 12 – 18 $\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{atm}$ a condiciones de 38°C y 90 por ciento de humedad relativa (espesor de lámina 25.4 μm). Por lo que el EVOH en coextrusión con el LDPE y LLDPE complementan sus propiedades de barrera al oxígeno y vapor de agua.

Posteriormente se realizó una reunión entre el área de Investigación y Desarrollo de Empaques Flexibles de Trupal S.A. y miembros de la empresa cliente de las áreas de Marketing, Operaciones y Desarrollo de Materiales de Embalaje y Empaque, en esta reunión se detallaron las estructuras planteadas y el ahorro que generaba cada una de ellas, luego de dar la conformidad se definieron las pruebas a realizarse para validar las estructuras.

3.1.1. ETAPAS DE DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS EN EMPAQUES FLEXIBLES

A continuación, en la Figura 7 se observa el diagrama de flujo del proceso de desarrollo de nuevos productos en empaques flexibles, donde se muestra la interacción entre las áreas que forman el proceso.

a. Solicitud de diseño y desarrollo

- La solicitud de desarrollo se realiza mediante el área Comercial, esto puede ser generado por clientes o por miembros de las diferentes áreas de la empresa interesados en trabajar alguna innovación o mejora de empaque.
- Las solicitudes son canalizadas por el Ejecutivo Comercial mediante la generación de una cotización, indicando la información básica solicitada y/o requerida por el cliente.
- Una vez realizada la cotización es aprobada por el cliente, el Ejecutivo Comercial procede a ingresar en el sistema SAP, un pedido de muestra sin valor comercial.

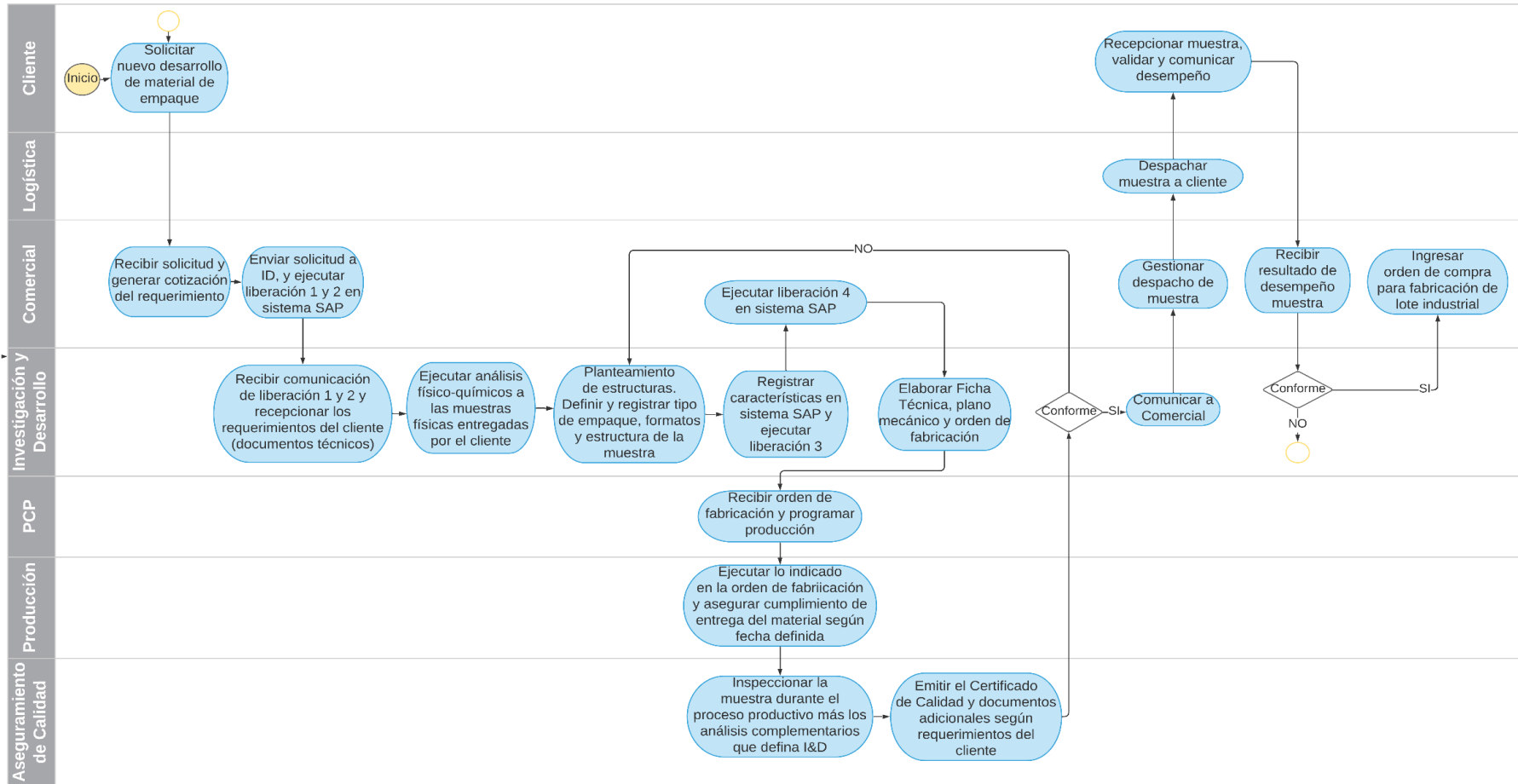


Figura 7: Diagrama de flujo de desarrollo de nuevos productos en Empaques Flexibles

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

b. Recepción de solicitud del diseño y desarrollo

- El Ejecutivo Comercial envía al área de Investigación y Desarrollo los requisitos del cliente y/o documentos adjuntos (ficha técnica del producto, planos, muestra del empaque, muestras del contenido, etc.), además detallan los requisitos del cliente en relación con el diseño, especificación, fabricación y distribución del producto.
- De ser necesario se realizan análisis fisicoquímicos previos de la muestra, con el fin de caracterizar los requisitos del cliente.

c. Planificación del diseño y desarrollo

- Con la información de los requisitos y los análisis realizados se define el tipo de empaque, formato y estructura, teniendo en cuenta el producto a envasar.
- Se elabora la Ficha Técnica de Producto Terminado de la muestra, este documento contiene las especificaciones finales de la muestra.
- En caso sea necesario se elaboran los planos mecánicos para incluir los requisitos del cliente en cuanto a dimensiones que no se precisan en la ficha técnica de producto terminado.
- Posterior al planteamiento de estructuras se hacen las órdenes de fabricación, documento que contiene la ruta de procesos, sustratos, parámetros y especificaciones definidas para cada proceso, la cual se envía al área de Planeamiento y Control de la Producción (PCP) para su programación y fabricación.

A continuación, se dará mayor alcance del planteamiento de las estructuras en estudio:

c.1. Planteamiento de estructuras

Para el planteamiento de estructuras se tuvo en cuenta el cálculo teórico de protección al oxígeno que requiere el producto a envasar con el fin de encontrar proponer estructuras que cubran los requerimientos del producto.

Comyn (2012) señala que para algunos productos se ha sugerido una guía que sirva como punto de partida, donde se muestra el grado de protección de permeación requerido para una

vida útil de un año. En la Tabla 2 se observa el grado de protección de permeación para algunos productos.

Tabla 2: Grado de protección a la permeabilidad durante un año a 25°

Product	Maximum estimated acceptable oxygen gain (ppm)	Maximum acceptable water gain or loss (%)
Canned meats	1 – 5	3, loss
Canned fish		
Canned milk		
Poultry		
Canned vegetables		
Soups		
Sauces		
Canned fruits	5 – 15	3, loss
Nuts	5 – 15	5, gain
Snack foods	5 – 15	5, gain
Dried foods	5 – 15	1, gain
Fruit juices	10 – 40	3, loss
Soft drinks	10 – 40	3, loss
Oils and fats	50 – 200	10, gain
Salad dressing	50 – 200	10, gain
Preserves	50 – 200	3, loss
Pickles	50 - 200	3, loss

FUENTE: Comyn (2012)

Se realizó el cálculo considerando que la ganancia máxima de oxígeno en la leche entera en polvo debe ser de 15ppm porque de acuerdo a la clasificación estaría dentro de alimentos deshidratados.

A partir del valor máximo de ganancia de oxígeno se realizó el cálculo del ratio de transmisión de oxígeno que requiere el empaque. Para realizar el cálculo se tomó en consideración lo mencionado por (Bishop, 2010).

$$I_M = I_P M_P = (15 * 10^{-6})(120g) = 0.0018g O_2$$

- I_M es la cantidad máxima de oxígeno en gramos que puede entrar en el empaque.
- I_P es la cantidad máxima permitida en ppm.
- M_P es la masa del producto.

Lo siguiente es convertir la masa de oxígeno en volumen

$$I_V = \frac{V_g}{m_g} * I_M = \frac{22400}{32} * 0.0018 = 1.26 \text{ cc } O_2$$

- I_V es la cantidad máxima de oxígeno en centímetros cúbicos que puede entrar en el empaque.
- V_g es 22400cc (volumen de 1 g-mol de un gas ideal en condiciones estándar de 1atm y 0°C).
- m_g es el peso molecular de oxígeno.

A partir del volumen máximo de oxígeno requerido para la degradación de productos deshidratados y considerando que el tiempo de vida del producto debe ser de un año, se realizó el siguiente cálculo para estimar el valor de ratio de transmisión de oxígeno del material de empaque.

$$J = 1.26 / (0.04896 \text{ m}^2 * 360 \text{ días}) = 0.0705 \text{ cc/m}^2 \cdot \text{día}$$

J o “flujo” es la cantidad de gas que pasa por unidad de área del polímero en una cantidad de tiempo.

Teniendo en consideración que el valor de ratio de transmisión de oxígeno parte de un cálculo teórico y de una clasificación general se consideraron en la propuesta materiales de alta barrera (EVOH, PET metalizado y aluminio) que ofrecen valores cercanos al valor de ratio de transmisión de oxígeno calculado.

Para el caso que se expone la estructura convencional es BOPP/AL/LDPE, por lo que se realizaron propuestas de estructuras combinando materiales que reemplacen y/o mejoren las propiedades mecánicas, funcionales y de barrera de la estructura convencional. En la Tabla 3 se presenta la estructura convencional BOPP/AL/LDPE.

Estructura convencional: BOPP/AL/LDPE

Tabla 3: Composición de estructura convencional

Estructura	Espesor (μm)	Gramaje (g/m²)
BOPP cristal	20.0	18.1
Tinta	2.0	2.0
Adhesivo	2.0	2.0
Aluminio	8.0	21.6
Adhesivo	2.0	2.0
LDPE cristal	45.0	41.3
TOTAL	79.0	87.0

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

La estructura convencional consta de tres láminas (trilaminado), se mencionará la composición desde la lámina externa hacia la interna, inicialmente tenemos BOPP cristal (polipropileno biorientado), aluminio en la parte central y LDPE (polietileno de baja densidad) como capa sellante.

Se decide reemplazar en las tres estructuras propuestas el BOPP cristal en la capa externa por PET, debido a que el PET presenta mejores propiedades de resistencia térmica, permitiendo que durante el sellado se obtengan sellos más uniformes, adicionalmente el precio de la lámina de poliéster es menor frente a la lámina de BOPP.

El aluminio presente en la capa central es el sustrato con propiedades de barrera al O₂ y luz, estas propiedades permiten conservar las características de la leche entera en polvo durante el tiempo de vida útil que tiene el producto.

Finalmente, en la capa interna el polietileno de baja densidad extruido con resinas de alta sellabilidad permite asegurar la hermeticidad de los sellos, por lo que se consideró este material como capa interna en todas las propuestas.

Las estructuras propuestas son las siguientes:

c.1.1. Estructura 1. PET/LDPE-EVOH-LDPE

En esta estructura se pasa de un trilaminado a un bilaminado, la resistencia térmica en la cara exterior la brinda la lámina de poliéster cristal (PET), este material permite mayor uniformidad en los sellos. El polietileno de baja densidad (LDPE) en la cara interna funciona como capa sellante y barrera al O₂ por tener una coextrusión con resinas EVOH (etilen-vinil alcohol). En la Tabla 4 se presenta la estructura bilaminada PET/LDPE-EVOH-LDPE blanco negro.

Tabla 4: Composición de estructura 1

Estructura	Espesor (µm)	Gramaje (g/m²)
Poliéster cristal	12.0	16.8
Tinta	2.0	2.0
Adhesivo	2.0	2.0
LDPE-EVOH-LDPE blanco negro	90.0	79.2
TOTAL	106.0	100.0

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

Para el caso de la lámina LDPE coextruido con EVOH (LDPE-EVOH-LDPE) se adicionó *masterbatch* blanco en la cara externa con la finalidad de ser soporte de la impresión y *masterbatch* negro en la cara interna para brindar barrera a la luz. De acuerdo a lo mencionado por Morris (2016) se pueden agregar pigmentos y cargas minerales al polímero para barrera de luz o estética. Para películas blancas con excelente barrera de luz a menudo se agrega TiO₂, en el caso del *masterbatch* negro se usa concentrado de carbón negro. La cantidad de barrera de luz u opacidad depende del tipo de pigmento (índice de refracción, tamaño de partícula), carga, qué tan bien se dispersa y grosor de la película.

La lámina LDPE-EVOH-LDPE resulta de la coextrusión en una extrusora de siete capas, esta tecnología permite sumar diferentes propiedades en la lámina de acuerdo a las resinas utilizadas, en la figura se puede apreciar la microfotografía de la lámina LDPE-EVOH-LDPE donde se observa la distribución de las capas LDPE, *masterbatch*, EVOH y adhesivo de coextrusión. Para obtener la estructura propuesta, este sustrato se lamina con PET cristal en un proceso llamado laminado con solvente por lo que se considera una estructura bilaminada.

En la Figura 8 se observa la estructura LDPE-EVOH-LDPE a nivel de microfotografía.

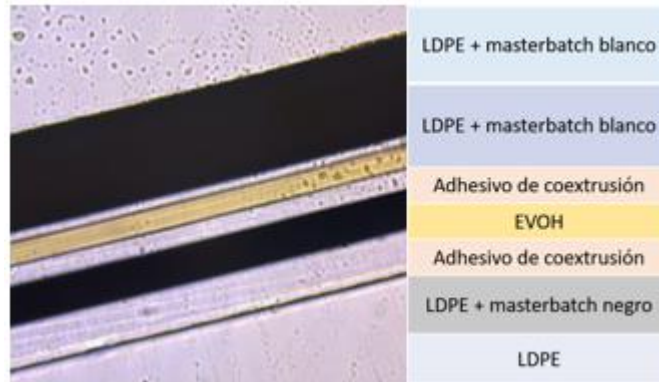


Figura 8: Microfotografía de lámina LDPE-EVOH-LDPE

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

c.1.2. Estructura 2. PET cristal/ PET metal/ LDPE

En esta propuesta la resistencia térmica en la cara exterior la brinda el poliéster cristal, como capa central el poliéster metalizado cumple la función de barrera a la luz, oxígeno y humedad; en la capa interna se encuentra el polietileno de baja densidad (LDPE) que funciona como capa sellante. En la Tabla 5 se presenta la estructura trilaminada PET cristal/PET metal/LDPE.

Tabla 5: Composición de estructura 2

Estructura	Espesor (µm)	Gramaje (g/m²)
Poliéster cristal	12.0	16.8
Tinta	2.0	2.0
Adhesivo	2.0	2.0
Poliéster metalizado	12.0	16.8
Adhesivo	2.0	2.0
LDPE cristal	44.0	40.4
TOTAL	74.0	80.0

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

c.1.3. Estructura 3. PET cristal/AL/LDPE

En la cara externa de esta estructura se coloca poliéster cristal que presenta propiedades de resistencia térmica, como capa central está el aluminio que actúa como barrera a la luz, oxígeno y humedad; y en la cara interna el polietileno cristal como capa sellante. Para esta propuesta se realizó una reducción de gramaje frente a la estructura inicial, mediante la reducción de espesor del polietileno de baja densidad (LDPE) de 45 a 30 μ m. En la Tabla 6 se presenta la estructura trilaminada PET cristal/ Aluminio /LDPE cristal 30 μ m.

Tabla 6: Composición de estructura 3

Estructura	Espesor (μ m)	Gramaje (g/m^2)
Poliéster cristal	12.0	16.8
Tinta	2.0	2.0
Adhesivo	2.0	2.0
Aluminio	8.0	21.6
Adhesivo	2.0	2.0
LDPE cristal	30.0	27.6
TOTAL	56.0	72.0

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

Robertson (2009) mencionan que una bolsa laminada para leche en polvo debe tener barrera al vapor de agua, O₂ y luz. El aluminio es capaz de proporcionar dicha barrera siempre que no tenga pin holes. El aluminio integrado en un material flexible proporciona una barrera casi absoluta. Por lo que construir en conjunto un material flexible es esencial porque la lámina no tiene ninguna resistencia mecánica por sí misma y, por lo tanto, necesita protección contra daños mecánicos. Trupal (2015), según información expuesta por el proveedor de aluminio se indica que en una estructura PET12/AL7/LDPE50 el valor de OTR es menor a 0.1cc/m²-24h y WVTR 0.01g/m²-24h a 23°C, 85 por ciento de humedad relativa, espesor 69 μ m.

c.2. Evaluación de costos

Adicionalmente, en conjunto con el área Comercial se realizó una evaluación de costos de cada estructura propuesta con el fin de evaluar el porcentaje de reducción de costo que representa cada estructura propuesta respecto a la estructura convencional.

Tabla 7: Cuadro comparativo de costos de las estructuras propuestas

	Estructuras	Gramaje (g/m²)	Costo (\$/kg)	Costo (\$/m²)	Reducción costo (%)
Convencional	BOPP/AL/LDPE	87	6.90	0.6	-
1	PET/LDPE-EVOH-LDPE	100	5.80	0.58	3.3
2	PET/PET/LDPE	80	6.50	0.52	13.3
3	PET/AL/LDPE	72	7.10	0.511	14.8

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

Se observa que en la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE) el costo por kilogramo disminuye respecto a la estructura de convencional, debido a que se reemplaza el aluminio que es el sustrato de mayor costo por polietileno de baja densidad de alta barrera. Por lo que, a pesar de presentar un mayor gramaje respecto a la estructura convencional, representa una reducción de costo de 3.3 por ciento.

En el caso de la estructura 2 (PET/PET/LDPE) el costo por kilogramo disminuye respecto a la estructura convencional, debido a que se reemplaza el aluminio que es el sustrato de mayor costo por PET metalizado. Además, esta estructura presenta reducción de gramaje respecto a la estructura convencional, por lo que representa una reducción de costo de 13.3 por ciento.

En el caso de la estructura 3 (PET/AL/LDPE) el costo por kilogramo se incrementa, esto debido a que en la estructura 3 la reducción de espesor del polietileno genera un incremento de costo, debido a que implica menor velocidad en el proceso de producción. Sin embargo, al ser de un gramaje menor que la estructura convencional, representa una reducción de costo de 14.8 por ciento.

Se observa en la Tabla 7 que las tres estructuras propuestas representan una reducción de costos frente a la estructura convencional.

d. Programación de fabricación de muestras

El área de Planeamiento y Control de la Producción (PCP) recibe las órdenes de fabricación donde se detallan los procesos y condiciones a tener en cuenta para fabricar las muestras, el

área de PCP indica la fecha de programación para la fabricación, considerando los procesos por los que atraviesa la muestra.

e. Fabricación de muestras

Se fabrican las muestras siguiendo la ruta y condiciones de procesos indicada en la orden de fabricación y documentos adicionales de ser necesario.

En la Tabla 8 se muestra las estructuras propuestas y sus procesos de fabricación.

Tabla 8: Estructuras propuestas y procesos de fabricación

Estructuras	Procesos de fabricación
1 PET/LDPE-EVOH-LDPE	Extrusión, impresión, bilaminado y corte
2 PET/PET/LDPE	Extrusión, impresión, bilaminado, trilaminado y corte
3 PET/AL/LDPE	Extrusión, impresión, bilaminado, trilaminado y corte

f. Inspección de muestras

- El área de Aseguramiento de Calidad realiza el seguimiento durante el proceso de fabricación de las muestras para hacer los controles respectivos de acuerdo a lo establecido en el plan de Calidad y lo indicado en la Ficha Técnica de producto terminado.

- El área de Aseguramiento de Calidad es la encargada de emitir el Certificado de Calidad.

g. Resultados del diseño y desarrollo

- El área de Investigación y Desarrollo recopila datos de control, analiza y compara con los requisitos especificados inicialmente. Determina si los requisitos establecidos en la Ficha Técnica de Producto Terminado se han cumplido.

- Si los requisitos no se han cumplido, de requerirse la fabricación de una nueva muestra, el proceso vuelve a la etapa de planificación del diseño y desarrollo.

h. Entrega de muestras

- El área de Investigación y Desarrollo se encarga de dar aviso vía correo electrónico al Área Comercial, que la muestra está debidamente liberada e internada en almacén para gestionar el despacho al cliente.
- El Ejecutivo de Ventas se encarga de gestionar el despacho de la muestra al cliente.

i. Validación del diseño y desarrollo

- El Ejecutivo de Ventas gestiona la validación del desarrollo por parte del cliente; donde se dará por terminado el desarrollo y será manejado desde ese momento como uno más de los materiales dentro de del sistema productivo y será apto para atender requerimientos regulares.
- El Ejecutivo de Comercial coordina con el cliente el envío del informe con los resultados de la validación.
- En caso de no ser validado por el cliente se volverá a la etapa inicial tomando en consideración la información durante la validación.

3.2. EVALUACIONES INTERNAS Y EXTERNAS

Las evaluaciones que se realizaron a las muestras fabricadas para su validación las podemos clasificar en evaluaciones internas que se realizaron en la planta de Trupal S.A. y evaluaciones externas se realizaron en las instalaciones del cliente.

3.2.1. EVALUACIONES INTERNAS

En la Tabla 9 se muestran las evaluaciones que se realizan en los laboratorios de Trupal S.A. al producto terminado, con el fin de definir si el material cumple con las especificaciones técnicas emitidas por el área de Investigación y Desarrollo.

Tabla 9: Etapas de las evaluaciones internas del empaque flexible

	TIPOS DE EVALUACIÓN
Evaluaciones internas - Aseguramiento de Calidad (Trupal S.A.)	Gramaje Fuerza de laminado Fuerza de sello Transmisión de oxígeno Microfotografía

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

a. Gramaje

Para la evaluación del gramaje de las estructuras se realizó lo siguiente:

- Se tomaron muestras en diferentes zonas de la lámina, considerando las dimensiones de 10x10cm en dirección longitudinal o máquina y dirección transversal de la lámina.
- Se pesó el material que se cortó en una balanza analítica en gramos, el resultado se divide entre el área y se expresa en g/m^2 .
- Se realizaron 20 repeticiones.

b. Fuerzas de laminado (gf/pulg)

La medición de fuerzas de laminado se realizó en un dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 (Thwing Albert), de acuerdo a la norma ASTM F904 - 16. Teniendo en consideración lo siguiente:

- Cortar las probetas a un ancho de 25.4mm \pm 5% (1 pulgada) en dirección transversal y 250mm (10 pulgadas) en dirección longitudinal aproximadamente. Es importante que las probetas se corten con bordes limpios y uniformes para no afectar los resultados de la prueba.
- Iniciar la separación de los sustratos de la estructura de forma mecánica, si es posible. Es decir, se arrugarán bruscamente y/o se aplicará cinta adhesiva a ambos lados para luego separar. En caso de no funcionar lo anterior, iniciar la separación haciendo un sello térmico y generar el rasgado del material de modo que se separen los sustratos (ASTM F 904 – 16). Para el caso de las muestras se realizó la delaminación sellando

una zona del material, realizando pequeños cortes con la cuchilla y arrugando el material hasta generar separación de los sustratos. Luego se delaminaron mecánicamente una porción de modo que se tenga una zona delaminada y otra laminada.

- Sujetar los extremos separados de la probeta en las mordazas del dinamómetro, considerando una distancia inicial de 25,4 mm (1,0 pulg.) y asegurar que las mordazas estén alineadas verticalmente.
- Iniciar la prueba en el dinamómetro y registrar la fuerza para separar 3 pulgadas de la muestra a 280mm/min $\pm 10\%$ (10 o 12 pulgadas/min).
- Se tomaron 5 repeticiones por cada probeta en zonas aleatorias.

c. Fuerza de sello

La evaluación de fuerza de sello se realizó en un dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 (Thwing Albert), de acuerdo a la norma ASTM F-88/F88M – 15. Teniendo en consideración lo siguiente:

- Cortar probetas de 1 pulgada en dirección transversal y 5 pulgadas en dirección longitudinal o máquina.
- Realizar el sellado en una selladora de pedal, considerando las siguientes condiciones de sellado:
 - Temperatura de sello ($^{\circ}\text{C}$): 160
 - Presión (bar): 5
 - Tiempo (segundos): 0.5
- Centrar y alinear la probeta en las mordazas de manera que la línea de sellado sea perpendicular a la dirección de tracción, permitiendo suficiente holgura para que el sello no quede sometido a tensión antes del inicio de la prueba.
- El sello se evalúa a una velocidad de apertura de mordazas de 300mm/min.
- Se reporta la fuerza máxima desde que la probeta es sometida a tensión hasta la apertura del sello.

d. Ratio de transmisión de oxígeno (OTR)

El ratio de transmisión de oxígeno (OTR) es la cantidad de oxígeno que pasa a través de superficies paralelas de un film plástico por unidad de área y por unidad de tiempo en condiciones de prueba determinadas. La unidad en el Sistema Internacional (SI) de ratio de transmisión es el mol/m²-s. A su vez, una unidad comúnmente utilizada de OTR es el cm³/m²-24h (ASTM D3985).

En la Figura 9 el Mocon OX-TRAN 2/21 se encarga de medir el ratio de transmisión de oxígeno.



Figura 9: Equipo Mocon OX-TRAN 2/21

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

La muestra de prueba se sostiene de manera que separe dos lados de una cámara de prueba. Un lado está expuesto a una atmósfera de nitrógeno mientras que el otro está expuesto a una atmósfera de oxígeno. Un sensor coulométrico que monitorea el puerto de salida del lado del nitrógeno mide la cantidad de oxígeno presente. La prueba está completa cuando la concentración de oxígeno en la atmósfera del lado del nitrógeno es constante.

El sensor de oxígeno coulométrico es una celda de combustible que funciona de acuerdo con la ley de Faraday. Cuando el oxígeno ingresa al sensor culombimétrico, el sensor reacciona con las moléculas de oxígeno para liberar cuatro electrones libres. El sensor detecta esta reacción como una corriente eléctrica, cuya magnitud es proporcional a la cantidad de oxígeno que fluye hacia el sensor por unidad de tiempo (Gu, 2017).

En la Figura 10 detalla el esquema de sensor coulométrico, celda de combustible de acuerdo con la ley de Faraday.

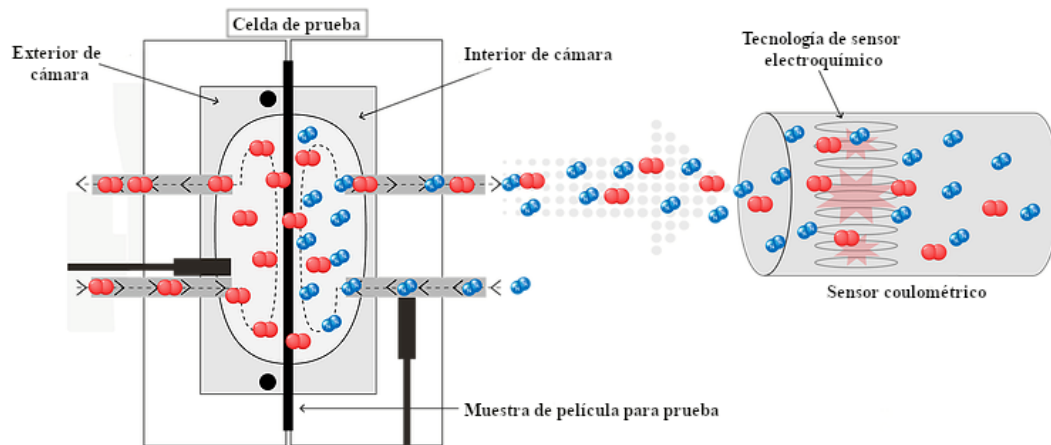


Figura 10: Esquema de sensor coulométrico (oxígeno en color rojo y nitrógeno en color azul)

FUENTE: Gu (2017)

La evaluación de ratio de transmisión de oxígeno (OTR) se realizó de acuerdo con la norma ASTM D3985.

Condiciones de análisis:

- Temperatura ambiental: 23°C
- Presión atmosférica: 1atm

e. Microscopía de estructuras

Para la preparación de la muestra se utilizó un microtomo Leica RM 2125RTS, este equipo nos permite realizar un corte transversal de la lámina en un rango de 10 a 50µm. Luego para la visualización de la muestra se utilizó el microscopio óptico Leica DM 750M que permite un aumento de 10x a 1000x con el fin de visualizar y verificar la composición de las tres estructuras. Para realizar estas evaluaciones se tomó en cuenta lo siguiente:

- Cortar una sección de lámina de aproximadamente 2x2cm.

- Colocar la sección de lámina de perfil entre las placas de metal del micrótopo para dar soporte.
- Verificar que el indicador de espesor de corte indique 30µm.
- Alinear la muestra con la cuchilla, y realizar unos cortes iniciales para mejorar la alineación.
- Realizar el corte y tomar el filamento cortado con ayuda de una pinza en la placa porta muestras.
- Colocar sobre la muestra una gota de alcohol yodado 2% y cubrir con la placa cubreobjetos.
- Colocar en el microscopio Leica DM 750M para su visualización.

3.2.2. EVALUACIONES EXTERNAS

En la Tabla 10 se muestran las evaluaciones que realizó el cliente con participación de personal de Trupal S.A.

Tabla 10: Etapas de análisis externos del empaque flexible

TIPOS DE EVALUACIÓN	
Evaluación en el proceso de envasado (Maquila)	Evaluación en línea de producción (hermeticidad)
Evaluaciones complementarias	Evaluación de transporte

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. APLICACIÓN DE COMPETENCIAS PROFESIONALES

El presente plan de Trabajo de Suficiencia Profesional se encuentra enmarcado dentro de las actividades realizadas por el Bachiller en Ciencias – Industrias Alimentarias en la empresa TRUPAL S.A., desempeñando el cargo de Analista de Investigación y Desarrollo. La carrera de Industrias Alimentarias permite el correcto desenvolvimiento dentro de la empresa, tanto en conocimientos como en competencias adquiridas.

En el proceso de fabricación de empaques para alimentos se realiza la transformación de materiales que permitan obtener estructuras adecuadas para la conservación y comercialización de alimentos. Están involucrados diferentes procesos como Aseguramiento de Calidad, Producción, Planeamiento y Control de la Producción, Investigación y Desarrollo, entre otros. Para el adecuado desempeño en el flujo de estos procesos se pusieron en práctica los conocimientos adquiridos durante los años de estudio, tal como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en el desempeño laboral

Cursos	Conocimientos adquiridos puestos en práctica
Tecnología de Alimentos I	Conservación y procesamiento de alimentos
Química de alimentos	Conocimiento de composición de alimentos
Gestión de la Calidad	Conocimiento de normas ISO
Dibujo en ingeniería	Elaboración de planos mecánicos
Maquinaria para la industria alimentaria	Referencia de equipos para visitas técnicas a plantas de alimentos

Asimismo, en el presente Trabajo de Suficiencia Profesional se puso en práctica el desarrollo de empaques para alimentos aplicando conocimientos de composición, procesos de transformación y factores de deterioro del producto a envasar; a su vez propiedades mecánicas y barrera de materiales que permitan conservar las características del producto teniendo en cuenta el desempeño del empaque durante el proceso de envasado. Estas funciones se desempeñaron apropiadamente ya que se ponen en práctica los siguientes cursos.

En la Tabla 12 se detalla los cursos aplicados para el desarrollo de empaques flexibles en alimentos.

Tabla 12: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en el desarrollo de empaques flexibles para alimentos

Cursos	Conocimientos adquiridos puestos en práctica
Fenómenos de Transporte	Transferencia de masa aplicado a las propiedades de barrera de materiales
Resistencia de Materiales	Propiedades mecánicas de materiales que se usan en empaques
Tecnología de Leche	Composición de productos lácteos, factores de deterioro, procesos por los que pasa el producto previo al envasado.

Sumado a las capacidades y competencias para trabajar en equipo, manejo de información técnico-científica, adaptabilidad a cambios, comunicación y responsabilidad en el trabajo, permitió un adecuado desenvolvimiento en las actividades laborales y ejecución de las labores encomendadas.

4.2. EVALUACIONES INTERNAS

Se realizaron los controles en el laboratorio de Aseguramiento de Calidad de Trupal S.A. con el fin de determinar que las estructuras cumplan con las especificaciones detalladas a continuación:

En la Tabla 13 se presenta las especificaciones técnicas de la estructura 1 PET/LDPE-EVOH-LDPE.

Tabla 13: Especificaciones técnicas de estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)

SUSTRATO	TIPO	ESPESOR (μm)	GRAMAJE (g/m^2)
1	PET	TRANSPARENTE	12.0
2	TINTA	LAMINACIÓN	2.0
3	ADHESIVO	BICOMPONENTE	2.0
4	LDPE-EVOH-LDPE	BLANCO NEGRO	90.0
TOTAL		106.0	100.0
VARIABLES	MÉTODO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
	MATERIAL		
Gramaje	TP-AC04-M002	g/m^2	$100 \pm 10\%$
COF cinético externo	ASTM D 1894	Adimensional	0.15 – 0.45
COF cinético interno	ASTM D 1894	Adimensional	0.08 – 0.25
Fuerza de laminado	TP-AC04-M015	$\text{gf}/25.4\text{mm}$	≥ 400
Fuerza de sello	TP-AC04-M016	$\text{gf}/25.4\text{mm}$	≥ 2000
	DIMENSIONALES		
Ancho	TP-AC04-M009	mm	316 ± 2
Frecuencia	TP-AC04-M009	mm	170 ± 2
	BARRERA		
Transmisión de oxígeno	ASTM D 3985	$\text{cc}/\text{m}^2\text{-}24\text{h}$	≤ 5
Transmisión de vapor de agua	ASTM F1249	$\text{g}/\text{m}^2\text{-}24\text{h}$	≤ 10

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

En la Tabla 14 se presenta las especificaciones técnicas de la estructura 2 PET/PET/LDPE.

Tabla 14: Especificaciones técnicas de estructura 2 (PET/PET/LDPE)

SUSTRATO	TIPO	ESPESOR (μm)	GRAMAJE (g/m^2)
1	PET	TRANSPARENTE	12.0
2	TINTA	LAMINACIÓN	2.0
3	ADHESIVO	BICOMPONENTE	2.0
4	PET	METALIZADO	12.0
5	ADHESIVO	BICOMPONENTE	2.0
6	LDPE	TRANSPARENTE	44.0
TOTAL		74.0	80.0
VARIABLES	MÉTODO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
	MATERIAL		

<<Continuación>>

Gramaje	TP-AC04-M002	g/m²	80 ± 10%
COF cinético externo	ASTM D 1894	Adimensional	0.15 – 0.45
COF cinético interno	ASTM D 1894	Adimensional	0.08 – 0.25
Fuerza de laminado 1 (PET – PET metal)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥150
Fuerza de laminado 2 (PET metal - LDPE)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400
Fuerza de sello	TP-AC04-M016	gf/25.4mm	≥2000
DIMENSIONALES			
Ancho	TP-AC04-M009	mm	316 ± 2
Frecuencia	TP-AC04-M009	mm	170 ± 2
BARRERA			
Transmisión de oxígeno	ASTM D 3985	cc/m ² -24h	≤5
Transmisión de vapor de agua	ASTM F1249	g/m ² -24h	≤1

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

En la Tabla 15 se muestra las especificaciones técnicas de la estructura 3 PET/AL/LDPE.

Tabla 15: Especificaciones técnicas de estructura 3 (PET/AL/LDPE)

SUSTRATO	TIPO	ESPESOR (µm)	GRAMAJE (g/m²)
1 PET	TRANSPARENTE	12.0	16.8
2 TINTA	LAMINACIÓN	2.0	2.0
3 ADHESIVO	BICOMPONENTE	2.0	2.0
4 ALUMINIO	TEMPLE O	8.0	21.6
5 ADHESIVO	BICOMPONENTE	2.0	2.0
6 LDPE	TRANSPARENTE	30.0	27.6
TOTAL		56.0	72.0
VARIABLES	MÉTODO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL			
Gramaje	TP-AC04-M002	g/m ²	72 ± 10%
COF cinético externo	ASTM D 1894	Adimensional	0.15 – 0.45
COF cinético interno	ASTM D 1894	Adimensional	0.08 – 0.25
Fuerza de laminado 1 (PET-AL)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥300
Fuerza de laminado 2 (AL-LDPE)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400
Fuerza de sello	TP-AC04-M016	gf/25.4mm	≥2000
DIMENSIONALES			
Ancho	TP-AC04-M009	mm	316 ± 2
Frecuencia	TP-AC04-M009	mm	170 ± 2
BARRERA			
Transmisión de oxígeno	ASTM D 3985	cc/m ² -24h	≤1
Transmisión de vapor de agua	ASTM F1249	g/m ² -24h	≤1

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

En el Anexo 2, Anexo 3 y Anexo 4 se encuentran las fichas técnicas detalladas.

4.2.1. GRAMAJE

El gramaje hace referencia a la cantidad de masa del material que hay por unidad de superficie, generalmente representada en g/m^2 . La evaluación del gramaje se realizó tomando como referencia la norma ASTM D4321 – 15.

En la tabla 16 se muestran los resultados de la evaluación de gramaje:

Tabla 16: Resultados de mediciones de gramaje de las estructuras en evaluación

Estructuras	Estructura 1: PET/LDPE- EVOH-LDPE	Estructura 2: PET/PET/LDPE	Estructura 3: PET/AL/LDPE
Especificación de gramaje (g/m^2)	100 ± 10	80 ± 8	72 ± 7.2
R1	101.2	81.2	72.4
R2	101.8	81.7	72.9
R3	102.3	80.6	73.2
R4	102.7	82.4	71.6
R5	101.9	80.5	72.4
R6	100.8	81.4	72.8
R7	101.7	82.3	73.4
R8	101.2	81.2	72.4
R9	103.4	80.8	72.1
R10	100.5	80.6	73.5
R11	99.7	80.8	73.8
R12	101.6	81.7	73.7
R13	100.3	80.7	72.3
R14	101.4	81.3	73.4
R15	102.4	80.4	72.9
R16	101.5	80.1	73.1
R17	102.0	81.5	72.8
R18	100.7	81.6	73.4
R19	101.6	81.4	72.4
R20	101.5	81.9	73.1
Promedio (g/m^2)	101.5	81.2	72.9
Desviación estándar	0.860	0.633	0.582

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

a.1. Estructura 1. PET/LDPE-EVOH-LDPE

Se realizó una prueba de normalidad Anderson - Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

a.1.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable gramaje de la estructura 1 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

H_1 : La variable gramaje de la estructura 1 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 11 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/LDPE-EVOH-LDPE.

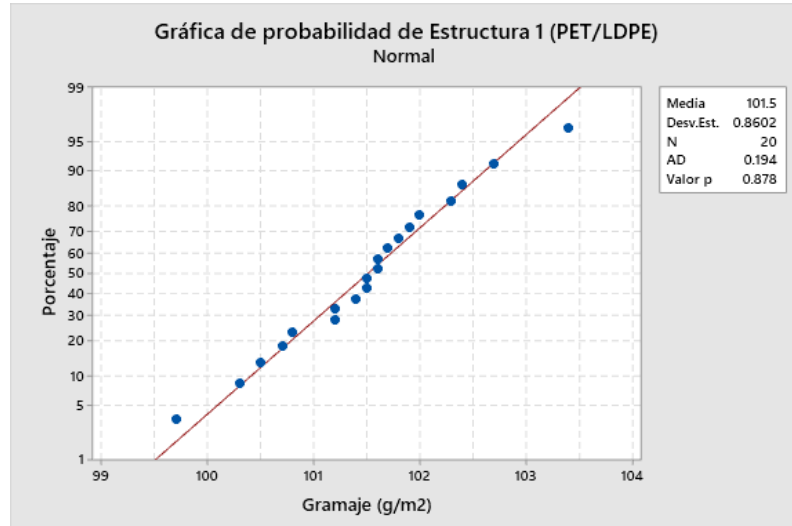


Figura 11: Prueba de normalidad - Gramaje de estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.878, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se

puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 0.8602 y la media 101.5. Los resultados fueron los siguientes:

a.1.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
20	101.510	0.860	0.192	(101.133, 101.887)

μ : media de PET/LDPE
 Desviación estándar conocida = 0.8602

En la Figura 12 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

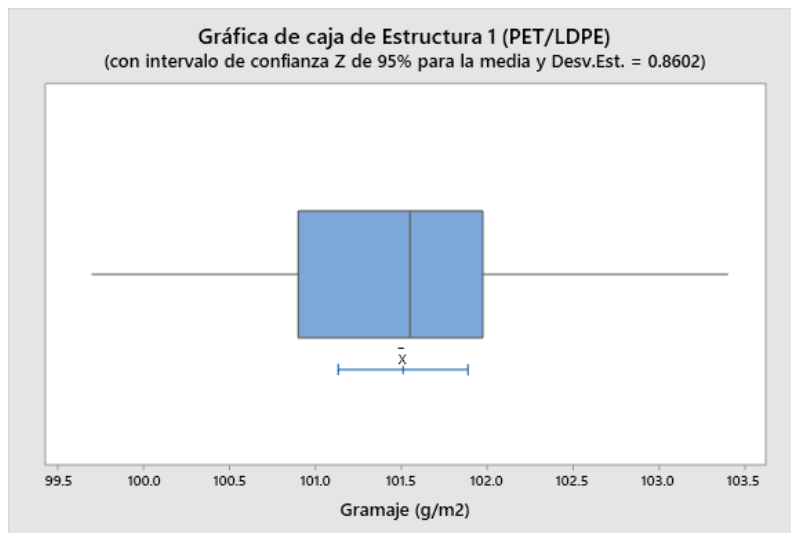


Figura 12: Gráfico de caja – Gramaje de estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media del gramaje de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE) es 101.5g/m² y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 101.1 y 101.8g/m² con una probabilidad del 95%.

a.2. Estructura 2. PET/PET/LDPE

Se realizó una prueba de normalidad Anderson - Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

a.2.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable gramaje de la estructura 2 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

H_1 : La variable gramaje de la estructura 2 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 13 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/PET/LDPE.

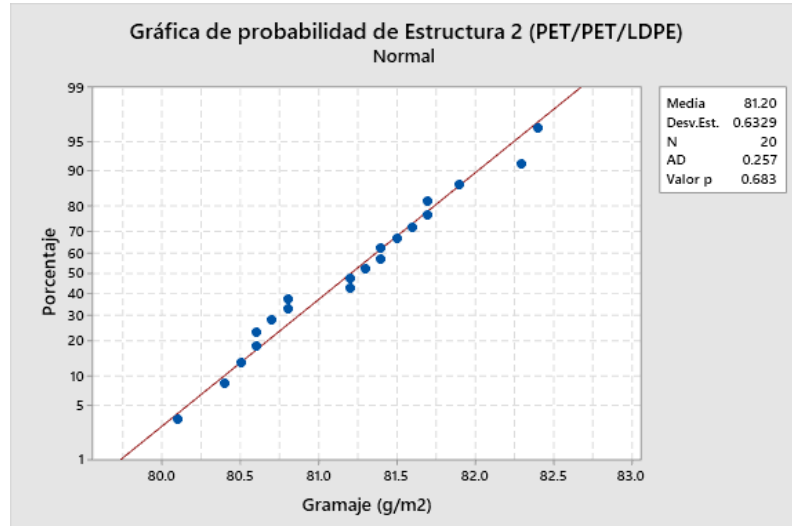


Figura 13: Prueba de normalidad - Gramaje de estructura 2 (PET/PET/LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.683, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se

puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 0.6329 y la media 81.20. Los resultados fueron los siguientes:

a.2.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
20	81.205	0.633	0.142	(80.928, 81.482)

μ : media de PET/PET/LDPE
 Desviación estándar conocida = 0.6329

En la Figura 14 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/PET/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

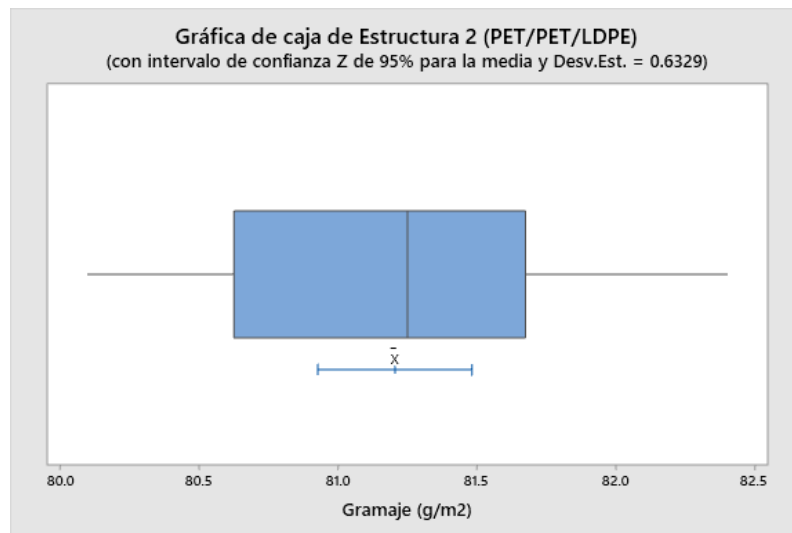


Figura 14: Gráfico de caja – Gramaje de estructura 2 (PET/PET/LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media del gramaje de la estructura 2 (PET/PET/LDPE) es 81.2g/m² y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 80.9 y 81.4g/m² con una probabilidad del 95%.

a.3. Estructura 3. PET/AL/LDPE

Se realizó una prueba de normalidad Anderson - Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

a.3.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable gramaje de la estructura 3 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

H_1 : La variable gramaje de la estructura 3 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 15 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/AL/LDPE.

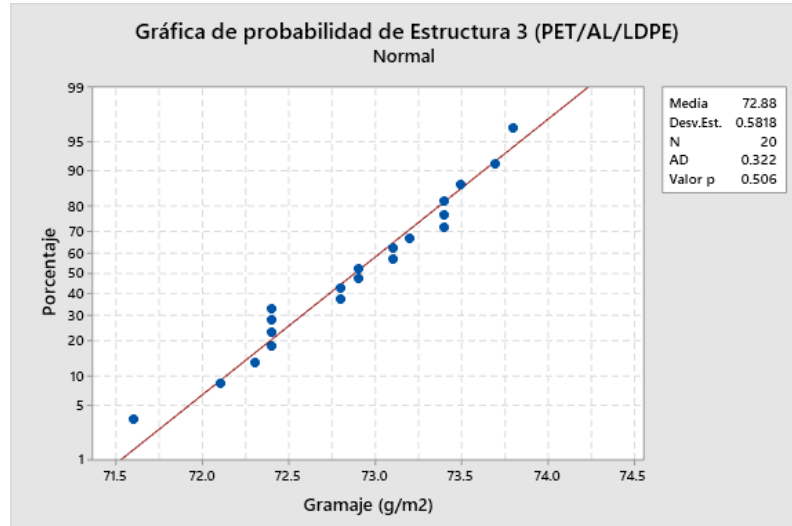


Figura 15: Prueba de normalidad - Gramaje de estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.506, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se

puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 0.5818 y la media 72.8. Los resultados fueron los siguientes:

a.3.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
20	72.880	0.582	0.130	(72.625, 73.135)

μ : media de PET/AL/LDPE
 Desviación estándar conocida = 0.5818

En la Figura 16 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/AL/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

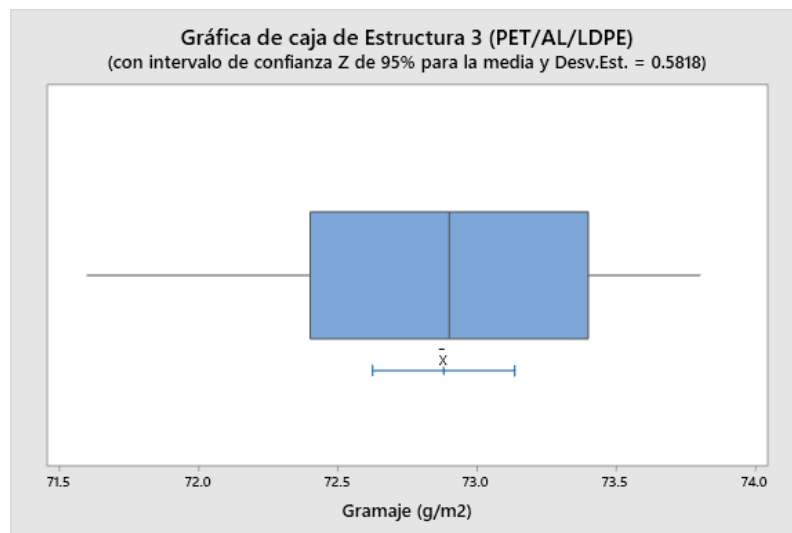


Figura 16: Gráfico de caja – Gramaje de estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media del gramaje de la estructura 3 (PET/AL/LDPE) es 72.8g/m² y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 72.6 y 73.1g/m² con una probabilidad del 95%.

Los resultados en los tres casos están dentro del rango de tolerancia de gramaje de $\pm 10\%$ por lo que esta evaluación resultó conforme.

4.2.2. FUERZA DE LAMINADO (gf/pulg)

La fuerza de laminado es la cantidad de fuerza o energía requerida para separar los sustratos que componen una estructura.

Los laminados se fabrican uniendo dos o más capas de un material o varios materiales. Por lo que el desempeño de la estructura a menudo depende de la capacidad de laminado para funcionar como una sola unidad. Si los materiales no se han unido correctamente, el desempeño de la estructura puede verse afectado negativamente (ASTM F 904 - 16).

En la Figura 17 se muestra un dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 el cual se usa para medir la fuerza de laminación.

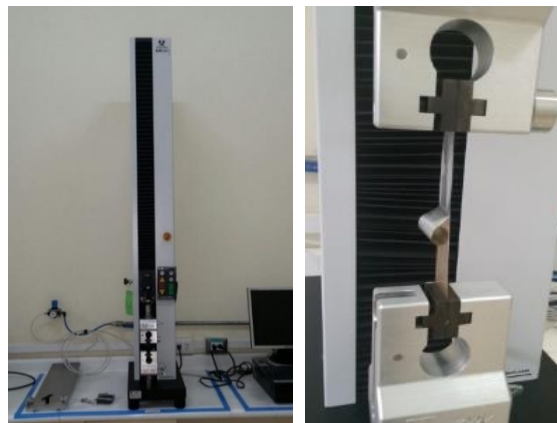


Figura 17: Dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 (Thwing Albert) (izquierda) y Evaluación de fuerza de laminado (derecha)

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

En la tabla 17 se muestra las especificaciones de fuerza de laminado entre los diferentes sustratos que componen las estructuras propuestas 1, 2 y 3. Los valores de fuerza de laminado varían de acuerdo al tipo de sustratos; por ejemplo, la fuerza de laminado entre PET y LDPE debe ser mayor o igual a 400gf/25.4mm, entre PET cristal y PET metalizado

mayor o igual a 150gf/25.4mm, entre PET cristal y aluminio mayor o igual a 300gf/25.4mm y entre aluminio y LDPE mayor o igual a 400gf/25.4mm.

Tabla 17: Especificación técnica de fuerza de laminado de estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE), estructura 2 (PET crista/PET metalizado/LDPE) y estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Estructuras	Zona de medición de fuerza de laminado	Método	Unidades	Especificación
Estructura 1	PET/LDPE-EVOH-LDPE	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400
Estructura 2	PET/PET	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥150
	PET/LDPE	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400
Estructura 3	PET/AL	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥300
	AL/LDPE	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400

b.1. Estructura 1. PET/ LDPE-EVOH-LDPE

En la Tabla 18 se muestra las especificaciones de fuerza de laminado entre los diferentes sustratos PET/LDPE-EVOH-LDPE.

Tabla 18: Resultados de fuerza de laminado de estructura 1 (PET/ LDPE-EVOH-LDPE)

Estructura	Especificación Fuerza laminado (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar
PET/LDPE-EVOH-LDPE	≥400	1	545	524	569	512	578	545.6	28.25
		2	503	524	591	532	549	539.8	33.06
		3	561	578	578	596	574	577.4	12.52
		4	505	535	549	587	578	550.8	33.17
		5	589	548	568	529	561	559.0	22.39
		6	547	583	564	557	536	557.4	17.78
		7	596	528	563	547	582	563.2	27.07
		8	516	581	539	581	598	563.0	34.12
		9	561	589	528	594	602	574.8	30.38
		10	519	548	569	532	581	549.8	25.55
							558.1	27.23	

En la Figura 18 se detalla los valores promedios obtenidos en el laminado de la estructura 1.

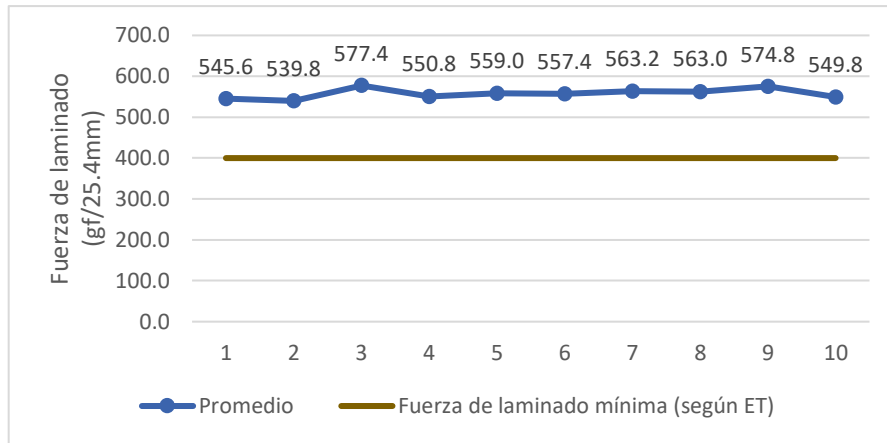


Figura 18: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)

El valor promedio de fuerza de laminado de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE) es 558.1gf/25.4mm por lo que supera el valor mínimo según la especificación de 400gf/25.4mm, resultando conforme.

b.2. Estructura 2. PET/PET/LDPE

En la Tabla 19 se muestra las especificaciones de fuerza de laminado entre los diferentes sustratos PET/PET-METALIZADO.

Tabla 19: Resultados de fuerza de laminado de estructura 2 (Poliéster – Poliéster metalizado)

Estructura	Especificación Fuerza laminado (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar
PET CRISTAL - PET METALIZADO	≥150	1	21	20	19	17	20	197.2	13.70
		2	0	1	8	4	3	183.0	14.27
			5	4	8	3	5		
		3	19	19	18	17	20	191.2	11.65
			2	6	5	6	7		
		4	18	19	18	20	19	194.0	8.09
			4	8	7	3	8		
5	19	18	19	17	18	187.6	8.56		
	5	9	6	6	2				
6	18	19	19	18	18	190.0	5.70		
	8	2	9	5	6				
7	17	18	18	17	18	181.0	7.18		
	6	7	9	2	1				

<<Continuación>>

	8	198	192	183	191	196	192.0	5.79
	9	188	186	195	197	185	190.2	5.45
	10	183	179	175	175	198	182.0	9.54
							188.8	10.01

En la Figura 19 se detalla los valores promedios obtenidos en el laminado de la estructura 2.

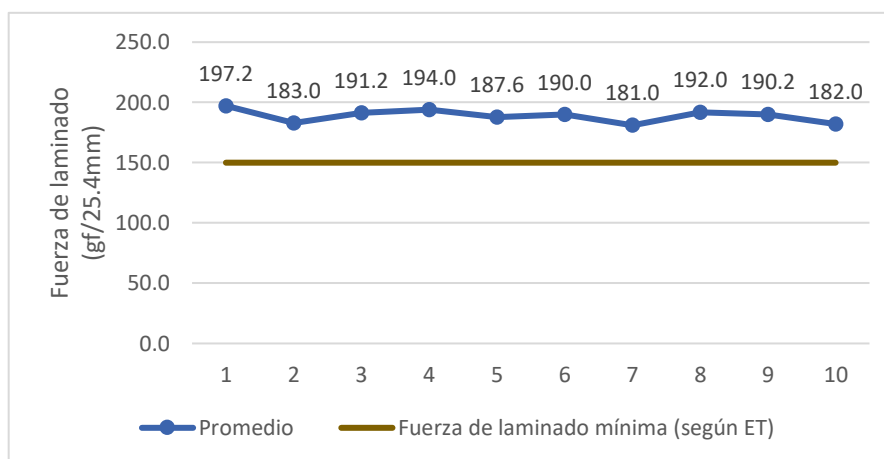


Figura 19: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 2 (PET/PET)

En la Tabla 20 se muestra las especificaciones de fuerza de laminado entre los diferentes sustratos PET/LDPE.

Tabla 20: Resultados de fuerza de laminado de estructura 2 (PET/LDPE)

Estructura	Especificación Fuerza laminado (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar
PET/LDPE	≥400	1	469	465	416	427	435	442.4	23.49
		2	428	435	422	462	459	441.2	18.24
		3	426	467	421	413	439	433.2	21.12
		4	441	437	459	452	449	447.6	8.76
		5	458	438	425	445	458	444.8	14.02
		6	438	429	462	437	429	439.0	13.55
		7	451	455	424	438	435	440.6	12.54
		8	435	482	429	445	413	440.8	25.79
		9	457	431	466	452	421	445.4	18.74
		10	428	434	438	457	461	443.6	14.57
							441.9	16.55	

En la Figura 20 se detalla los valores promedios obtenidos en el laminado de la estructura 2.

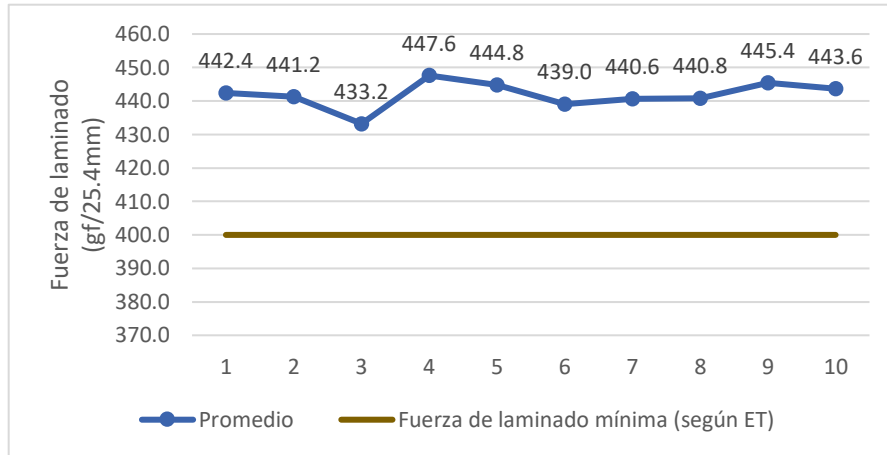


Figura 20: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 2 (PET/LDPE)

En la estructura 2 (PET/PET/LDPE), el valor promedio de fuerza de laminado entre los sustratos PET/PET es 188.8gf/25.4mm superando al valor mínimo según especificación de 150gf/25.4mm. Entre los sustratos PET/LDPE el valor promedio resultó 441.9gf/25.4mm que es mayor al valor mínimo según la especificación de 400gf/25.4mm, por lo que en ambos casos cumplen con la especificación, resultando conforme.

b.3. Estructura 3. PET/AL/LDPE

En la Tabla 21 se muestra las especificaciones de fuerza de laminado entre los diferentes sustratos PET/AL.

Tabla 21: Resultados de fuerza de laminado de estructura 3 (PET/AL)

Estructura	Especificación Fuerza laminado (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar
PET/AL	≥300	1	354	314	325	336	319	329.6	15.92
		2	345	348	367	359	325	348.8	15.94
		3	333	346	325	341	361	341.2	13.65
		4	326	319	342	349	335	334.2	12.03
		5	312	352	324	316	318	324.4	16.02
		6	337	329	336	334	322	331.6	6.19
		7	354	342	336	344	331	341.4	8.71
		8	349	325	319	323	337	330.6	12.28

<<Continuación>>

	9	323	326	325	331	342	329.4	7.64
	10	316	335	322	334	337	328.8	9.26
							334.0	13.19

En la Figura 21 se detalla los valores promedios obtenidos en el laminado de la estructura 3.

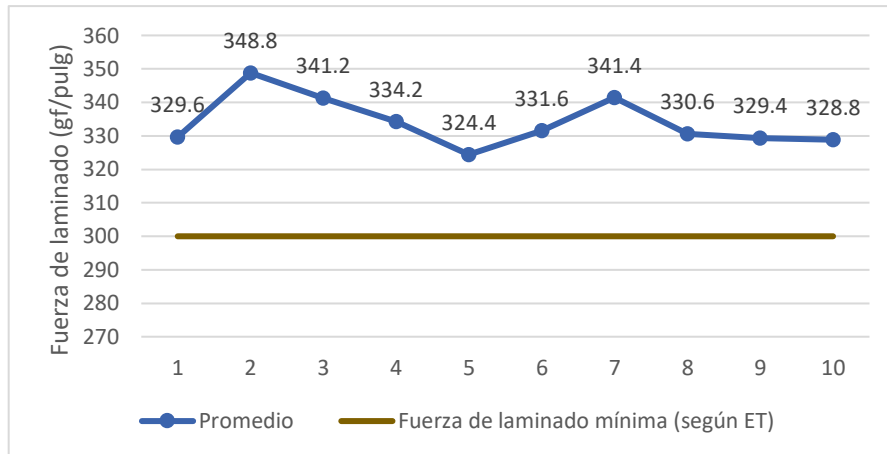


Figura 21: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 3 (PET/AL)

En la Tabla 22 se muestra las especificaciones de fuerza de laminado entre los diferentes sustratos AL/LDPE.

Tabla 22: Resultados de fuerza de laminado de estructura 3 (AL/LDPE)

Estructura	Especificación Fuerza laminado (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar
AL/LDPE	≥400	1	562	621	634	574	597	597.6	30.40
		2	547	521	610	625	583	577.2	43.20
		3	618	629	614	589	574	604.8	22.60
		4	642	658	639	644	637	644.0	8.28
		5	647	633	651	624	651	641.2	12.13
		6	634	653	629	635	614	633.0	13.98
		7	635	652	642	634	622	637.0	11.05
		8	597	589	569	604	618	595.4	18.20
		9	625	587	568	556	612	589.6	28.97
		10	598	623	547	529	563	572.0	38.18
							609.2	34.82	

En la Figura 22 se detalla los valores promedios obtenidos en el laminado de la estructura 3.

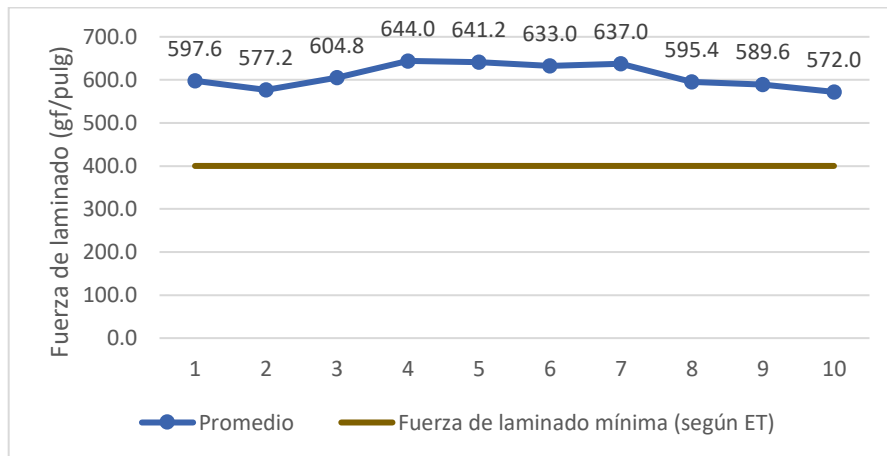


Figura 22: Valores promedio de fuerzas de laminado estructura 3 (AL/LDPE)

En la estructura 3 (PET/AL/LDPE), el valor promedio de fuerza de laminado entre los sustratos PET/AL es 334gf/25.4mm superando al valor mínimo según especificación de 300gf/25.4mm. Entre los sustratos AL/LDPE el valor promedio resultó 609.2gf/25.4mm que es mayor al valor mínimo según la especificación de 400gf/25.4mm, por lo que en ambos casos cumplen con la especificación, resultando conforme.

4.2.3. FUERZA DE SELLO

La fuerza de sello es la fuerza promedio por unidad de ancho de sello requerida para separar progresivamente un material flexible de un material rígido u otro material flexible, bajo condiciones de la prueba (ASTM F-88/F88M – 15).

La fuerza de sello está relacionada directamente con la hermeticidad y resistencia de la estructura a someterse a esfuerzos mecánicos, los sellos en un empaque nos permiten generar una zona hermética para el producto evitando de esta manera su contaminación, una buena hermeticidad en el empaque influye directamente sobre la función de barrera que aportan los materiales que componen la estructura.

La fuerza de sello no solo es relevante para la fuerza de apertura y la integridad del paquete, sino también para medir la capacidad de los procesos de empaque de producir sellos consistentes. La resistencia del sello a un nivel mínimo es un requisito del paquete necesario, y en ocasiones es deseable limitar la fuerza de sello para facilitar la apertura (ASTM F-88/F88M – 15).

En la Figura 23 se muestra un dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 el cual se usa para medir la fuerza de sellado.



Figura 23: Dinamómetro universal EJA Vantage 225-52215 (Thwing Albert)

FUENTE: Trupal (2016)

c.1. Estructura 1. PET/LDPE-EVOH-LDPE

En la Tabla 23 se muestra las especificaciones de fuerza de sello entre los diferentes sustratos PET/LDPE-EVOH-LDPE.

Tabla 23: Resultados de fuerza de sello de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)

Características	Fuerza de sello estándar (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar

<<Continuación>>

Fuerza de sello LDPE-LDPE	≥2000	1	285 5	293 6	288 4	304 7	276 1	2896.6	105.41
		2	267 9	271 2	276 1	295 3	266 3	2753.6	117.60
		3	275 4	264 4	271 7	281 8	258 6	2703.8	91.09
		4	285 8	271 6	284 3	277 7	297 4	2833.6	96.73
		5	293 5	275 1	285 4	305 5	287 3	2893.6	111.91
		6	305 5	284 8	293 5	294 1	292 7	2941.2	73.95
		7	282 4	285 8	283 4	282 1	277 5	2822.4	30.22
		8	285 1	294 9	275 8	290 5	285 5	2863.6	71.40
		9	294 9	294 5	296 7	298 1	273 8	2916.0	100.55
		10	273 2	263 8	257 6	287 5	274 7	2713.6	114.19

Se realizó una prueba de normalidad Anderson - Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

c.1.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable fuerza de sello de la estructura 1 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

H_1 : La variable fuerza de sello de la estructura 1 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 24 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/LDPE.

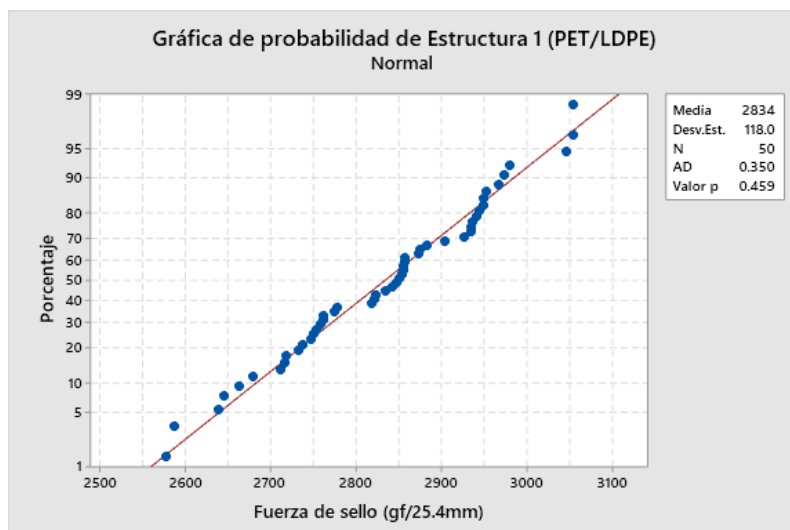


Figura 24: Prueba de normalidad - Fuerza de sello de estructura 1 (PET/LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.459, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 118 y la media 2834. Los resultados fueron los siguientes:

c.1.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
50	2833.8	118.0	16.7	(2801.1; 2866.5)

μ : media de PET/LDPE
Desviación estándar conocida = 118

En la Figura 25 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

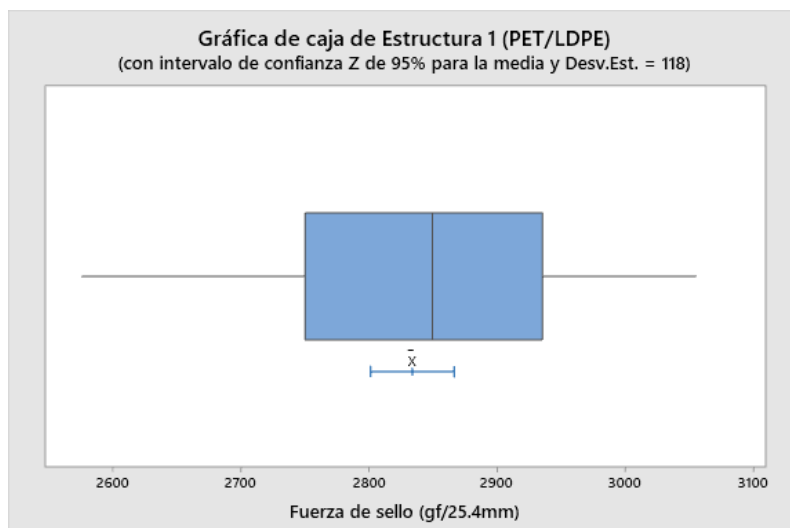


Figura 25: Gráfico de caja - Fuerza de sello de estructura 1 (PET/LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media de la fuerza de sello de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE) es 2833.8gf/25.4mm y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 2801.1 y 2866.5 gf/25.4mm con una probabilidad del 95%.

c.2. Estructura 2. PET/PET/LDPE

En la Tabla 24 se muestra las especificaciones de fuerza de sello entre los diferentes sustratos PET/PET/LDPE.

Tabla 24: Resultados de fuerza de laminado de estructura 2 (PET/PET/LDPE)

Características	Fuerza de sello estándar (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar
Fuerza de sello LDPE-LDPE	≥2000	1	2707	2601	2708	2829	2735	2716.0	81.39
		2	2649	2842	2831	2796	2711	2765.8	83.09
		3	2921	2818	2954	2703	2655	2810.2	130.95
		4	2829	2881	2826	2924	2993	2890.6	70.11
		5	2819	2823	2918	3014	3007	2916.2	94.80

<<Continuación>>

6	3045	2704	2811	2829	2906	2859.0	126.52
7	2753	2738	2519	2910	2642	2712.4	144.66
8	2934	3025	2851	2796	2921	2905.4	87.02
9	2708	2754	2851	2902	2597	2762.4	120.13
10	2885	2829	2744	2945	2618	2804.2	127.73

Se realizó una prueba de normalidad Anderson - Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

c.2.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable fuerza de sello de la estructura 2 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

H_1 : La variable fuerza de sello de la estructura 2 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 26 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/PET/LDPE.

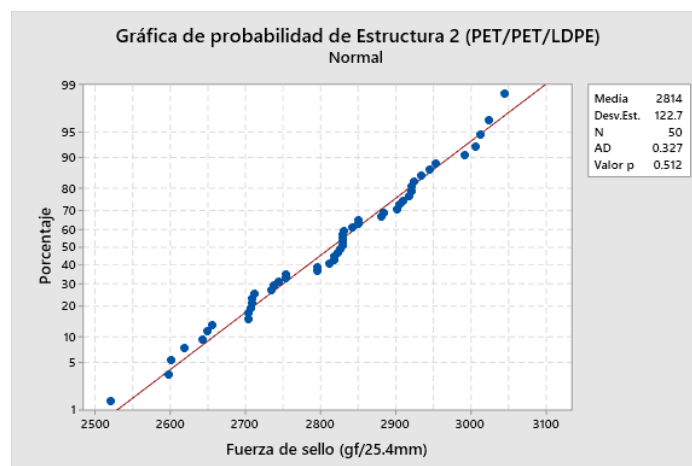


Figura 26: Prueba de normalidad - Fuerza de sello de estructura 2 (PET/PET/LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.512, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 122.7 y la media 2814. Los resultados fueron los siguientes:

c.2.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
50	2814.2	122.7	17.4	(2780.2; 2848.2)

μ : media de PET/PET/LDPE
Desviación estándar conocida = 122.7

En la Figura 27 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/PET/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

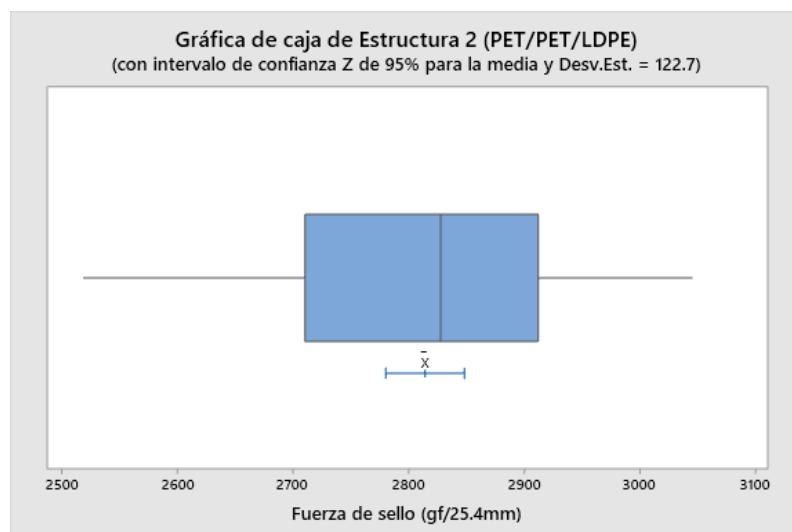


Figura 27: Gráfico de caja - Fuerza de sello de estructura 2 (PET/PET/LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media de la fuerza de sello de la estructura 2 (PET/PET/LDPE) es 2814.2gf/25.4mm y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 2780.2 y 2848.2gf/25.4mm con una probabilidad del 95%.

c.3. Estructura 3. PET/AL/LDPE

En la Tabla 25 se muestra las especificaciones de fuerza de sello entre los diferentes sustratos PET/AL/LDPE.

Tabla 25: Resultados de fuerza de sello de estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Características	Fuerza de sello estándar (gf/25.4mm)	Probetas	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio	Desviación estándar
Fuerza de sello LDPE-LDPE	≥2000	1	2934	2795	2773	2841	2846	2837.8	61.97
		2	2856	2859	2742	2857	2765	2815.8	57.46
		3	2748	2926	2961	2851	2976	2892.4	94.06
		4	2691	2946	2853	2916	2758	2832.8	107.06
		5	2862	2759	2875	2872	2957	2865.0	70.46
		6	2849	2817	2873	2738	2953	2846.0	78.57
		7	2891	2934	2965	2688	2937	2883.0	112.17
		8	2855	2867	2773	2907	2848	2850.0	48.72
		9	2987	2843	2894	2852	2941	2903.4	60.79
		10	2879	2995	2966	2804	2835	2895.8	82.42

Se realizó una prueba de normalidad Anderson - Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

c.3.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable fuerza de sello de la estructura 3 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

H_1 : La variable fuerza de sello de la estructura 3 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 28 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/AL/LDPE.

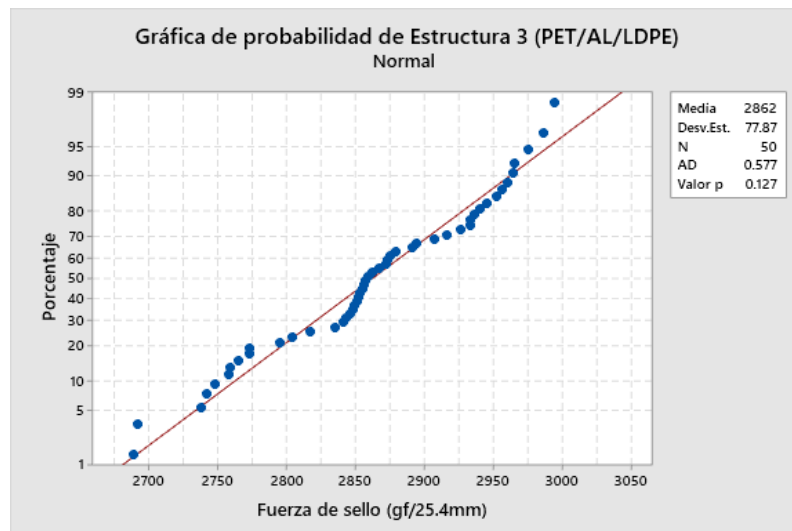


Figura 28: Prueba de normalidad - Fuerza de sello de estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.127, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 77.87 y la media 2862. Los resultados fueron los siguientes:

c.3.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
50	2862.2	77.9	11.0	(2840.6; 2883.8)

μ : media de PET/AL/LDPE

Desviación estándar conocida = 77.87

En la Figura 29 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/AL/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

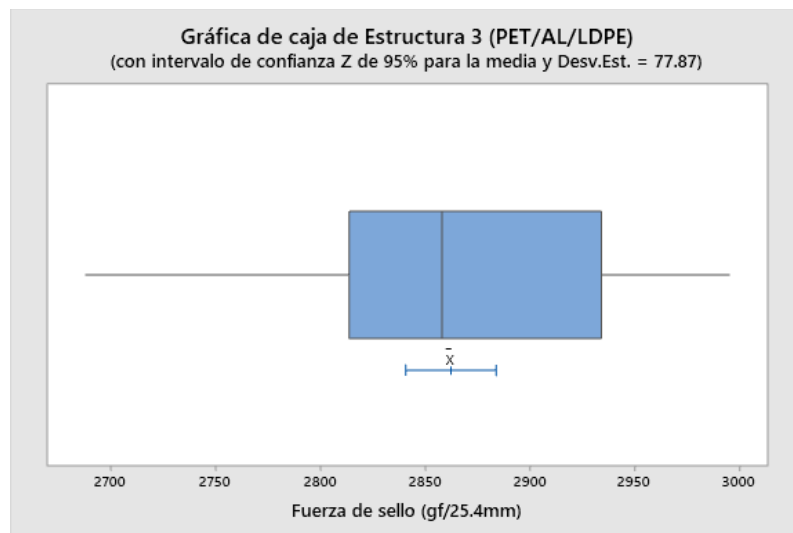


Figura 29: Gráfico de caja - Fuerza de sello de estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media de la fuerza de sello de la estructura 3 (PET/AL/LDPE) es 2862.2gf/25.4mm y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 2840.6 y 2883.8gf/25.4mm con una probabilidad del 95%.

Los valores de fuerza de sello de las tres estructuras propuestas cumplen con la especificación técnica de mayor o igual a 2000gf/25.4mm por lo que se considera conforme.

4.2.4. RATIO DE TRANSMISIÓN DE OXÍGENO (OTR)

El oxígeno afecta negativamente la vida útil de muchos alimentos al provocar oxidación, crecimiento de bacterias y otros cambios en la calidad. Para proteger la calidad del producto, se utilizan materiales de embalaje de barrera al oxígeno. En consecuencia, la medición precisa de la tasa de transmisión de oxígeno (OTR) es importante al evaluar las propiedades de barrera al oxígeno durante la selección de materiales de embalaje (Gu, 2017).

Los resultados que se muestran a continuación fueron calculados a partir de los datos que se muestran en el anexo 1.

d.1. Estructura 1. PET/LDPE-EVOH-LDPE

Se realizó una prueba de normalidad Anderson - Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

d.1.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 1 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

H_1 : La variable ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 1 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 30 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/LDPE-EVOH-LDPE.

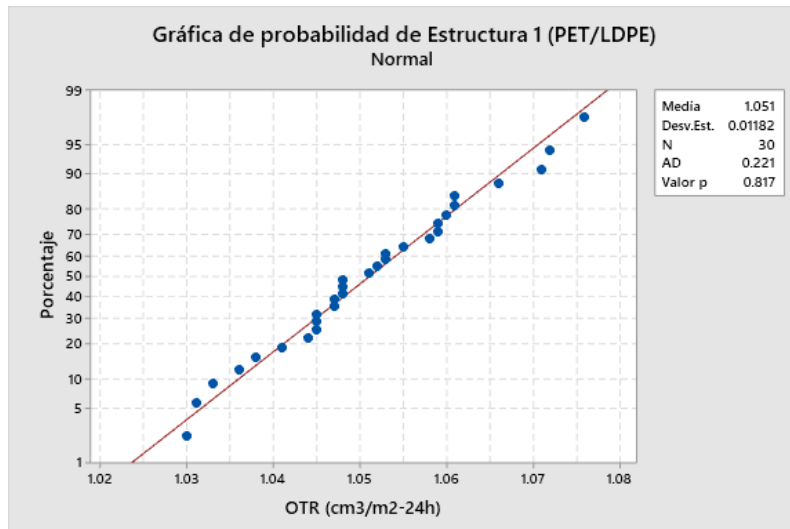


Figura 30: Prueba de normalidad – Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.817, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 0.01182 y la media $1.051\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-}24\text{h}$. Los resultados fueron los siguientes:

d.1.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
30	1.05110	0.01182	0.00216	(1.04687, 1.05533)

μ : media de Estructura 1 (PET/LDPE)
Desviación estándar conocida = 0.01182

En la Figura 31 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/LDPE-EVOH-LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

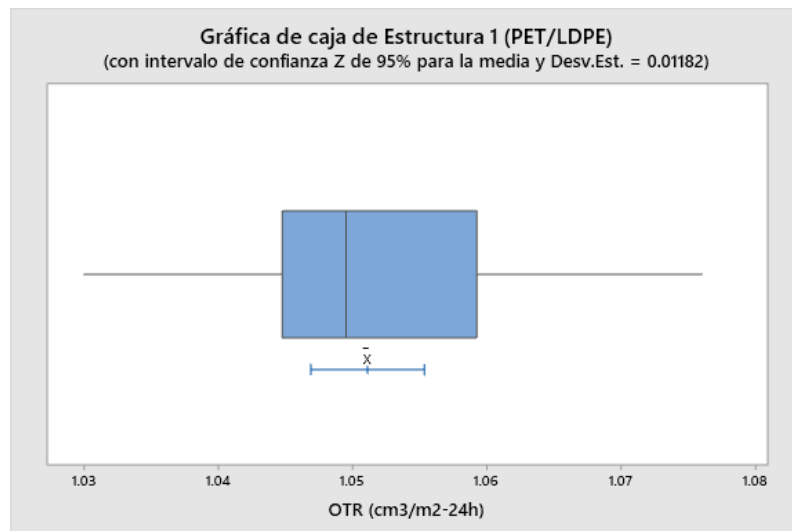


Figura 31: Gráfico de caja - Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media del ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 1 (PET/LDPE-EVPH-LDPE) es $1.0511 \text{ cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$ y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 1.04687 y $1.05533 \text{ cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$ con una probabilidad del 95%.

d.2. Estructura 2. PET cristal/PET metalizado/LDPE

Se realizó una prueba de normalidad Anderson – Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

d.2.1. Prueba de hipótesis

H_0 : La variable ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 2 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$

H_1 : La variable ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 2 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 32 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/PET/LDPE.

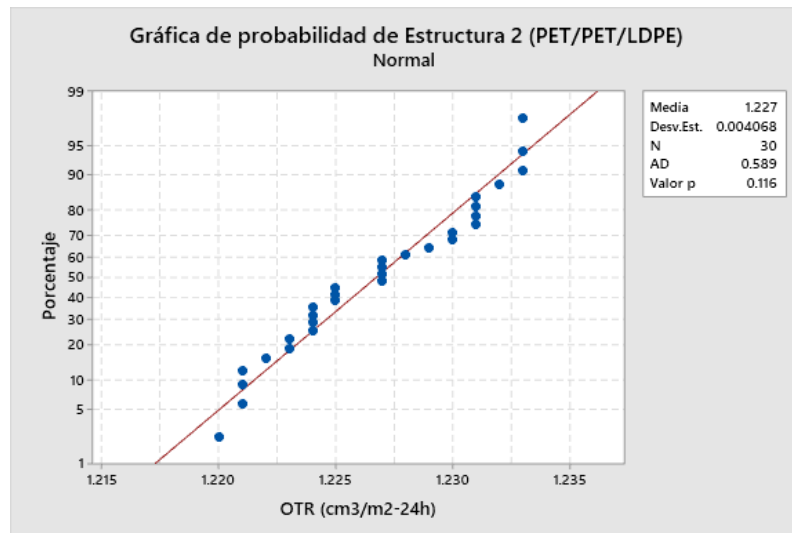


Figura 32: Prueba de normalidad – Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 2 (PET/PET/LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.116, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, por lo que se puede afirmar que no se puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 0.004068 y la media $1.227\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$. Los resultados fueron los siguientes:

d.2.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
30	1.22673	0.00407	0.00074	(1.22528, 1.22819)

μ : media de Estructura 2 (PET/PET/LDPE)
Desviación estándar conocida = 0.004068

En la Figura 33 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/PET/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

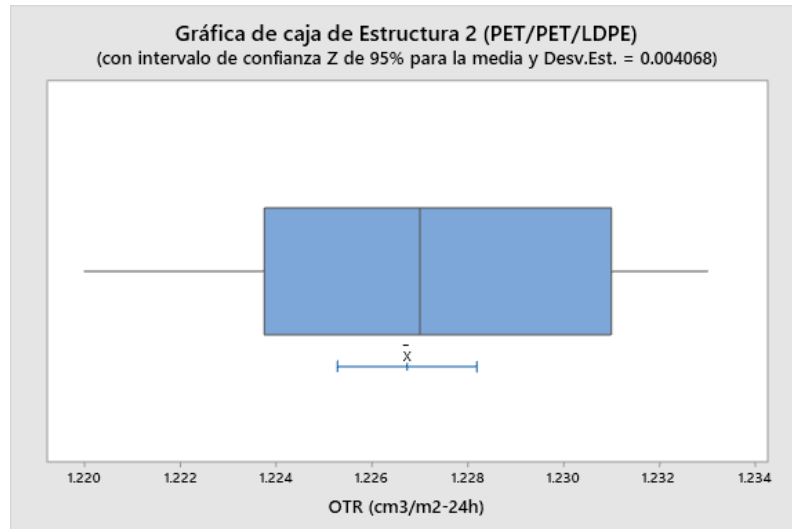


Figura 33: Gráfico de caja - Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 2 (PET/PET/LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media del ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 2 (PET/PET/LDPE) es 1.22673cm³/m²-24h y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 1.22528 y 1.22819cm³/m²-24h con una probabilidad del 95%.

d.3. Estructura 3. PET/AL/LDPE

Se realizó una prueba de normalidad Anderson – Darling utilizando el paquete estadístico Minitab 19 y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con el fin de evaluar si los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal.

d.3.1. Prueba de hipótesis

H₀: La variable ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 3 se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$

H₁: La variable ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 3 no se ajusta a una distribución normal con un $\alpha=0.05$.

Como se puede observar, en la Figura 34 se detalla la prueba de normalidad Anderson – Darling en la estructura PET/AL/LDPE.

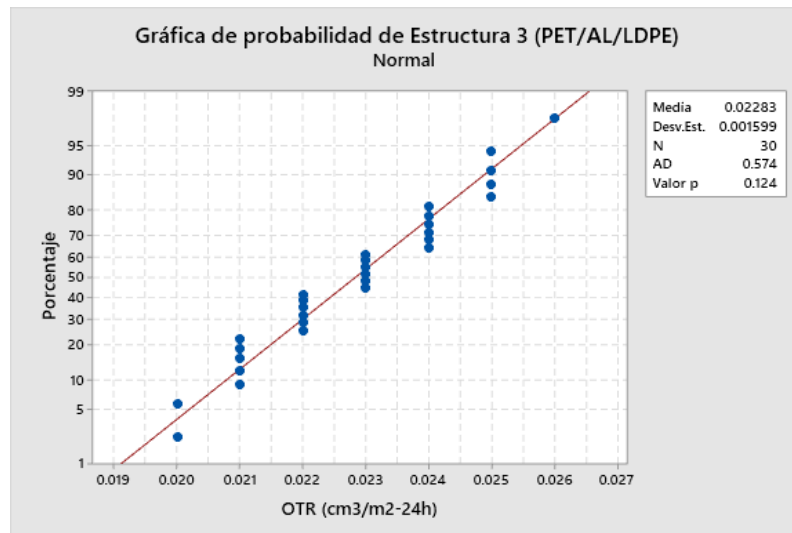


Figura 34: Prueba de normalidad – Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis nula indica que los datos siguen una distribución normal. De acuerdo a los resultados se observa que el valor p es 0.124, este valor es mayor que el nivel de significancia 0.05, se puede afirmar que no se puede rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Se procedió a hallar el intervalo de confianza considerando los resultados obtenidos. Se consideró la desviación estándar 0.001599 y la media 0.02283cm³/m²-24h. Los resultados fueron los siguientes:

d.3.2. Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
30	0.022833	0.001599	0.000292	(0.022261, 0.023406)

μ : media de Estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Desviación estándar conocida = 0.001599

En la Figura 35 se detalla la gráfica de caja de la estructura PET/AL/LDPE que nos ayuda a identificar datos interesantes.

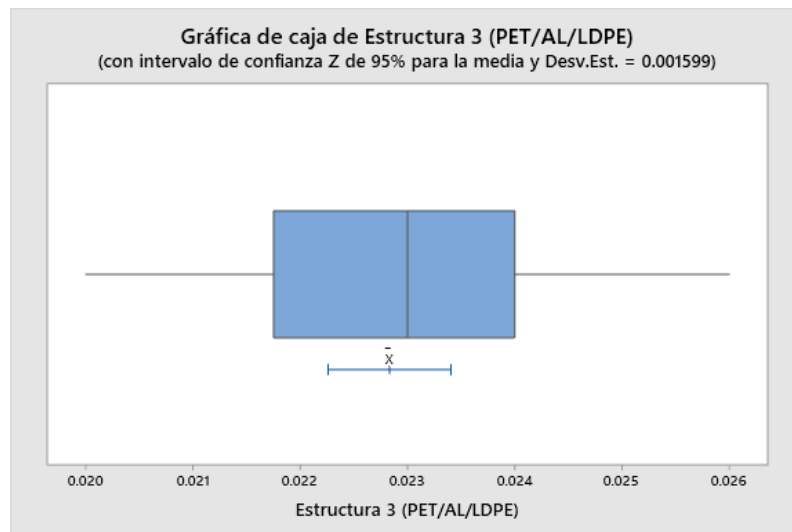


Figura 35: Gráfico de caja - Ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 3 (PET/AL/LDPE)

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la estimación de la media del ratio de transmisión de oxígeno de la estructura 3 (PET/AL/LDPE) es $0.022833\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$ y que el valor de la media se encuentra en el intervalo de 0.022261 y $0.023406\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-24h}$ con una probabilidad del 95%.

En los tres casos se cumple con la especificación de ratio de transmisión de oxígeno correspondiente a cada estructura, por lo que estarían aprobadas para esta evaluación.

4.2.5. MICROSCOPIA DE ESTRUCTURAS

La microscopía se utiliza para determinar el número de capas y espesores en una película flexible. Además de determinar la estructura de muestras de películas desconocidas, es muy útil para el control de calidad de los espesores de capa durante la producción de películas coextruidas. La microscopía también se puede utilizar para determinar si las capas contienen mezclas con cargas minerales u otros polímeros (Morris, 2016).

Generalmente, la microscopía óptica es suficiente, aunque la microscopía electrónica de barrido y la microscopía electrónica de transmisión se utilizan a veces si se trata de capas muy delgadas. En la práctica, el límite de resolución de un microscopio óptico es de aproximadamente $0,2\mu\text{m}$ (Morris, 2016).

En la Figura 36 se observa el microscopio óptico Leica DM 750M el cual se usa para visualizar si las capas tienen minerales u otros polímeros.



Figura 36: Microscopio óptico Leica DM 750M

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

En la Figura 37 se muestra la microfotografía de la estructura 1 (PET/LDPE-EVOH-LDPE) donde de izquierda a derecha se encuentra el poliéster cristal, seguido del polietileno de baja densidad coextruido con EVOH.

Según lo mencionado por Morris (2016) la tinción se puede utilizar para ayudar a mejorar el contraste entre capas y hacer una identificación preliminar del tipo de material. Un tinte de uso común es la tintura de yodo, que tiñe el etilen vinil alcohol (EVOH) de color marrón oscuro y la poliamida 6 (PA6) de color marrón claro. En la Figura 37 se puede confirmar la presencia de EVOH en la parte central por la coloración marrón que se observa.

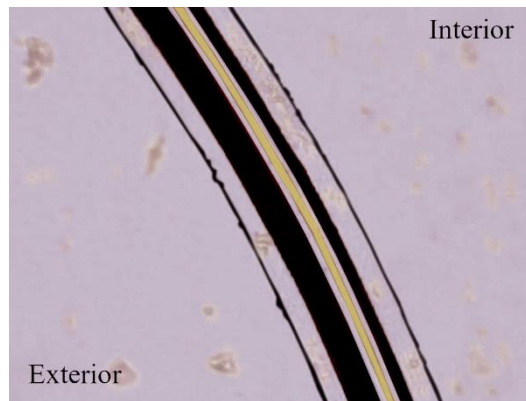


Figura 37: Micrografía de estructura 1 (PET/ LDPE-EVOH-LDPE)

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

En la Figura 38 se observa de la zona exterior a la interior PET cristal, PET metalizado y polietileno de baja densidad (LDPE).

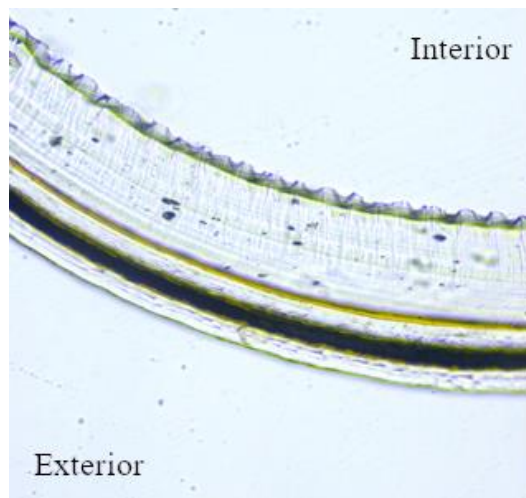


Figura 3: Micrografía de estructura 2 (Poliéster – Poliéster metalizado - Polietileno)

FUENTE: Trupal S.A. (2016)

En la Figura 39 se observa de la zona exterior a la interior PET cristal, aluminio y polietileno de baja densidad (LDPE).

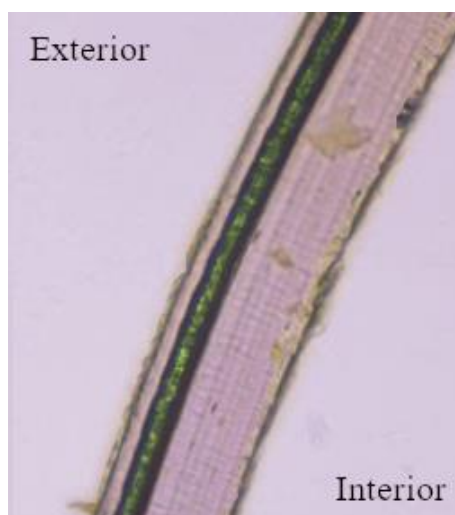


Figura 4: Micrografía de estructura 3 (Poliéster – Aluminio - Polietileno)

FUENTE: Trupal S.A.

4.3. EVALUACIONES EXTERNAS

Las evaluaciones externas las realizó el cliente con participación de personal de Trupal S.A., con el fin de observar la funcionalidad de la lámina, además se realizaron pruebas de transporte y tiempo de vida útil.

a. Pruebas en el proceso productivo

El envasado de leche entera en polvo se realizó usando las tres estructuras en prueba y la estructura convencional. En el cuadro se detallan las condiciones de proceso durante el envasado:

En la Tabla 26 se detalla las condiciones en las cuales se realizaron las pruebas en el proceso.

Tabla 26. Condiciones de proceso durante el envasado de leche en polvo

Temperatura sellado vertical (°C)	125
Temperatura sellado horizontal (°C)	180
Velocidad de máquina (unidad/minuto)	27

Posterior al envasado se realizaron las siguientes pruebas a los empaques con producto:

a.1. Inspección visual

Las muestras son evaluadas en una zona de luz blanca con el fin de evidenciar delaminado, fractura del aluminio (zonas traslucidas en la lámina) e integridad de los sellos.

a.2. Prueba de cámara de vacío

Las muestras son sometidas a una presión de -0.4bar por 5 minutos y sumergidos en agua. El indicador de pérdida de hermeticidad es el burbujeo de aire que se puede generar por fugas al someter al empaque a vacío.

a.3. Prueba de Eritrosina

El método de penetración de solución coloreada está basado en la capacidad de una solución de baja tensión superficial (eritrosina al 0,15%) para penetrar a través de pequeñas fallas y microporos de la estructura (Marangoni et al., 2018).

La solución coloreada se aplicó al interior de las zonas de sello y se mantuvo en posición vertical durante 24 horas, sobre papel blanco, posteriormente se evaluaron las manchas en el papel para detectar fugas, y la zona exterior de los sellos con el fin de detectar filtraciones de la solución.

En la Tabla 27 se detalla los resultados de las evaluaciones de los empaques una vez realizado el envasado.

Tabla 27. Resultados de las evaluaciones realizadas a los empaques después del envasado

EVALUACIÓN	Convencional	Estructura 1 (PET/LDPE- EVOH-LDPE)	Estructura 2 (PET/PET/LDPE)	Estructura 3 (PET/AL/LDPE)
Inspección visual de sello longitudinal y transversal	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
Hermeticidad en cámara de vacío a - 0.45bar por 5 minutos, sumergido en agua	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme
Integridad de sello con eritrosina	Conforme	Conforme	Conforme	Conforme

Según el informe enviado por el cliente, el comportamiento de las muestras durante el proceso de envasado y las pruebas posteriores resultaron conformes para las tres estructuras propuestas.

b. Prueba de transporte

Cuando el envase es transportado de una región geográficamente baja a una alta, la presión externa al envase es menor a la interna, es decir, existe un diferencial de presión positivo. En este caso, el envase tenderá a inflarse, teniendo efectos de abombamiento. En cuanto a los envases flexibles, el incremento de la presión interna puede aplicar una fuerza excesiva sobre los sellos, debilitándolos o (en algunas ocasiones) venciéndolos, lo que redundará en la apertura del envase (Rodríguez, 2010).

La prueba de transporte se realiza con el fin de someter los empaques a condiciones de estrés mecánico y variación de presión, temperatura y humedad durante el traslado de las muestras

desde la planta del cliente hacia el departamento de Junín, con el objetivo de evaluar si los empaques soportan de manera óptima estas condiciones.

En la Tabla 28 se detalla las pruebas de transporte realizado de Lima – Huancayo del empaque de leche en polvo.

Tabla 28. Prueba de transporte Lima – Huancayo de empaques de leche en polvo

CARACTERÍSTICAS	DETALLE
PUNTO DE INICIO	Lima
PUNTO DE DESTINO	Junín
KMS RECORRIDOS	400km
PUNTO DE MAYOR ALTURA	4818msnm – Ticlio
TIPO DE TRANSPORTE	Ida y vuelta
TIEMPO DE VIAJE	12 horas aprox.

En la Tabla 29 se presenta los resultados obtenidos después de la prueba de transporte del empaque de leche en polvo.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos durante la evaluación:

Tabla 29. Resultados de prueba de transporte

Defectos	Estructura convencional (BOPP/AL/LDPE)		Estructura 1 (PET/LDPE)		Estructura 2 (PET/PET/LDPE)		Estructura 3 (PET/AL/LDPE)	
	Unid	%	Unid	%	Unid	%	Unid	%
Pérdida de hermeticidad	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Empaque con piquete	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
No conforme	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Conforme	96	100.00	96	100.00	96	100.00	96	100.00
TOTAL	96	100	96	100	96	100	96	100

El cliente indicó que se realizó la inspección al 100 por ciento de las muestras a su retorno y no se detectaron envases con pérdida de hermeticidad.

En reunión con el cliente, nos informaron que las tres estructuras resultaron aprobadas en las pruebas de envasado y transporte. A partir de esta información, la estructura 1 (PET/LDPE) y estructura 2 (PET/PET/LDPE) se consideraron como alternativas en caso más adelante se decidiera continuar con estos desarrollos de estructuras, siendo la estructura 3 (PET/AL/LDPE) la que se seleccionó para continuar el desarrollo, porque representaba mayor reducción de costo, mejores especificaciones de fuerza de laminado y los niveles de barrera al oxígeno eran más próximos a los de la estructura convencional.

Para complementar los resultados de barrera al oxígeno de la estructura 3 (PET/AL/LDPE), se procedió a realizar una evaluación de tiempo de vida útil en un laboratorio externo con el fin de confirmar que la estructura cumplía con el tiempo de vida útil requerido.

c. Prueba de tiempo de vida útil

El tiempo durante el cual las características del producto se mantienen como fueron proyectados por el fabricante. El producto es consumible o usable durante este periodo, brindándole al usuario final las características, desempeño, seguridad y beneficios sensoriales esperados (ASTM E2454 - 05).

Se realizó un estudio de tiempo de vida acelerado en un laboratorio externo mediante la metodología acelerada a condiciones de almacenamiento controladas. Utilizando la temperatura y humedad relativa máximos a las que el producto podría estar expuesto en condiciones normales.

En la Tabla 30 se detalla las condiciones que se opta para un estudio de tiempo de vida acelerado.

Tabla 30. Condiciones de estudio de tiempo de vida acelerado (laboratorio externo)

CARACTERÍSTICAS	DETALLE
TIEMPO DE ESTUDIO	57 días
DÍAS DE ESTUDIO	0, 5, 10, 15, 22, 29, 36, 43, 50, 57 días
TEMPERATURA DE ENSAYO	35°C
HUMEDAD RELATIVA DE ENSAYO	85, 93 y 100%
EVALUACIONES INICIALES	Porcentaje de humedad Porcentaje de acidez Análisis sensorial
EVALUACIONES DURANTE EL ENSAYO	Porcentaje de humedad Análisis sensorial Microbiológicas (Aerobios mesófilos, coliformes y Salmonella)

Se estimó que el tiempo de vida útil de la leche entera en polvo en condiciones de almacenamiento de temperatura 35°C y humedad relativa 80 por ciento es de 400 días (13.3 meses).

Considerando que el tiempo de vida útil del producto con el empaque que usa actualmente se considera 11 meses, el empaque aprobado cumple con este requerimiento.

V. CONCLUSIONES

1. La estructura que resultó aprobada fue la estructura 3 (PET/AL/LDPE) considerando que representaba mayor reducción de costo, mejores especificaciones de fuerza de laminado y ratio de transmisión de oxígeno frente a las otras estructuras propuestas.
2. Los valores promedio de gramaje fueron estructura 1 (PET/LDPE) 101.5g/m^2 , estructura 2 (PET/PET/LDPE) 81.2g/m^2 y estructura 3 (PET/AL/LDPE) 72.9g/m^2 .
3. Los valores promedio de fuerza de laminado fueron estructura 1 (PET/LDPE) $558.1\text{gf}/25.4\text{mm}$, estructura 2 (PET/PET) $188.8\text{gf}/25.4\text{mm}$, estructura 2 (PET/LDPE) $441.9\text{gf}/25.4\text{mm}$, estructura 3 (PET/AL) $334.0\text{gf}/25.4\text{mm}$ y estructura 3 (AL/LDPE) $609.2\text{gf}/25.4\text{mm}$.
4. Los valores promedio de fuerza de sello fueron estructura 1 (PET/LDPE) $2833.8\text{gf}/25.4\text{mm}$, estructura 2 (PET/PET/LDPE) $2814.2\text{gf}/25.4\text{mm}$ y estructura 3 (PET/AL/LDPE) $2862.2\text{gf}/25.4\text{mm}$.
5. Los valores promedio de ratio de transmisión de oxígeno fueron estructura 1 (PET/LDPE) $1.051\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-}24\text{h}$, estructura 2 (PET/PET/LDPE) $1.227\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-}24\text{h}$ y estructura 3 (PET/AL/LDPE) $0.023\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-}24\text{h}$.
6. La estructura 1 (PET/LDPE), estructura 2 (PET/PET/LDPE) y estructura 3 (PET/AL/LDPE) resultaron aprobadas a las pruebas de hermeticidad en el proceso productivo.
7. La estructura 1 (PET/LDPE), estructura 2 (PET/PET/LDPE) y estructura 3 (PET/AL/LDPE) resultaron aprobadas a la prueba de transporte.

VI. RECOMENDACIONES

- Se sugiere buscar reducir costos en los componentes de la estructura mediante la validación de materia prima de menor costo como el PET, aluminio y resinas de LDPE (polietileno de baja densidad), tintas y adhesivos que permitan reducir los costos de la estructura.
- Se sugiere realizar pruebas de tiempo de vida útil a la estructura 1 (PET/LDPE) y estructura 2 (PET/PET/LDPE) con el fin de definir si estas barreras cumplen con el tiempo de vida útil requerido por el producto.
- Se sugiere a partir del punto anterior continuar con la optimización de la estructura 1 (PET/LDPE) y estructura 2 (PET/PET/LDPE) con reducciones de espesor de manera que generen un mayor ahorro y pasen por el proceso de validación.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Ashter, S. (2016). Introduction to Bioplastics Engineering. Estados Unidos: William Andrew.
- American Society for Testing and Materials International. (2002). ASTM D3985 - 02, Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor. Estados Unidos, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials International. (2015). ASTM D4321 – 15, Standard Test Method for Package Yield of Plastic Film. Estados Unidos, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials International. (2005). ASTM E2454 – 05, Standard Guide for Sensory Evaluation Methods to Determine the Sensory Shelf Life of Consumer Products. Estados Unidos, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials International. (2015). ASTM F88 / F88M - 15, Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials. Estados Unidos, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials International. (2016). ASTM F904 - 16, Standard Test Method for Comparison of Bond Strength or Ply Adhesion of Similar Laminates Made from Flexible Materials. Estados Unidos, Pennsylvania.
- Bishop, C.A. (2010). Roll-to-Roll Vacuum Deposition of Barrier Coatings. Estados Unidos, New York: John Wiley & Sons.
- Boyens, K. (2015). A Flexible Films Guide: Various Choices for Food Packaging. Recuperado de <https://www.flexpackmag.com/articles/87269-a-flexible-films-guide-various-choices-for-food-packaging>
- Cheremisinoff, N. (2001). Condensed Encyclopedia of Polymer Engineering Terms. Estados Unidos, Boston: BH.
- Cheruvathur, R.J. (2009). The effect of bond strength of flexible laminates on puncture resistance (Tesis de maestría, Clemson University). Recuperada de https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1594&context=all_theses

- Comyn, J. (2012). *Polymer Permeability*. United Kingdom, London: Chapman & Hall.
- Dunn, T. (2014). *Manufacturing Flexible Packaging: Materials, Machinery, and Techniques*. United Kingdom: William Andrew.
- DOI: 10.1016/C2013-0-09950-1
- Ebnesajjad, S. (2012). *Plastic Films in Food Packaging: Materials, Technology and Applications*. Estados Unidos: William Andrew.
- Emblem, A; Emblem, H. (2012). *Packaging Technology: Fundamentals, materials and processes*. United Kingdom: Woodhead Publishing Limited.
- Flex Films. (2020). Technical Data Sheet FLEXMETPROTECTTM F-PCR-M. Recuperado de <https://www.flexfilm.com/pdf/Products/Metallized/BOPET/F-PCR-M.pdf>
- Hanlon, J. F., Kelsey, R. J., & Forcinio, H. (1998). *Handbook of Package Engineering*. (3^o ed.). Estados Unidos: CRC Press.
- Illanes, J. (2004). *Envases flexibles plásticos: Uso y aplicación en la industria alimentaria*. (Tesis para optar el grado de licenciado, Universidad Austral de Chile).
- Recuperada de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/fai.29e/pdf/fai.29e.pdf>
- Izdebska-Podsiadły, J; Thomas, S. (2015). *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*. Estados Unidos: William Andrew. DOI: 10.1016/C2014-0-02411-2
- Kuraray America, Inc. (2015). Technical Data Sheet EVALTM H171B. Recuperado de <http://www.evalevoh.com/media/62148/h171b.pdf>
- Marangoni Junior, L; Ito, D; Ribeiro, S.M.L.; Silva, M.G.; Alves, R.M.V. (2018). Stability of β -carotene rich sweet potato chips packed in different packaging systems. *LWT* 92:442-450. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.02.066.
- Mieth, A; Hoekstra, E; Simoneau, C. (2016). *Guidance for the identification of polymers in multilayer films used in food contact materials: User guide of selected practices to determine the nature of layers*. Publications Office of the European Union. Recuperado de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/12f4d00c-0203-11e6-b713-01aa75ed71a1/language-en>
- Morris, B.A. (2016). *The Science and Technology of Flexible Packaging: Multilayer Films from Resin and Process to End Use*. United Kingdom: William Andrew. DOI: 10.1016/C2013-0-00506-3
- Rodríguez, J.A. (2020). Métricas para predecir el efecto de la altitud en envases flexibles. Recuperado de <http://www.elempaque.com/temas/Metodo-IMPEE,-comportamiento-de-envases-flexibles-ante-cambios-de-altitud-durante-distribucion+4075345?pagina=1>.

- Robertson, G.L. (2009). *Food Packaging and Shelf Life*. Estados Unidos: CRC Press. DOI: 10.1201/9781420078459-C7
- Trupal S.A. (2015). *Figuras, tablas, documentos internos, especificaciones técnicas, otros*. Lima, Perú.
- Trupal S.A. (2016). *Figuras, tablas, documentos internos, especificaciones técnicas, otros*. Lima, Perú.
- Trupal S.A. (2019). *Figuras, tablas, documentos internos, especificaciones técnicas, otros*. Lima, Perú.
- Velásquez, F. (2019). *Revisión de propiedades mecánicas y especificaciones de materiales de empaques flexibles en el sector de alimentos*. (Tesis para optar el grado de ingeniería, Universidad de Antioquia). Recuperado de http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14899/1/VelasquezFelipe_2019_RevisionPropiedadesMecanicas.pdf
- Wagner Junior, J.R; Mount III, E.M; Giles Junior, H.F. (2013). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. Estados Unidos: William Andrew. DOI: 10.1016/C2010-0-67040-4
- Whelan, A; Whelan, T. (1994). *Polymer Technology Dictionary*. United Kingdom: Springer Science & Business Media. DOI: 10.1007/978-94-011-1292-5.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE RATIO DE TRANSMISIÓN DE OXIGENO (OTR) DE LAS ESTRUCTURAS PROPUESTAS.

Estructuras	PET/LDPE	PET/PET/LDPE	PET/AL/LDPE
OTR nominal (cc/m²-24h)	≤5	≤5	≤1
R1	1.038	1.231	0.021
R2	1.071	1.221	0.020
R3	1.051	1.220	0.022
R4	1.072	1.227	0.021
R5	1.030	1.231	0.023
R6	1.076	1.222	0.022
R7	1.048	1.221	0.022
R8	1.045	1.229	0.023
R9	1.036	1.221	0.021
R10	1.045	1.233	0.022
R11	1.048	1.231	0.024
R12	1.059	1.232	0.025
R13	1.031	1.227	0.024
R14	1.059	1.230	0.022
R15	1.066	1.227	0.023
R16	1.06	1.233	0.021
R17	1.058	1.225	0.024
R18	1.047	1.224	0.025
R19	1.055	1.230	0.020
R20	1.033	1.231	0.021
R21	1.041	1.233	0.024
R22	1.048	1.228	0.023
R23	1.053	1.223	0.024
R24	1.061	1.224	0.025
R25	1.053	1.223	0.026
R26	1.045	1.231	0.022
R27	1.061	1.224	0.024
R28	1.047	1.227	0.023

<<Continuación>>

R29	1.044	1.224	0.023
R30	1.052	1.233	0.025
Promedio	1.051	1.227	0.023
Desviación estándar	0.012	0.004	0.002

ANEXO 2: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE ESTRUCTURA 1 (PET/LDPE)



DIVISIÓN EMPAQUES FLEXIBLES

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

APLICACIÓN : ENVASADO DE LECHE EN POLVO
ESTRUCTURA : LAMINA PET/PEBD cx. EVOH

ESTRUCTURA

	SUSTRATO	TIPO	ESPESOR (µm)	GRAMAJE (g/m ²)
1	PET	TRANSPARENTE	12.0	16.8
2	TINTA	LAMINACIÓN		2.0
3	ADHESIVO	BICOMPONENTE		2.0
4	PEBD cx. EVOH	BLANCO NEGRO	90.0	79.2
TOTAL				100.0

PROPIEDADES

VARIABLES	MÉTODO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL			
Gramaje	TP-AC04-M002	g/m ²	100 ± 10%
COF cinético externo	ASTM D 1894	Adimensional	0.15 – 0.45
COF cinético interno	ASTM D 1894	Adimensional	0.08 – 0.25
Fuerza de laminado	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400
Fuerza de sello	TP-AC04-M016	gf/25.4mm	≥2000
DIMENSIONALES			
Ancho	TP-AC04-M009	mm	316 ± 2
Frecuencia	TP-AC04-M009	mm	170 ± 2
BARRERA			
Transmisión de oxígeno	ASTM D 3985	cc/m ² -24h	≤5
Transmisión de vapor de agua	ASTM F1249	g/m ² -24h	≤10

Las materias primas empleadas cumplen con los requisitos de las siguientes normas internacionales sobre materiales en contacto directo e indirecto con alimentos:

MATERIALES	NORMA
LAMINA DE POLIESTER	FDA 21 CFR 177.1630
POLIETILENO	FDA 21 CFR 177.1520
EVOH	FDA 21 CFR 177.1360
TINTAS	Resolución AP (89)1, 2.1 Metales y Metaloides
ADHESIVO	FDA 21 CFR 175.105

Referencias individuales que aplican a la presente especificación

Código	Descripción
MUESTRA 1	LAM PET/PEBD cx EVOH LECHE EN POLVO 120g (MUESTRA 1)

ANEXO 3: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE ESTRUCTURA 2 (PET/PET/LDPE)



DIVISIÓN EMPAQUES FLEXIBLES

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

APLICACIÓN : ENVASADO DE LECHE EN POLVO
ESTRUCTURA : LAMINA PET/PET/PEBD

ESTRUCTURA

	SUSTRATO	TIPO	ESPESOR (μm)	GRAMAJE (g/m ²)
1	PET	TRANSPARENTE	12.0	16.8
2	TINTA	LAMINACIÓN		2.0
3	ADHESIVO	BICOMPONENTE		2.0
4	PET	METALIZADO	12.0	16.8
5	ADHESIVO	BICOMPONENTE		2.0
6	PEBD	TRANSPARENTE	44.0	40.4
TOTAL				80.0

PROPIEDADES

VARIABLES	MÉTODO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL			
Gramaje	TP-AC04-M002	g/m ²	80 ± 10%
COF cinético externo	ASTM D 1894	Adimensional	0.15 – 0.45
COF cinético interno	ASTM D 1894	Adimensional	0.08 – 0.25
Fuerza de laminado 1 (PET – PET metal)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥150
Fuerza de laminado 2 (PET metal - PEBD)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400
Fuerza de sello	TP-AC04-M016	gf/25.4mm	≥2000
DIMENSIONALES			
Ancho	TP-AC04-M009	mm	316 ± 2
Frecuencia	TP-AC04-M009	mm	170 ± 2
BARRERA			
Transmisión de oxígeno	ASTM D 3985	cc/m ² -24h	≤5
Transmisión de vapor de agua	ASTM F1249	g/m ² -24h	≤1

Las materias primas empleadas cumplen con los requisitos de las siguientes normas internacionales sobre materiales en contacto directo e indirecto con alimentos:

MATERIALES	NORMA
LAMINA DE POLIESTER	FDA 21 CFR 177.1630
POLIETILENO	FDA 21 CFR 177.1520
TINTAS	Resolución AP (89)1, 2.1 Metales y Metaloides
ADHESIVO	FDA 21 CFR 175.105

Referencias individuales que aplican a la presente especificación

Código	Descripción
MUESTRA 2	LAM PET/PET/PEBD EVOH LECHE EN POLVO 120g (MUESTRA 2)

ANEXO 4: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE ESTRUCTURA 3 (PET/ALUMINIO/LDPE)



DIVISIÓN EMPAQUES FLEXIBLES

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

APLICACIÓN : ENVASADO DE LECHE EN POLVO
ESTRUCTURA : LAMINA PET/ALUMINIO/PEBD

ESTRUCTURA

	SUSTRATO	TIPO	ESPESOR (μm)	GRAMAJE (g/m ²)
1	PET	TRANSPARENTE	12.0	16.8
2	TINTA	LAMINACIÓN		2.0
3	ADHESIVO	BICOMPONENTE		2.0
4	ALUMINIO	TEMPLE O	8.0	21.6
5	ADHESIVO	BICOMPONENTE		2.0
6	PEBD	TRANSPARENTE	30.0	27.6
TOTAL				72.0

PROPIEDADES

VARIABLES	MÉTODO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL			
Gramaje	TP-AC04-M002	g/m ²	72 ± 10%
COF cinético externo	ASTM D 1894	Adimensional	0.15 – 0.45
COF cinético interno	ASTM D 1894	Adimensional	0.08 – 0.25
Fuerza de laminado 1 (PET-AL)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥300
Fuerza de laminado 2 (AL-PEBD)	TP-AC04-M015	gf/25.4mm	≥400
Fuerza de sello	TP-AC04-M016	gf/25.4mm	≥2000
DIMENSIONALES			
Ancho	TP-AC04-M009	mm	316 ± 2
Frecuencia	TP-AC04-M009	mm	170 ± 2
BARRERA			
Transmisión de oxígeno	ASTM D 3985	cc/m ² -24h	≤1
Transmisión de vapor de agua	ASTM F1249	g/m ² -24h	≤1

Las materias primas empleadas cumplen con los requisitos de las siguientes normas internacionales sobre materiales en contacto directo e indirecto con alimentos:

MATERIALES	NORMA
LAMINA DE POLIESTER	FDA 21 CFR 177.1630
FOIL ALUMINIO	FDA 21 CFR 178.3910
POLIETILENO	FDA 21 CFR 177.1520
TINTAS	Resolución AP (89)1, 2.1 Metales y Metaloides
ADHESIVO	FDA 21 CFR 175.105

Referencias individuales que aplican a la presente especificación	
Código	Descripción
MUESTRA 3	LAM PET/AL/PEBD EVOH LECHE EN POLVO 120g (MUESTRA 3)