

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

**TÍTULO:**

Diseño metodológico para reducir el desperdicio controlando las variables de  
aplicación del adhesivo

INGE-3130

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniera en Materiales**

Presentado por:

Génesis Fiorella Malagón Vera

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

Dedico este proyecto a mis padres y abuelos, Sarita, Rosquita, Ángela, Tata, a mi Mami María y, por último, a mi tío Freddy quien siempre apoyó todos mis sueños.

A todos los buenos amigos que he ganado a lo largo de esta carrera.

A mi mejor amiga, Taylor Swift, porque sus canciones me acompañaron a lo largo de la carrera.

Por último, a la Génesis de hace 5 años, que con mucho miedo sigue logrando cosas grandes.

## Agradecimientos

---

Gracias a Dios por permitirme finalizar una etapa importante en mi vida.

Gracias, mamá y papá por caminar conmigo en cada paso. A Sarah por ser una hermana excepcional y siempre tener las palabras que abrazan mis inseguridades.

A Jose, por tu amor, ayuda y motivación.

A Daniela, por ser una amiga incondicional. A Clara, Steven, David R, Ángel, Angie y todos los buenos amigos que he ganado a lo largo de estos años.

A Diego, Ma. Teresa, Jorge, Carlos, el equipo de Calidad y Producción de Cartorama por el apoyo desde el día 1.

Gracias al Laboratorio de Plásticos y a todos los maestros que abrieron mis ojos a un mundo de investigación y aprendizaje.

## Declaración Expresa

---

Yo Génesis Fiorella Malagón Vera acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mí innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 13 de Octubre del 2025.

---

Génesis Malagón Vera

## **Evaluadores**

---

**Julián Peña Estrella**

Profesor de Materia

---

**Demis Adriana Cabrera Alava**

Tutor de proyecto

## RESUMEN

Este proyecto se enfocó en mitigar el desperdicio controlable en la fabricación de cartón corrugado, ya que la cinética de gelatinización provoca un enlace deficiente entre papeles a altas velocidades de producción. La investigación se justifica por la necesidad de reducir los indicadores de desperdicio y mejorar el desempeño de materias primas mediante el control de variables químicas. Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron materias primas como almidón, hidróxido de sodio, bórax y resina. Se emplearon equipos de calorimetría diferencial de barrido (DSC), copa Stein Hall y prensas de compresión mecánica. Se realizaron ensayos de caracterización térmica para determinar la entalpía y punto gel, además se evaluaron láminas de flauta B y C bajo normas técnicas para medir peso básico, humedad y ensayos de resistencia mecánica de ECT, FCT y PAT que se ejecutaron siguiendo normativas ISO 536, TAPPI TIP 0304-14, TAPPI T 821 y TAPPI T 410.

Como resultado, se observó que V3 alcanzó un punto gel de 60,5°C, lo que permitió que el adhesivo llegue a su T de activación y complete la formación del enlace de adhesión entre los liners. En los ensayos mecánicos, V3 presentó la mayor integridad de unión entre láminas, superando a V1 y V2. Por otro lado, V2 registró una T de recristalización de 82,3 °C, lo que refleja un mayor grado de cristalinidad y una menor rapidez en la gelatinización durante el proceso de corrugado. La implementación de V3 permitió reducir 5 toneladas de desperdicio por delaminación, equivalente al 0,15 % del consumo total de papel, lo que se tradujo en un ahorro económico de \$11 165.

**Palabras Clave:** Almidón, DSC, Cartón Corrugado, Temperatura

## **ABSTRACT**

*This project aims to mitigate controllable waste from corrugated cardboard production, addressing the bonding deficiency between papers caused by low gelatinization kinetics at high production speeds. It's justified by the necessity of reducing waste KPI's and optimizing raw material performance through the precise control of chemical variables.*

*Methodology involves starch, sodium hydroxide, borax, and ketonic resin as raw materials. Analytical techniques included Differential Scanning Calorimetry (DSC), the Stein – Hall method, and mechanical compression testing. Thermal characterization was performed to determine enthalpy and gel point, while flute B and C sheets were evaluated for basis weight, moisture content, and mechanical strength (ECT, FCT, PAT) according to standardized laboratory protocols.*

*Results point that the V3 formula reached its gel point at 60.5°C, enabling fast activation of the adhesive and ensuring effective formation of the green bond at the liners interface. V3 exhibited the highest bond integrity between sheets of the three formulas. DSC analysis showed that V2 reached a recrystallization  $T$  of 82,3°C, which showed a higher degree of crystallinity. V3 implementation reduced delamination waste by 5 tons, equals to 0,15% of total paper consumption, saving \$11 165.*

*Keywords: Starch, DSC, Corrugated Cardboard, Temperature*

## ÍNDICE GENERAL

Resumen .....	I
Abstract .....	2
Índice general .....	3
Abreviaturas .....	6
Simbología .....	7
Índice de figuras .....	8
Índice de tablas.....	9
Capítulo 1 .....	10
1.    Introducción .....	11
1.1.    Descripción del Problema.....	12
1.2. Justificación del Problema .....	12
1.2.    Objetivos .....	13
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	13
1.2.2. Objetivos específicos.....	13
1.3.    Marco teórico .....	13
1.3.1. Adhesión en el cartón corrugado .....	13
1.3.1.1.    Proceso de Manufactura del cartón corrugado .....	13
1.3.1.2.    Principios de adhesión entre materiales fibrosos .....	16
1.3.2. Adhesivo a base de almidón de maíz.....	19
1.3.2.1.    Composición química.....	19
1.3.2.2.    Propiedades reológicas del adhesivo.....	20
1.3.3. Defectos de adhesión en la línea corrugadora .....	22
1.3.3.1.    Clasificación y descripción de defectos .....	22
1.3.3.2.    Impacto económico y ambiental del proceso fabricación de cartón corrugado ..	24
Capítulo 2 .....	26

2.	Metodología.....	27
2.1.	Materiales.....	27
2.2	Formulaciones e identificación de muestras .....	27
2. 3	Preparación de muestras .....	28
2.4	Caracterización de Adhesivo .....	28
2.4.1.	DSC .....	28
2.5	Ensayos Reológicos Operativos.....	28
2.5.1	Viscosidad .....	28
2.5.2	Punto Gel .....	29
2.6	Ensayos Mecánicos.....	29
2.6.1	Ensayo de % Humedad.....	29
2.6.2	Ensayo de Peso Básico .....	29
2.6.3	Ensayo de Adhesión de Pines (PAT).....	29
2.6.4	Ensayo de Flat Crush Test (FCT).....	30
2.6.5	Ensayo de Edge Crush Test (ECT).....	30
2.7	Análisis económico y de desperdicio.....	30
Capítulo 3	.....	32
3.	Resultados y análisis .....	33
3.1	Ensayo de DSC .....	33
3.2	Ensayo de Viscosidad y Punto Gel .....	35
3.3	Ensayo de Propiedades de láminas de cartón: Peso Básico y Humedad (%) .....	35
3.4	Ensayos Mecánicos - ECT, FCT Y PAT .....	36
3.5	Análisis de Desperdicio .....	37
3.6	Análisis económico.....	38
3.7	Diseño Metodológico propuesto .....	40
Capítulo 4	.....	42
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	43

4.1 Conclusiones .....	43
4.2 Recomendaciones .....	43
Bibliografía.....	45
Apéndice A.....	48

## **ABREVIATURAS**

ASTM American Society for Testing and Materials

ISO International Organization for Standardization

TAPPI Technical Association of Pulp and Paper Industry

## SIMBOLOGÍA

CM	Corrugado Medio
ECT	Edge Crush Test
DSC	Calorimetría de Doble Barrido
FAT	Flat Crush Test
g	gramos
LC	Lado Centro
LM	Lado Máquina
LO	Lado Operador
m	Metro
NaOH	Hidróxido de Sodio
s	segundos
T	Temperatura
Tg	Temperatura de Gelatinización
ton	Toneladas
Tr	Temperatura de Recristalización
pH	Potencial de Hidrógeno
PAT	Pin Adhesion Test

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura de los diferentes tipos de láminas de cartón corrugado.....	11
Figura 1.3.1 Proceso de fabricación de láminas de cartón corrugado.....	14
Figura 1.3.3 Tipos de flauta en el Corrugado Medio .....	15
Figura 1.3.4 Sección de doble engomado en la línea corrugadora.....	16
Figura 1.3.5 Ángulos de humectabilidad en el papel .....	17
Figura 1.3.6 (A) Estructura química de la amilosa y amilopectina. (B) Ordenamiento de ambas macromoléculas.....	19
Figura 1.3.7 Proceso Stein Hall de Cocción del adhesivo .....	21
Figura 2.1 Metodología de mezclado para la preparación de adhesivo por método Stein Hall....	28
Figura 2.2 Ensayo PAT en el Compresómetro.....	30
Figura 3.1 Resultados de Calorimetría de Doble Barrido de las formulaciones del adhesivo .....	34
Figura 3.2 Desperdicio por delaminación de 2025 .....	38
Figura 3.3 Diseño metodológico propuesto .....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

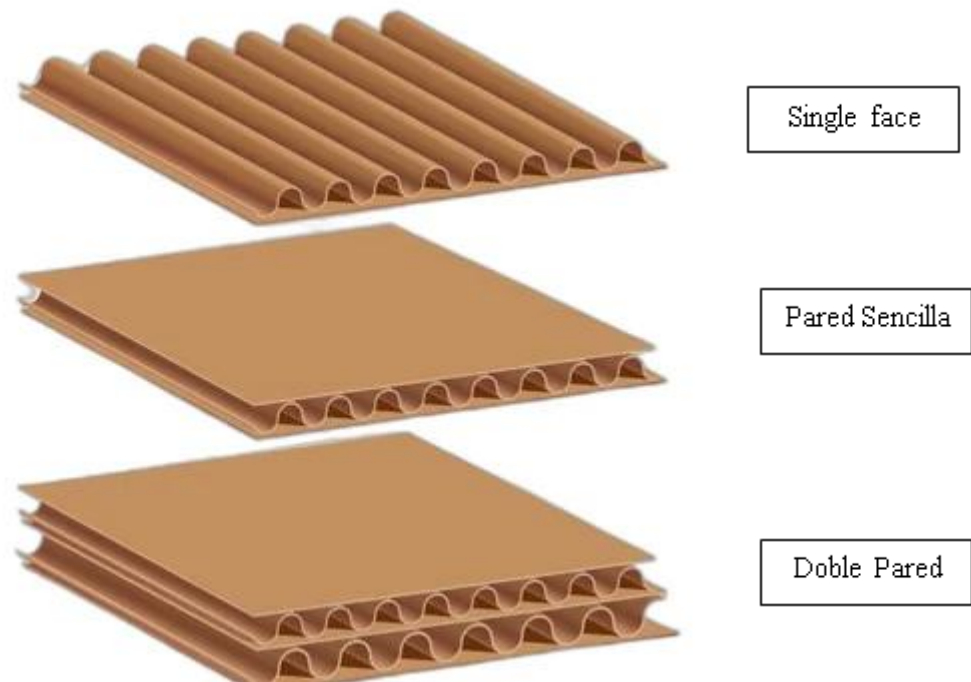
Tabla 1.1.1 Propiedades físicas de los papeles.....	12
Tabla 1.3.1 Datos de perfiles de flautas de Corrugado Medio.....	15
Tabla 1.3.2 Tipos de Mecanismo de Adhesión .....	18
Tabla 1.3.3 Tipos de defectos en el cartón corrugado.....	22
Tabla 2.1 Contenido de las formulaciones de adhesivo .....	27
Tabla 2.2 Tamaño de probetas para PAT acorde a la flauta.....	29
Tabla 3.1 Resultados de Entalpía y Tr de formulaciones de adhesivo.....	35
Tabla 3.2 Resultados de ensayos de Punto gel.....	35
Tabla 3.3 Resultados de Ensayos de Propiedades de láminas de cartón de test 175B N.....	36
Tabla 3.4 Resultados de Ensayos de Mecánicos de láminas de cartón de test 175B N .....	36
Tabla 3.5 Costo \$/kg de lo sólidos de cada formulación.....	39
Tabla 3.6 N° de batches consumidos de adhesivos por mes .....	39
Tabla 3.7 Consumo específico de almidón [g/m <sup>2</sup> ].....	40

## **CAPÍTULO 1**

## 1. INTRODUCCIÓN

En la industria de empaques global, el cartón corrugado representa uno de los materiales con mayor versatilidad de almacenamiento y transporte de productos, con un consumo anual proyectado en 400 millones de toneladas de papel[1]. En su estructura combina capas de papel planas (liners) y corrugadas (CM) que se adhieren entre sí a través del adhesivo como se muestra en la Figura 1.1.

**Figura 1.1** Estructura de los diferentes tipos de láminas de cartón corrugado [2]



Sin embargo, la resistencia mecánica e integridad de la lámina depende de la unión cohesiva entre sustratos. Para alcanzar esta unión, la industria cartonera ha evolucionado desde el uso de adhesivos de silicato de sodio hacia sistemas de base polimérica, siendo hoy en día el adhesivo a base de almidón de maíz el estándar global debido a su bajo costo y alta afinidad con las fibras de los sustratos [3].

Es por medio de dicho adhesivo que se fabrican láminas de pared sencilla, compuestas por tres papeles, hasta láminas de doble pared que integran cinco papeles. Sin embargo, la adherencia entre papeles no sólo depende de la composición del adhesivo, sino de la interacción entre los parámetros de operación y las propiedades del sustrato. Factores como la porosidad y el gramaje de los papeles, sean estos de fibra reciclada (test liners) o virgen (kraft liners), condicionan la absorción y la penetración del almidón. Los valores promedio de estos factores se resumen en la Tabla 1.1 [4].

**Tabla 1.1.1** Propiedades físicas de los papeles

Tipo de Papel	Gramaje [g/m <sup>2</sup> ]	Porosidad Gurley [s/100ml]	Índice Cobb [g/m <sup>2</sup> ]
Kraft Liner	120 - 270	15 - 40	40 - 50
Test Liner	100 - 240	5 -15	40 - 60
Corrugado Medio	100 - 185	2 – 10	40 – 60
Estucado (White Top)	140 - 200	30 -60	40 - 50

Según estándares internacionales TAPPI, un proceso eficiente debe mantener niveles de desperdicio controlable en un óptimo 5%, sin embargo, bajo controles empíricos se eleva el desperdicio controlable por encima del 10% [2].

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar una metodología para la reducción de desperdicios a partir de la caracterización experimental de las propiedades reológicas, térmicas y mecánicas del adhesivo, estableciendo parámetros óptimos de operación que aseguren la calidad de adhesión entre papeles.

### **1.1.Descripción del Problema**

En una empresa dedicada a la fabricación de cartones, se observa el aumento en la generación de desperdicio por varios defectos en las láminas de cartón tales como ampollado, delaminado, filos abiertos, soplado, combado y goma cristalizada. Todos estos efectos mencionados recaen en un factor común, el adhesivo a base de almidón. Dicha adhesión depende directamente de parámetros del proceso corrugador, principalmente de la temperatura, presión, dosificación y la distancia entre los rodillos engomador y corrugador que definen la calidad de adhesión y la uniformidad del pegado.

### **1.2. Justificación del Problema**

El control adecuado del adhesivo en el proceso de corrugado es un factor determinante en la calidad estructural de las láminas de cartón, ya que asegura la unión entre las capas internas, externas y el corrugado medio. Sin embargo, actualmente la aplicación del adhesivo presenta deficiencias que se traducen en los defectos como delaminado, ampollado, combado, entre

otros. Al no ser posible recuperar las láminas defectuosas, incrementan el porcentaje de desperdicio. Este comportamiento del adhesivo depende de la interacción entre sus propiedades reológicas y variables de procesamiento. Las medidas actuales para mitigar el problema se basan en ajustes empíricos del proceso o exceso de aplicación en la cantidad de adhesivo a los papeles, lo que resulta ineficiente y económicamente insostenible.

## **1.2.OBJETIVOS**

### **1.2.1. *Objetivo general***

Diseñar la metodología para reducir desperdicios por defectos en la línea corrugadora controlando las variables de procesamiento en la aplicación de adhesivo mediante la evaluación de sus propiedades reológicas, térmicas y mecánicas

### **1.2.2. *Objetivos específicos***

1. Caracterizar las propiedades térmicas y reológicas para la definición de los parámetros de dosificación del adhesivo.
2. Evaluar el desempeño mecánico y la adherencia de las láminas de cartón.
3. Cuantificar el ahorro económico a partir de la reducción del índice de desperdicio en la fabricación de láminas de cartón y producción de adhesivo de almidón.

## **1.3.MARCO TEÓRICO**

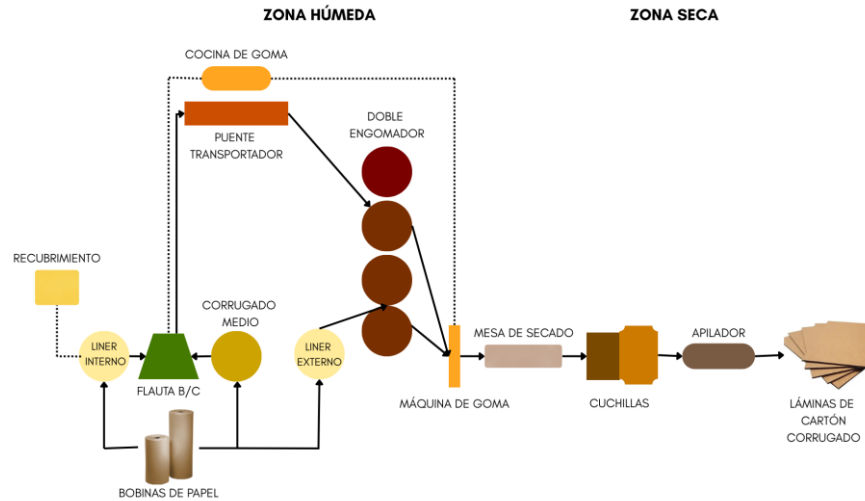
### **1.3.1. *Adhesión en el cartón corrugado***

#### **1.3.1.1.Proceso de Manufactura del cartón corrugado**

El proceso de corrugación tiene lugar en la línea corrugadora donde el papel se transforma en láminas de cartón corrugado. En la Figura 1.3.1 se observan las zonas que conforman el proceso de corrugación: húmeda y seca respectivamente. En la zona húmeda se empieza con el abastecimiento, despliegue y acondicionamiento

higrotérmico del papel, mientras que hacia la zona seca continúa con la formación mecánica de la flauta.

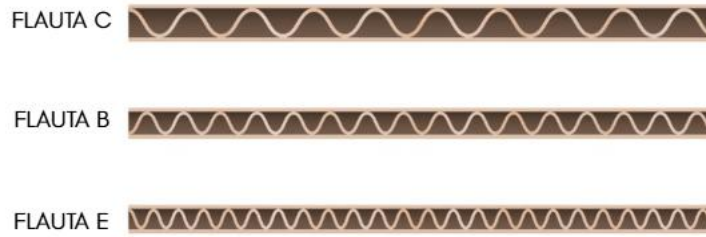
**Figura 1.3.1** Proceso de fabricación de láminas de cartón corrugado



El proceso empieza con el despliegue de las bobinas de papel en los empalmadores. Estos componentes regulan la tensión de salida del papel para evitar roturas o variaciones dimensionales. Con el fin de homogeneizar la humedad a lo largo del papel, se activan precalentadores a  $160 - 180^{\circ}\text{C}$ . El precalentador está compuesto por un rodillo pequeño ajustable que controla el tiempo de contacto entre el cartón y el rodillo calentador. Este pre acondicionamiento busca mantener los valores de humedad en un rango de 6,5-7% [4].

Durante el calentamiento, se forma la flauta donde el CM pasa entre los rodillos corrugadores con forma de engranaje que ejercen un esfuerzo de deformación plástica al papel hasta obtener la forma deseada como se muestra en la Figura 1.3.2 [5].

**Figura 1.3.2** Tipos de flauta en el Corrugado Medio



La altura y frecuencia de las ondas definen el perfil de la flauta, lo cual influye tanto en la resistencia mecánica como en el consumo de recursos. En la Tabla 1.2, se muestran los diferentes perfiles de flauta estandarizados por la industria. Cada perfil cuenta con un factor de corrugación que cuantifica la relación entre la longitud del papel corrugado frente al papel plano.

**Tabla 1.3.1** Datos de perfiles de flautas de Corrugado Medio

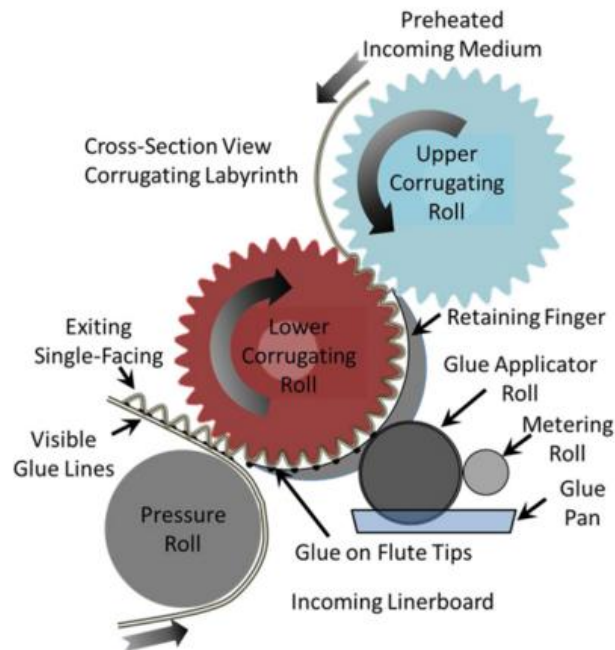
Perfil de Flauta	Altura [mm]	Factor de Corrugación	# Crestas por metro lineal
C	3.7 – 4.0	1,49	130
B	2.1 – 2.3	1,38	171
E	1.3	1,27	276

*Nota.* Datos tomados de cartonera de estudio en Ecuador (2025)

La línea corrugadora maneja una máquina de goma que aplica el adhesivo. En esta primera estación, se forma un rollo single face que se logra a través de la adhesión por presión del liner interno y el CM. Avanza por el puente transportador hasta llegar a la sección del doble engomador.

Es en este punto donde se completa la estructura de la lámina de cartón mediante la adhesión de la capa externa a las crestas del single face, como se observa en la Figura 1.3.3 [6].

**Figura 1.3.3** Sección de doble engomado en la línea corrugadora



Más adelante, en la mesa caliente ocurre el proceso de curado, donde las planchas calentadas a vapor transfieren calor a la lámina, elevando la T de la fase sólida del adhesivo hasta su T de gelatinización. Esta reacción endotérmica, transforma la suspensión de almidón no gelificado en una matriz rígida que otorga resistencia a la compresión. A continuación, la lámina pasa por la sección de enfriamiento a T ambiente y luego es cortada en sentido longitudinal y transversal acorde a las dimensiones especificadas por el cliente. Finalmente, las láminas se apilan en *pallets* para su traslado al área de conversión.

### **1.3.1.2. Principios de adhesión entre materiales fibrosos**

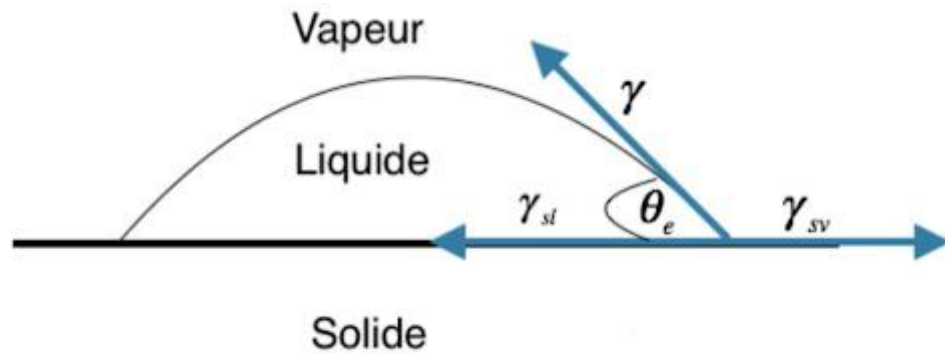
El papel se obtiene a partir de una suspensión acuosa de fibras celulósicas que se depositan sobre un dispositivo de conformado móvil, donde se forma una red fibrosa porosa que posteriormente es sometida a procesos de prensado y secado para la eliminación del exceso de agua [7]. El papel es como un polímero compuesto por una matriz de fibras entrecruzadas con gran presencia de grupos hidroxilos[8]. Estos

grupos funcionales confieren al papel propiedades hidrofílicas, lo que favorece su interacción con adhesivos acuosos.

Para una adhesión efectiva debe existir afinidad relativa entre un líquido por la superficie de un sustrato. Según la ecuación de Young, el ángulo de contacto ( $\theta$ ) formado entre la fibra y la gota de adhesivo depende de las tensiones superficiales como se muestra en la Figura 1.3.4 [9]:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} * \cos(\theta) \quad (1)$$

**Figura 1.3.4 Ángulos de humectabilidad en el papel**



Un menor ángulo de contacto tenderá a humedecer más la superficie. Por ende, para lograr una humectabilidad completa el ángulo de  $0^\circ$ , caso contrario el ángulo será de  $180^\circ$  y no habrá humectabilidad[4], [10].

La unión entre el papel y el adhesivo se produce principalmente por medio de la formación de puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilos de la celulosa y las cadenas poliméricas del adhesivo, complementada por interacciones dipolo-dipolo y fuerzas de Van Der Waals de menor intensidad [4], [6]

Según lo descrito por Plaza, la celulosa puede absorber agua hasta alcanzar un equilibrio higroscópico con el ambiente, lo que provoca la hinchazón de la fibra [4]. Este fenómeno incrementa el área de contacto entre la cresta de la flauta y el adhesivo en pro de la formación de enlaces interfaciales.

En el proceso de fabricación del cartón corrugado se presentan tres diferentes tipos de adhesión que se muestran en la Tabla 1.3.2 [4].

**Tabla 1.3.2** Tipos de Mecanismo de Adhesión

<b>Tipos de Adhesión</b>	<b>Características</b>
Físicoquímico	Se da a nivel molecular en presencia de agua.
Mecánica	Se genera en los puntos de presión.
Pegado por Absorción	Dependiendo del tipo de papel, su estructura superficial y porosidad.

Según su origen fibroso, los liners pueden ser de tipo kraft, fabricados a partir de pulpa química virgen o testliner, elaborados total o parcialmente con fibras recicladas. El CM puede ser de tipo semiquímico, obtenido mediante un tratamiento químico moderado seguido de un refinado mecánico a la fibra [11]. La morfología de la fibra está relacionada con la eficiencia de la adhesión entre papeles. Los papeles de fibras largas, provenientes de pulpas vírgenes de maderas blandas. Este tipo de fibras presenta una mayor capacidad de entrelazamiento, mayor área de contacto entre fibras y una distribución de esfuerzos mecánicos dentro de la red fibrosa [12]. En consecuencia, exhiben mayor resistencia al desgarre, tracción y delaminación. Mientras que, las fibras de menor longitud o recicladas tienen que presentar hornificación, que es el colapso parcial de la pared celular y la reducción de los grupos hidroxilos [4], [13]. Este suceso aumenta la densidad del papel, incrementando su conductividad térmica. Como consecuencia, el papel reciclado se calienta en menos tiempo, pero disminuye su capacidad de hinchamiento gelatinoso, reseándolo y evitando la penetración capilar del adhesivo.

Por otro lado, el papel presenta dos propiedades relacionadas con la dilatación de la fibra. La higroexpansividad, donde las fibras se dilatan al absorber agua y se contraen

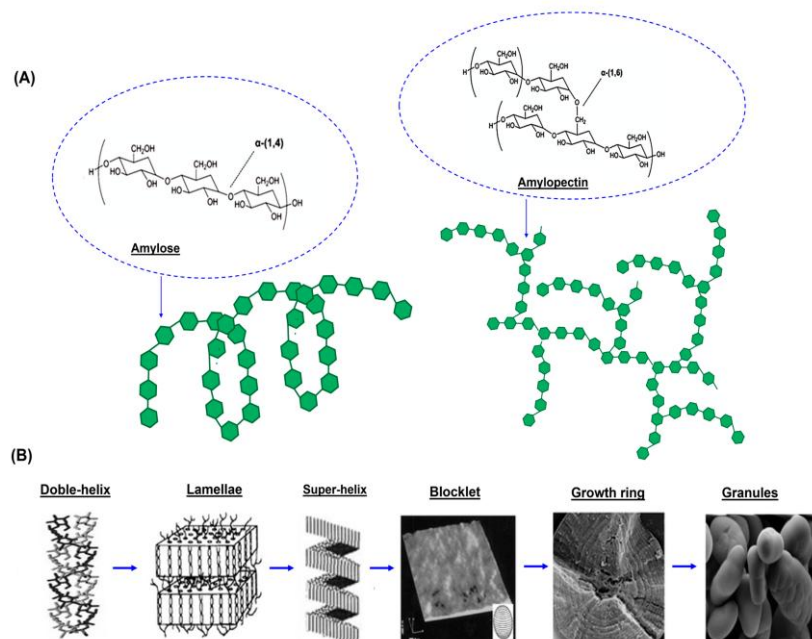
al evaporarla. Mientras que, en la histéresis el papel no recupera sus dimensiones originales tras un ciclo de secado [4], [14].

### 1.3.2. Adhesivo a base de almidón de maíz

#### 1.3.2.1. Composición química

El almidón es un carbohidrato compuesto por dos macromoléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos. La amilosa es un polímero lineal compuesto por enlaces  $\alpha$ -1-4 D-glucopiranososa. Su estructura helicoidal, permite formar complejos con ácidos grasos libres, mono y diglicéridos, alcoholes lineales y yodo- Se localiza preferentemente en las zonas amorfas del gránulo tal como se observa en la Figura 1.3.5 [15]. Por otro lado, la amilopectina es la molécula predominante del almidón y es un polímero ramificado de mayor tamaño que la amilosa. Esta formada por segmentos unidos por enlaces  $\alpha$ -1-4 glucosa conectadas por ramificaciones de enlace  $\alpha$ -1-6 cada 12 a 25 residuos [8], [14], [16].

**Figura 1.3.5** (A) Estructura química de la amilosa y amilopectina. (B) Ordenamiento de ambas macromoléculas



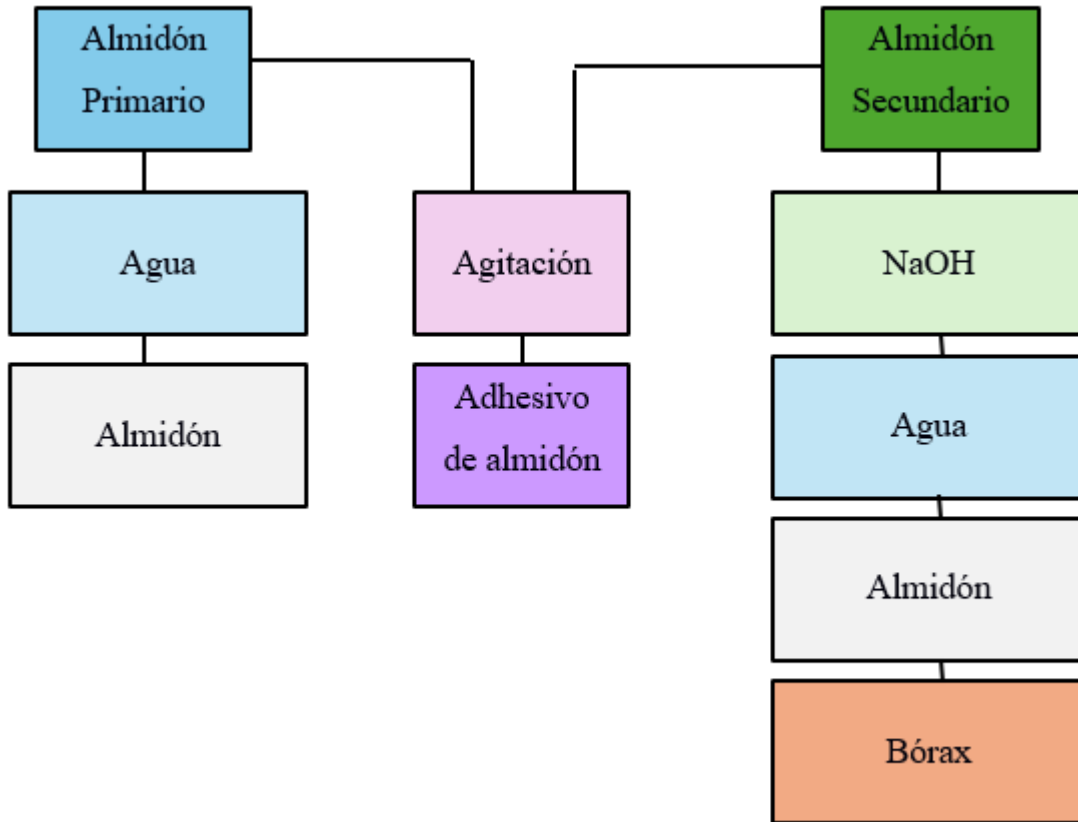
Esta última es la responsable del gránulo de almidón, el cual consiste en áreas cristalinas y amorfas [16].

Para que el almidón sea funcional a velocidad industrial, el sistema nativo se transforma químicamente mediante dos agentes críticos que alteran su termodinámica. El hidróxido de Sodio (NaOH) actúa como agente estabilizador de los puentes de hidrógeno intrínsecos en el grano. Al debilitar las fuerzas intermoleculares, permite que el grano se hinche y gelifique a T menores, entre 58-62°C, en comparación con los 72°C del almidón nativo [4]. Mientras que el bórax actúa como agente de entrecruzamiento. Los iones borato reaccionan con los grupos hidroxilo de las cadenas de amilopectina, creando una red tridimensional que aumenta la cohesión interna[15].

#### **1.3.2.2. Propiedades reológicas del adhesivo**

El adhesivo de almidón se prepara bajo el sistema Stein Hall. En este método de cocción de almidón existen dos fases. La primera fase comprende entre el 10% - 20% del contenido total del almidón se gelatiniza y es conocida como almidón primario. El resto del almidón es conocido como almidón secundario y permanece sin gelatinizar como se muestra en la Figura 1.3.6 [4].

Figura 1.3.6 Proceso Stein Hall de Cocción del adhesivo



Acorde a ello se clasifica como fluido no newtoniano pseudoplástico donde la viscosidad disminuye a medida que aumenta el gradiente de cizallamiento en los rodillos de la corrugadora[4].

La viscosidad de un adhesivo define la capacidad de transferencia y permanencia de este en la cresta de la flauta. Esta propiedad depende directamente del porcentaje de sólidos, Tg del almidón, de la T y del pH del sistema. El porcentaje de sólidos del adhesivo actúa como un regulador en cuanto a la concentración de polímero activo en la solución [17]. Incrementos en la fracción sólida aumentan la viscosidad y la cohesión interna del adhesivo, mejorando la resistencia final del enlace; sin embargo, contenidos excesivos reducen la transferencia de calor y ralentizan la gelatinización del almidón.

Al agregar resinas cetona – aldehído, estas actúan como un agente de refuerzo a la red polimérica que optimiza la eficiencia de la fracción sólida sin afectar la transferencia térmica [4], [10].

Por otro lado, la temperatura modifica la movilidad molecular de las cadenas de almidón y la interacción con el agua. Para el adhesivo industrial, el NaOH reduce la energía de activación del sistema. Mientras que el almidón nativo gelifica entre los 60°C – 75°C, la formulación alcalina alcanza su punto gel entre los 55°C – 62°C [3], [4]. Cercano a esta T se produce un aumento abrupto de la viscosidad debido al hinchamiento de los gránulos y la liberación de amilosa. El pH del adhesivo, normalmente alcalino, favorece la solubilización parcial y la formación de enlaces cruzados mediante agentes como el bórax, incrementando la estabilidad reológica y el *tack* o resistencia del adhesivo[4].



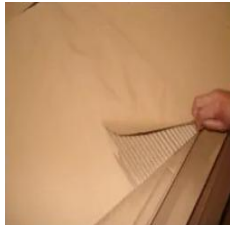


Una viscosidad demasiado baja favorece la sobre penetración del adhesivo en los poros del papel. Por tanto, reduce el polímero disponible en la interfase. Mientras que a viscosidades excesivamente altas dificultan la humectación superficial, promueve defectos de filos abiertos entre los sustratos.

### **1.3.3. Defectos de adhesión en la línea corrugadora**

#### **1.3.3.1. Clasificación y descripción de defectos**

Los defectos en el cartón corrugado son manifestaciones macroscópicas de desequilibrios en las variables de proceso que gobiernan la interacción entre papeles, adhesivos y energía térmica. En la tabla 1.3.3, se detallan los defectos más convencionales y sus causas.

**Tabla 1.3.3** Tipos de defectos en el cartón corrugado

Defectos	Descripción	Apariencia física
<b>Ampollado</b>	Agarre incompleto entre CM y liners	
<b>Delaminación</b>	Separación entre liners y CM por ausencia de goma	
<b>Soplado</b>	Levantamiento parcial o total de manera transversal del liner con respecto al corrugado medio por falta de tensión.	
<b>Filos despegados</b>	Separación del liner y CM en los extremos de la lámina por ausencia de goma.	
<b>Goma cristalizada</b>	Baja adhesión entre liners y CM por exceso de T.	

Generalmente, se identifica material en la etapa de conversión tras detectarse defectos estructurales que no fueron inspeccionados en la línea corrugador. Dichas láminas con

fallas críticas no resisten los esfuerzos mecánicos inherentes a las máquinas impresoras. Dentro de este grupo, aparecen láminas delaminadas que constituyen la causa principal con un 40% de incidencias.

### 1.3.3.2. Impacto económico y ambiental del proceso fabricación de cartón corrugado

El impacto económico del proceso se fundamenta en la eficiencia de la conversión de las materias primas en el producto terminado. El costo operativo no es fijo, más bien depende de la dosificación.

Dentro del grupo de indicadores, existe el consumo específico de almidón. Este ratio relaciona la masa total de almidón consumido por el área total de cartón fabricado tal y como se presenta en la ecuación:

$$\text{Consumo específico } \left( \frac{g}{m^2} \right) = \frac{\text{Kg almidón consumidos}}{\text{Área total de cartón fabricado}} \quad (2)$$

Para analizar el costo del lote, se debe considerar el costo unitario de cada componente dentro de la formulación. La eficiencia económica reside en la capacidad de la mezcla para cubrir la mayor cantidad de  $m^2$  recorridos con la mínima cantidad de adhesivo. Es necesario considerar la variación de costos de los insumos a medida que pasan los años, ya que el almidón y los químicos asociados están sujetos a la variabilidad del mercado. Estudios reportan que el adhesivo representa entre el 2 y 5% del costo total de producción del cartón corrugado., mientras que la energía térmica y eléctrica asociada al proceso puede alcanzar entre el 5 y 10% del costo operativo[18].

Basado en el impacto ambiental, el papel y el cartón se caracterizan por su naturaleza biodegradable y reciclabilidad. Entre el 70% y el 95% del papel para CM está compuesto de fibra reciclada, lo que ayuda a reducir la demanda de pulpa virgen. Estudios de análisis de ciclo de vida indican que el uso de fibra reciclada puede

disminuir el consumo energético total del proceso de fabricación de papel un 65%, así como reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> al menos el 20%. Adicionalmente, el reciclaje de papel y cartón permite ahorros promedio de 1,5 m<sup>3</sup> de agua por cada tonelada de fibra recuperada. En el caso específico del cartón corrugado, se ha reportado que más del 80% del material post consumo puede reincorporarse al ciclo productivo sin comprometer de forma crítica las propiedades mecánicas requeridas para aplicaciones de embalaje [11].

## **CAPÍTULO 2**

## 2. METODOLOGÍA.

En esta sección se detalló el procedimiento de evaluación de formulaciones y control de proceso del adhesivo a base de almidón de maíz.

### 2.1. Materiales

Los materiales empleados para la elaboración del adhesivo se detallan a continuación bajo sus especificaciones técnicas de calidad. Se utilizó almidón nativo de maíz con una humedad de 10,0% a 12,5%, pH de 4.5 a 7.0, sensibilidad alcalina de 39 a 55 ml. Además, se aplicó hidróxido de sodio con una pureza mínima de 98%. Para la estructuración de la mezcla se empleó bórax pentahidratado con una pureza del 99%, compuesto por un 70% a 72% de bórax anhidro. La resina integrada consiste en una solución de polímero vinílico al 37%, polímero acrílico y resina de cetona-aldehído, con una concentración total de sólidos del 45%. Finalmente, se utilizó agua como solvente para la dispersión y suspensión de los componentes sólidos.

### 2.2 Formulaciones e identificación de muestras

En la tabla 2.1 se muestran las formulaciones evaluadas con sus respectivos % de masa en relación al total del batch de cada formulación.

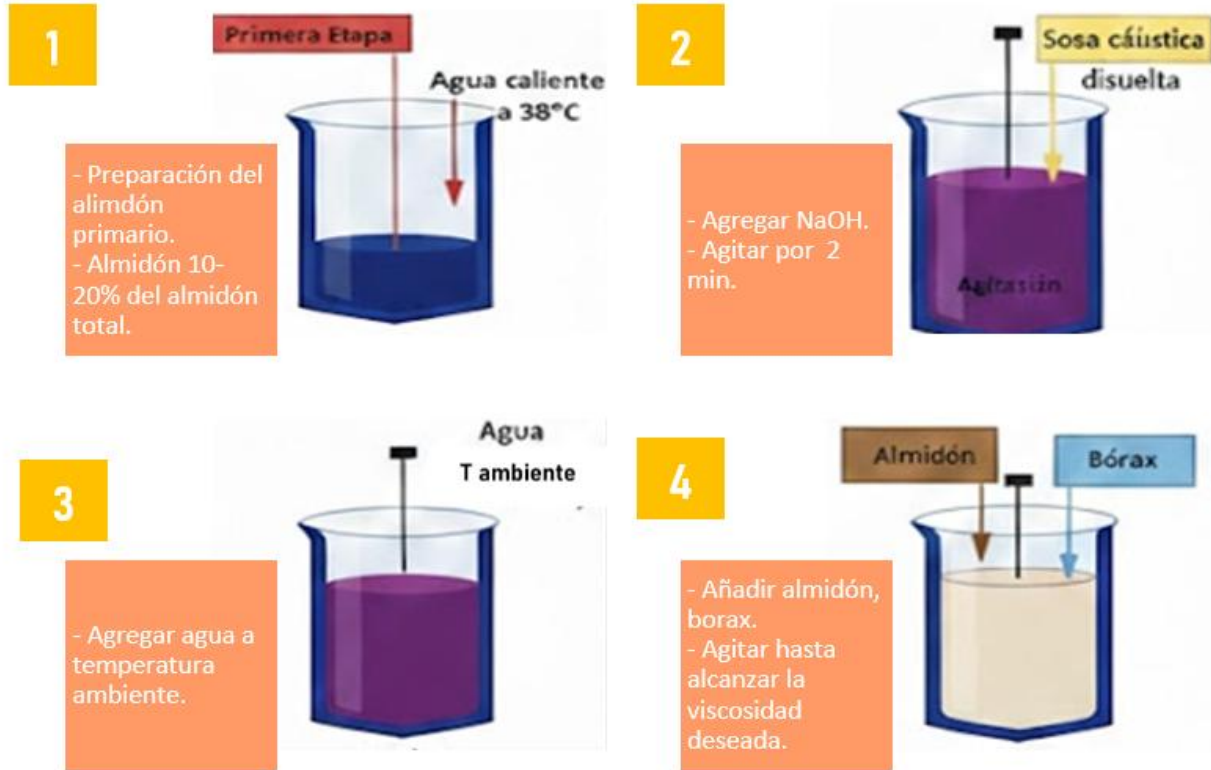
**Tabla 2.1 Contenido de las formulaciones de adhesivo**

ITEM	MATERIAL	V1	V2	V3
		wt%		
1	Agua	71,3%	72,0%	72,0%
2	Almidón	26,9%	25,9%	25,2%
3	Soda Caustica en escamas	0,5%	0,5%	1,5%
		1:1	1:1	1:3
4	Bórax	0,2%	0,2%	0,3%
5	Resina	1,1%	1,4%	1,0%

## 2.3 Preparación de muestras

Para preparar las muestras se siguió la metodología de mezclado de la Figura 2.1 [4].

**Figura 2.1** Metodología de mezclado para la preparación de adhesivo por método Stein Hall



## 2.4 Caracterización de Adhesivo

### 2.4.1. DSC

Se evaluó la estabilidad térmica mediante un análisis de calorimetría acorde a la normativa ASTM D3418. El análisis se evaluó con una tasa de calentamiento de 5 °C/min de 0 a 130 °C en una atmósfera controlada de nitrógeno.

## 2.5 Ensayos Reológicos Operativos

### 2.5.1 Viscosidad

La viscosidad del adhesivo se midió usando la copa Stein Hall bajo la normativa TAPPI TIP 0304-14, midiendo con un cronómetro el tiempo de escurrimiento del adhesivo desde la liberación del orificio interno hasta el nivel inferior de la copa. El tiempo de escurrimiento osciló entre 30-50 s.

### 2.5.2 Punto Gel

Se utilizó un método de calentamiento dinámico empleando un baño termostático con agitación manual hasta que alcanzó T entre  $61^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

## 2.6 Ensayos Mecánicos

Para realizar los ensayos mecánicos, se tomaron tres láminas por cada lista de trabajo del corrugador de test 175B N con la combinación de tres papeles TLC 130. En cada muestreo se segmentaron probetas por lado máquina (LM), centro (LC) y lado operador (LO).

### 2.6.1 Ensayo de % Humedad

La normativa ISO 287:2018 fue considerada para la evaluación de % de humedad en una termobalanza. Para el ensayo se utilizaron probetas triangulares de 7 cm por lado, colocadas en el plato de la termobalanza a  $105^{\circ}\text{C}$  por aproximadamente 4 min.

### 2.6.2 Ensayo de Peso Básico

Se pesó una probeta de 10 x 10 cm en la balanza analítica SKY-W-600, a partir de las normas ISO 536 y TAPPI T 410, las cuales requieren muestras de área conocida. Luego, se promediaron los pesos por cada probeta para comparar con el peso básico de la combinación de la lámina de cartón.

### 2.6.3 Ensayo de Adhesión de Pines (PAT)

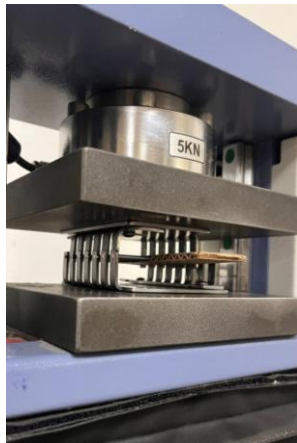
Se midió la resistencia de adhesión del cartón corrugado acorde a la normativa TAPPI T 821. Para esta prueba se usaron probetas acordes a la flauta como se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Tamaño de probetas para PAT acorde a la flauta

Perfil de Flauta	Ancho [mm]	Largo [mm]
C	50	150
B	31.8	100

Se colocó la muestra sobre el compresómetro digital de la marca IDM. El ensayo consistió en la aplicación de una carga mecánica progresiva sobre los pines metálicos insertados en las crestas de la flauta tal como se muestra en la Figura 2.2, hasta provocar la falla del enlace adhesivo. La resistencia de adhesión se determinó a partir de la fuerza máxima requerida para el desprendimiento.

**Figura 2.2** Ensayo PAT en el Compresómetro



#### **2.6.4 Ensayo de Flat Crush Test (FCT)**

El ensayo se realizó acorde a la normativa ISO-3035, para la cual se prepararon probetas redondas de 50 cm<sup>2</sup>. A continuación, las muestras fueron sometidas a compresión plana aplicando una carga perpendicular, a una velocidad de 12.5 mm/min.

#### **2.6.5 Ensayo de Edge Crush Test (ECT)**

El ensayo se realizó acorde a la normativa ISO-3037. Para ellos, se prepararon probetas de cartón con dimensiones de 5 x 5 cm. Las muestras fueron colocadas entre las platinas del compresómetro y fueron sometidas a una carga compresiva aplicada al borde extremo de la lámina.

### **2.7 Análisis económico y de desperdicio**

Para el análisis económico se realizó una comparación de precios unitarios de los insumos, considerando el contenido másico de cada componente dentro del lote de formulación y su consumo promedio por batch a lo largo del mes. Este enfoque permitió determinar el costo real

por lote y su impacto acumulado en el costo por unidad de superficie producida ( $\text{m}^2$  de cartón corrugado). En cuanto al análisis de desperdicio, se consideraron las toneladas métricas (TM) de material rechazado asociadas a las principales fuentes de pérdida del proceso, específicamente aquellas generadas en la corrugadora, durante el apilamiento de láminas, y en las devoluciones al proceso por defectos de pegado y calidad superficial, descritos en el Capítulo 1. Estos valores fueron normalizados respecto a la producción total para obtener el porcentaje de desperdicio (%), así como el porcentaje de reducción alcanzado como resultado de la implementación de los controles de formulación y aplicación del adhesivo.

## **CAPÍTULO 3**

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se llevó a cabo un análisis integral de los resultados de los ensayos térmicos, reológicos y mecánicos aplicados a láminas de pared sencilla con flauta B. El análisis es fundamental para determinar cuáles son las T de operación de las fórmulas.

#### 3.1 Ensayo de DSC

En la Figura 3.1 se ilustran los termogramas, donde se evidenciaron curvas endotérmicas entre 60°C y 80°C. Estos picos representan la magnitud de energía térmica necesario para desestabilizar las estructuras moleculares y superar la barrera energética del sistema.

A partir de estos resultados, se relacionó con el % de NaOH y resina, que fueron los componentes que variaron cada formulación, en vista que su efecto se asocia con la disrupción de enlaces de hidrógeno y alteración de cristalinidad. De acuerdo al modelo de micro fases propuesto por Biliaderis et al., el cual postula que el almidón granular se comporta como un polímero semicristalino complejo. Según este modelo, la estructura está compuesta por láminas ordenadas de amilopectina rodeadas de regiones amorfo-rígidas intercristalinas; estas últimas corresponden a regiones de ramificación densa que no contribuyen al cambio de calor específico, pero aportan rigidez estructural [19]. A esto también se agrega el enfoque termodinámico, que durante el calentamiento establece un gradiente en el potencial químico del agua de los gránulos de almidón [20].

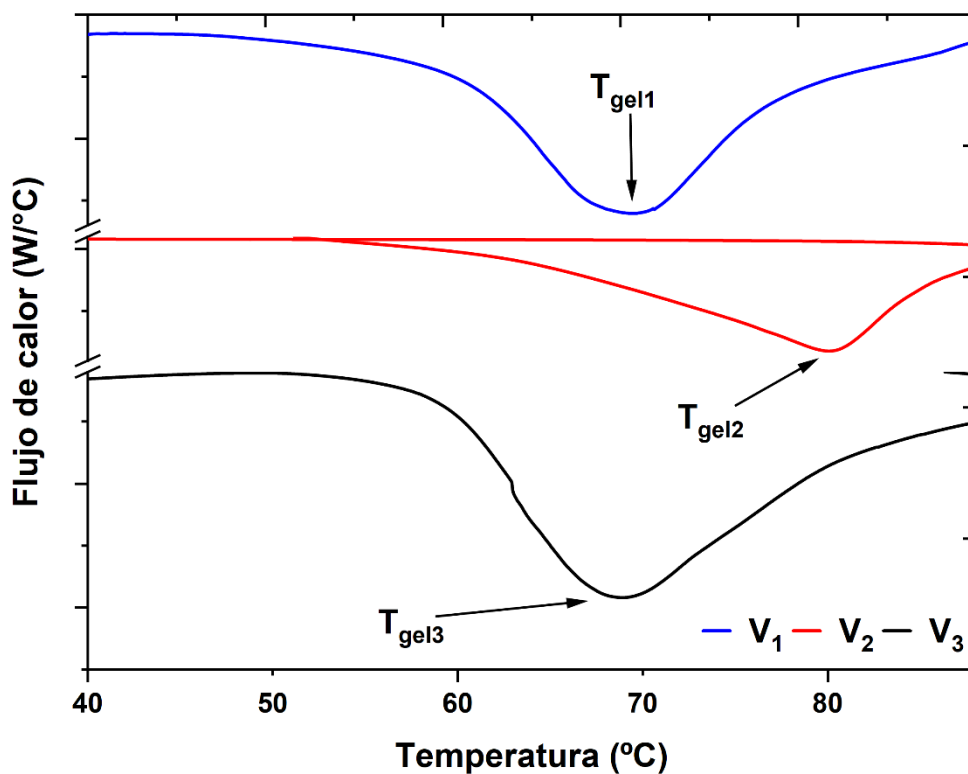
Para el caso de V1, se exhibe una Tgel dentro del rango característico del almidón nativo que se observa en la Tabla 3.1 [8], [21]. El pico endotérmico observado en el DSC se relaciona principalmente a la fusión de dobles hélices de amilopectina y a la restructuración del gránulo, siendo la magnitud de la entalpía proporcional al grado de orden estructural presente.

Por otro lado, V2 registró la mayor Tgel, lo que indica un elevado grado de cristalinidad en su estructura y restricción al hinchamiento del gránulo. Este comportamiento se alinea con el confinamiento interfacial que por la adsorción de los polímeros de la resina sobre la superficie del

almidón reduce la porosidad efectiva. Como consecuencia, limita la penetración del agua y eleva la energía térmica para el cambio de fase, lo cual se observa en la Figura 3.1 como un desplazamiento del pico endotérmico hacia  $T$  más elevadas y ensanchamiento del mismo en los termogramas [22].

Por el contrario, V3 presentó una entalpía de 54,2 J/g. Este fenómeno se atribuye al efecto plastificante del agua, que como demostró Liu et al., a mayor concentración de humedad, se facilita la hidratación del gránulo de almidón y se diluyen los sólidos en menor tiempo y con menor energía térmica [21]. V3 logró un equilibrio superior a la V2, lo que es consistente con una alteración química en el medio alcalino al contener mayor % de bórax. Este favorece la ruptura parcial de los enlaces intermoleculares [23]. Por lo tanto, el umbral de activación es lo suficientemente bajo para que la energía térmica disponible logre la transición completa, permitiendo que el exceso de agua actúe como vehículo de penetración en el papel sin bloquear la formación del enlace adhesivo.

**Figura 3.1** Resultados de Calorimetría de Doble Barrido de las formulaciones del adhesivo



**Tabla 3.1** Resultados de Entalpía y Tr de formulaciones de adhesivo

Formulación	$\Delta H$ [J/g]	T de Recristalización [°C]
V1	70,7	68,0
V2	42,9	82,3
V3	54,2	67,6

### 3.2 Ensayo de Viscosidad y Punto Gel

En el análisis de las propiedades reológicas, la diferenciación crítica entre las muestras se manifestó en la cinética de activación del sistema adhesivo. En la Tabla 3.2 se observa la T de Punto gel de las formulaciones de donde V2 y V3 alcanzaron el valor estándar de gelatinización. A partir de estas T el adhesivo desarrolla su fuerza de agarre inicial al entrar en contacto con el flujo térmico de los rodillos. Cuando esto ocurre, las cadenas de amilopectina se despliegan simultáneamente para formar una red robusta en fracciones de segundo [24].

**Tabla 3.2** Resultados de ensayos de Punto gel

Formulación	Punto Gel [°C]
V1	62,4
V2	62,0
V3	60,5

### 3.3 Ensayo de Propiedades de láminas de cartón: Peso Básico y Humedad (%)

En los resultados de la Tabla 3.3 y 3.4 correspondientes al análisis de las láminas de flauta B y C, se observó que tanto el peso básico como el porcentaje de humedad se mantuvieron con una estabilidad notable entre las tres formulaciones, situándose la humedad en un rango controlado de 6,3% a 6,7%. Por otro lado, el control del peso básico en las láminas está estrictamente sujeto a la

combinación de papeles definida para cada test. Cuando se toma la muestra de los tres diferentes lados, se busca tener una diferencia no tan grande para evitar que la flauta pierda su calibre y por ende pierda resistencia en poco tiempo.

**Tabla 3.3** Resultados de Ensayos de Propiedades de láminas de cartón de test 175B N

TEST	PESO BÁSICO [g]			HUMEDAD [%]		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
175B N	460	469	480	6,4	6,3	6,3
175B N	465	496	468	6,5	6,6	6,7
175B N	460	460	490	6,6	6,3	6,3

### 3.4 Ensayos Mecánicos - ECT, FCT Y PAT

Finalmente, el análisis de los ensayos mecánicos demostró, en la Tabla 3.4, que las propiedades de compresión ECT y FCT dependen primordialmente de la estructura y combinación de los papeles seleccionados, manteniendo valores estables, alrededor de 28-34 lbf para ECT y 39-47 lbf para FCT, independientemente de la formulación de goma utilizada. No obstante, la integridad de la unión medida a través del PAT confirmó la superioridad técnica de V3, la cual alcanzó resistencias al desprendimiento a los 40 lbf/in en el test 175B N.

**Tabla 3.4** Resultados de Ensayos de Mecánicos de láminas de cartón de test 175B N

TEST	ECT [lbf/in]			FCT [lbf/in]			PAT [lbf/in]		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
175B N	30	31	31	42	43	43	38	37	38
175B N	30	30	28	46	43	45	37	36	36
175B N	29	30	29	46	47	47	37	36	40

A partir de todos estos resultados, se evidenció que las formulaciones presentaron comportamientos térmicos asociados al balance entre desorganización alcalina del almidón y estabilidad interfacial inducida por el bórax y la resina. V1, con mayor entalpía, mostró una estructura con mayor grado de orden, lo que implica mayor demanda energética para llegar a la T de activación energética. Como resultado la Tgel de V1 fue superior a V3 por tanto promueve un comportamiento reológico gradual y menor rapidez en la formación de la red adhesiva durante el contacto entre papeles. A pesar de que V1 y V3 obtuvieron resultados similares, se observó que en V3 al contener mayor % de bórax favoreció la formación de enlaces boro diol entre las cadenas de almidón [25] .

Por el contrario, V2 al alcanzar su Tgel depende en gran mayoría del calor que se le suministre durante la operación. Esta diferencia cinética de gelatinización se refleja en el ensayo de PAT, donde se observó que V3 posee una mayor integridad de la unión entre los papeles.

### **3.5 Análisis de Desperdicio**

En función del histórico de desperdicio de los últimos dos años, se evidenció que el % promedio de desperdicio general de planta corresponde al 13% con respecto al consumo total de papel. Dentro de este indicador global, se determinó que el 3% del total corresponde a desperdicio por defecto de delaminación. Por tanto, se posiciona como uno de los defectos más relevantes dentro de la segregación de desperdicio.

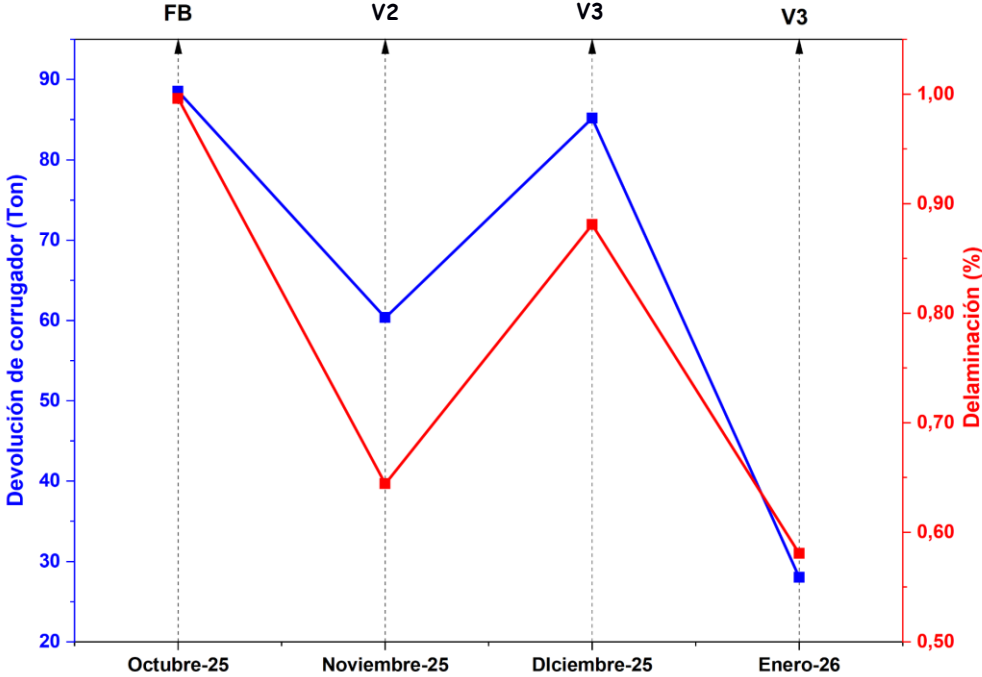
En la Figura 3.2 se presentó el desempeño de las dos últimas formulaciones utilizadas durante el 2025 con respecto a delaminaciones presentadas en el proceso de corrugación, apilamiento y devoluciones desde las imprentas. Es notable que la baja eficiencia de gelatinización de V2 comprometió la producción al no formar el enlace de adhesión entre papees bajo condiciones operativas.

Mientras que, al implementar V3 se observa una mejora sobre esta tendencia. Se registró una disminución de 5 ton de desperdicio por delaminación, lo que representó una reducción equivalente al 0,15% del desperdicio controlable de planta, que representó \$11 165 en ahorro económico.

En el mes de diciembre, el indicador de desperdicio general cerró en 11,80%, valor que, si bien supera la meta establecida del 11%, el 0,88% corresponde a desperdicio por delaminación.

También es notable que durante el mes las toneladas de desperdicio de delaminación aumentaron con respecto a noviembre, pero estas toneladas identificadas no corresponden al delaminado por falta de adhesión sino más bien por fallas en la máquina y la operación.

**Figura 3.2 Desperdicio por delaminación de 2025**



**3.6 Análisis económico**

Se evaluó el costo unitario de los componentes y el costo total por batch de las tres formulaciones. En la Tabla 3.5, se muestran los costos de sólidos del adhesivo entre 2024 y 2025. Los resultados mostraron que con V3 disminuyó el costo total por batch, lo que representó un ahorro directo de \$14,94 frente a V2. Esta disminución se debió a la modificación de % de resina, que representa el componente de mayor costo unitario de todas las formulaciones. Se proyecta que bajo la implementación de la formulación V3, el ahorro será de \$39 000 durante el año 2026.

**Tabla 3.5** Costo \$/kg de los sólidos de cada formulación

	Costo Unitario de materiales		Costo de batch por formulación		
	2024	2025	V1	V2	V3
<b>Almidón</b>	\$ 0,66	\$ 0,66	\$ 445,50	\$ 265,33	\$ 268,65
<b>Soda</b>	\$ 0,83	\$ 0,85	\$ 11,62	\$ 5,92	\$ 6,76
<b>Resina</b>	\$ 3,50	\$ 3,49	\$ 108,50	\$ 76,70	\$ 55,78
<b>Bórax</b>	\$ 0,89	\$ 0,91	\$ 4,45	\$ 2,73	\$ 4,54
		<b>Total</b>	\$570,07	\$350,68	\$335,74

Desde un punto de vista tecno-económico, la cinética de V3 tal como se reflejó en el DSC y punto gel, se traduce no sólo en un proceso de pegado más eficiente operativamente sino también más eficiente y sin sobredosificación del adhesivo.

En la tabla 3.6 se presenta la cantidad de batches de adhesivos consumidos por mes. Por medio de este, se demuestra un volumen elevado de batches fabricados hasta octubre 2025 que fue el último mes de uso de V2.

**Tabla 3.6** N° de batches consumidos de adhesivos por mes

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>2024</b>	98	91	178	204	206	186	111	170	156	195	220	229
<b>2025</b>	232	187	177	191	209	184	169	152	137	151	153	158

A partir del análisis por cantidad de batches y los m<sup>2</sup> recorridos en máquina, se evidencia que existe una tendencia de disminución de consumo específico de almidón, lo cual se refleja en la reducción del costo por batch y su optimización de peso en la formulación en la Tabla 3.7.

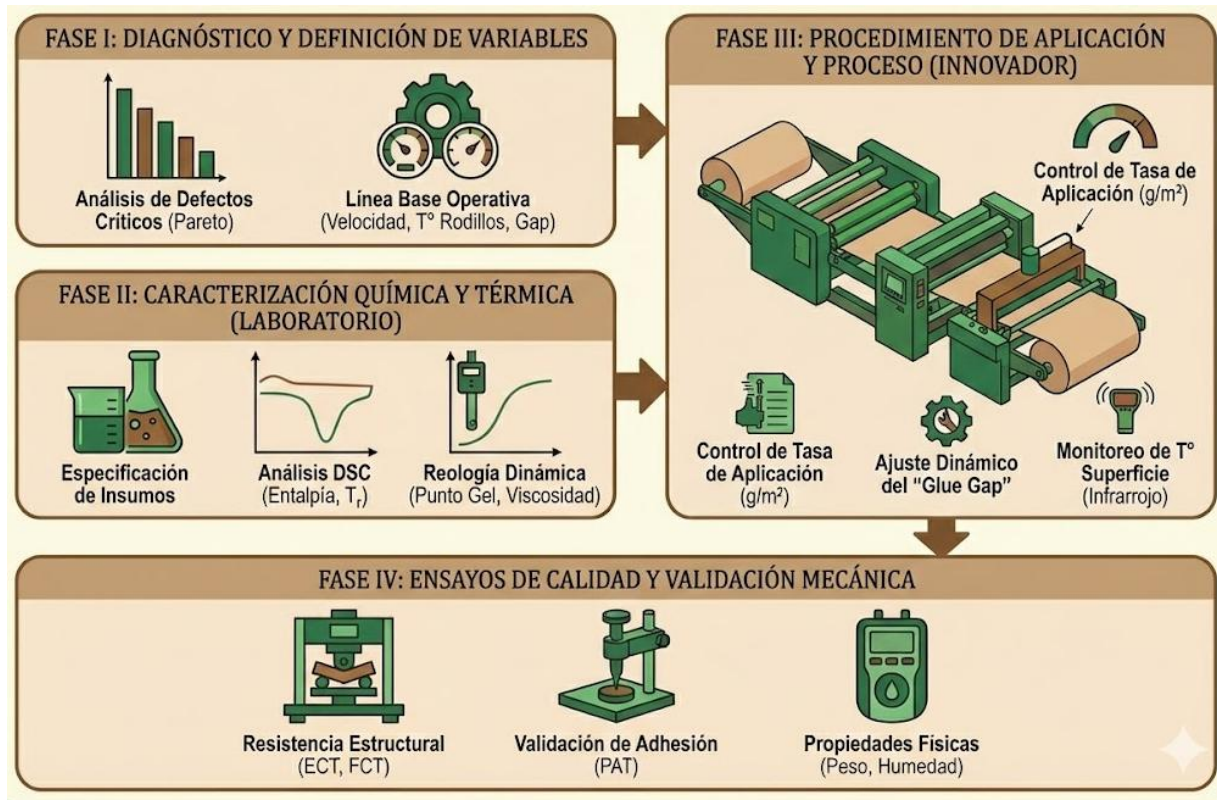
**Tabla 3.7** Consumo específico de almidón [g/m<sup>2</sup>]

<b>Consumo de Adhesivo [g/m<sup>2</sup>]</b>		
<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>
20,36	12,97	10,21

### **3.7 Diseño Metodológico propuesto**

La metodología que se muestra en la Figura 3.3, se estructura en tres fases integradas que aseguran la formación de un enlace adhesivo y una fase de control técnico por medio de pruebas. Se establece el monitoreo del punto de activación térmica, para validar que la mezcla V3 mantenga un umbral de activación de 67,6°C, lo que la sitúa en un rango alcanzable para la energía térmica de la planta. Paralelamente, se supervisa la cinética de gelatinización para garantizar una ventana de transición de 6.8°C, con punto gel a los 60.5°C tal como indica la normativa TAPPI. Para prevenir la degradación prematura de la viscosidad y la formación de una red molecular inmadura, las temperaturas de servicio en los tanques de almacenamiento y bandejas de aplicación deben mantenerse por debajo de los 59.7 °C. Una vez en la interfaz de pegado, la energía transferida por la corrugadora debe asegurar que se supere la barrera energética de la amilopectina para consolidar la unión antes de que la lámina abandone la zona de presión.

**Figura 3.3** Diseño metodológico propuesto



## **CAPÍTULO 4**

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 Conclusiones**

1. La caracterización por DSC permitió definir los rangos de Tgel compatibles con la capacidad de calentamiento de la corrugadora.
2. Se estableció una metodología de control del proceso adhesivo basada en parámetros térmicos, reológicos y mecánicos que permitió reducir defectos por delaminación en la línea corrugadora.
3. El punto gel se consolidó como parámetro crítico de dosificación, al determinar la T de transición entre 60,5 a 62,4°C desde el estado líquido y el estado adhesivo activo del sistema.
4. La formulación V3 registró mejor equilibrio térmico y T de activación correspondiente a los parámetros determinados por la normativa TAPPI.
5. Los ensayos mecánicos validaron que la resistencia estructural de la lámina de cartón (ECT y FCT) se mantiene independiente de la formulación del adhesivo, mientras que la adhesión entre liners depende directamente de las propiedades térmicas y reológicas del adhesivo.
6. La implementación de la formulación V3 redujo el desperdicio por delaminación en 5 toneladas, equivalente al 0,15% del desperdicio controlable. Asimismo, se evidenció una reducción en el consumo específico de almidón de 10,21 g/m<sup>2</sup>, junto con el costo unitario por batch de \$14,94. Estas mejoras se evidenciaron en un ahorro económico directo de \$11 165 y proyectan un ahorro de \$39 000 para el año 2026.

### **4.2 Recomendaciones**

1. Mantener la formulación V3 como estándar operativo para garantizar un balance óptimo entre sus propiedades térmicas, reológicas y mecánicas.
2. Llevar un control operativo de las T aplicadas durante el proceso de corrugación.
3. Controlar el porcentaje de humedad de las bobinas de papel para evitar resecar el papel y que durante la operación existan delaminaciones.
4. Optimizar la dosificación de resina para conservar la estabilidad térmica de los gránulos de almidón en la suspensión.
5. Realizar mantenimientos periódicos y preventivos a los sensores de T de los tanques de preparación y de almacenamiento de la cocina de almidón.
6. Regular los rodillos y zonas de presión para disminuir el espacio de planchado y adhesión entre liners.

7. Establecer pruebas pilotos para optimizar el % de NaOH y de resina en las formulaciones.
8. Registrar el rendimiento económico de cada batch y correlacionarlo con ensayos de DSC y TGA para asegurar las T de servicio.
9. Segregar el desperdicio conforme al defecto y la causa raíz del bulto.
10. Invertir en equipos de medición de T en la cocina de almidón para optimizar el tiempo de prueba.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Future Markets Insights, “Corrugated Board Packaging Market.”
- [2] ACCCSA, “Corrugando Digital (plataforma informativa de ACCCSA).” Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://corrugandodigital.acccsa.org/informe-especial/panorama-2025-el-papel-del-corrugado-en-la-econom%C3%ADa-circular-global>
- [3] T. Koyakumar and H. Nakano, “Thermal Characterization of the Gelatinization of Corn Starch Suspensions with Added Sodium Hydroxide or Urea as a Main Component of Corrugating Adhesives,” *J. Appl. Glycosci. (1999)*, vol. 63, no. 4, pp. 87–98, 2016, doi: 10.5458/jag.jag.jag-2016\_003.
- [4] A. Plaza, *Tecnología de fabricación del cartón corrugado: En busca de la excelencia operativa de la corrugadora*. 2023.
- [5] ARVCO CONTAINER CORPORATION, “Understanding the Different Types of Corrugated Flutes.” Accessed: Jan. 03, 2026. [Online]. Available: <https://arvco.com/articles/understanding-the-different-types-of-corrugated-flutes/>
- [6] S. Johnson and R. Popil, “Corrugated board bonding defect visualization and characterization,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 59, pp. 105–114, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2015.02.003.
- [7] J. A. G. Ochoa de Alda, “Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 7, pp. 965–972, May 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.02.005.
- [8] P. Pineda Gómez, D. Coral, M. Álvarez, A. Rivera, and M. Rodríguez-García, “Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: Estudio por calorimetría diferencial de barrido,” *Ing. Cienc.*, vol. 6, Nov. 2010.
- [9] Physique Unice, “Tension Superficielle et Angle de Contact.”
- [10] W. Brockmann, P. Geiss, J. Klingens, and B. Schröder, *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology*. 2008. doi: 10.1002/9783527623921.
- [11] M. C. Area, “El reciclado en la fabricación de papel y cartón (La Revista del Corrugado),” *La revisita del corrugado*, vol. 24, pp. 18–21, Jan. 2017.
- [12] A. Nasiri, J. Wearing, and M. A. Dubé, “Using Lignin to Modify Starch-Based Adhesive Performance,” *ChemEngineering*, vol. 4, no. 1, p. 3, Jan. 2020, doi: 10.3390/chemengineering4010003.

- [13] A. Nasiri, J. Wearing, and M. A. Dubé, “Using Lignin to Modify Starch-Based Adhesive Performance,” *ChemEngineering*, vol. 4, no. 1, p. 3, Jan. 2020, doi: 10.3390/chemengineering4010003.
- [14] R. Yáñez, J. L. Alonso, and J. C. Parajó, “Production of hemicellulosic sugars and glucose from residual corrugated cardboard,” *Process Biochemistry*, vol. 39, no. 11, pp. 1543–1551, Jul. 2004, doi: 10.1016/S0032-9592(03)00283-8.
- [15] A. F. Chamorro, M. Palencia, and T. A. Lerma, “Physicochemical Characterization and Properties of Cassava Starch: A Review,” *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 12, p. 1663, Jun. 2025, doi: 10.3390/polym17121663.
- [16] S. Wang, C. Li, L. Copeland, Q. Niu, and S. Wang, “Starch Retrogradation: A Comprehensive Review,” *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 14, no. 5, pp. 568–585, Sep. 2015, doi: 10.1111/1541-4337.12143.
- [17] M. Vishnuvarthanan and N. Rajeswari, “Additives for enhancing the drying properties of adhesives for corrugated boards,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 52, no. 1, pp. 137–140, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.aej.2012.10.002.
- [18] J. Bujak, “Energy savings and heat efficiency in the paper industry: A case study of a corrugated board machine,” *Energy*, vol. 33, no. 11, pp. 1597–1608, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.energy.2008.07.005.
- [19] C. G. Biliaderis, C. M. Page, L. Slade, and R. R. Sirett, “Thermal behavior of amylose-lipid complexes,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 5, no. 5, pp. 367–389, Jan. 1985, doi: 10.1016/0144-8617(85)90044-X.
- [20] B. Li, L. Mo, V. Narsimhan, G. Narsimhan, and J. M. Frostad, “A refined mechanistic model for swelling kinetics of starch granules,” *Soft Matter*, vol. 21, no. 22, pp. 4351–4367, 2025, doi: 10.1039/D4SM00980K.
- [21] H. Liu, L. Yu, F. Xie, and L. Chen, “Gelatinization of cornstarch with different amylose/amylopectin content,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 65, no. 3, pp. 357–363, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.carbpol.2006.01.026.
- [22] I. Chakraborty, P. N. S. S. Mal, U. C. Paul, Md. H. Rahman, and N. Mazumder, “An Insight into the Gelatinization Properties Influencing the Modified Starches Used in Food Industry: A review,” *Food Bioproc. Tech.*, vol. 15, no. 6, pp. 1195–1223, Jun. 2022, doi: 10.1007/s11947-022-02761-z.
- [23] S. Bojja, M. Sairam, D. Chattopadhyay, P. Rathnam, and D. Rao, “Thermal, mechanical, and surface characterization of starch–poly(vinyl alcohol) blends and borax-crosslinked films,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 96, pp. 1313–1322, Jan. 2005, doi: 10.1002/app.21439.

- [24] D. Tillayeva and M. Sharipov, "Starch oxidation and study of changing its properties for use as an adhesive component for the production of corrugated cardboard," *E3S Web of Conferences*, vol. 402, p. 07033, Jul. 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202340207033.
- [25] P. El, P. Jaime, and G. Carrero, "Combinaciones del ácido bórico con los Dioles y los alcohol-ácidos; estudio particular del complejo glucono-bórico."

## APÉNDICE A

- **Preparación de formulaciones**

**Figura A. 1** Preparación de formulaciones V1, V2 y V3 respectivamente



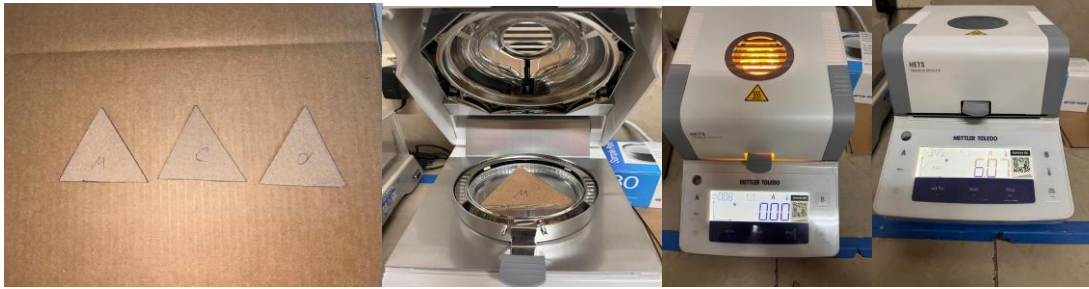
- **Ensayos Operativos de Viscosidad en Cocina de Almidón**

**Figura A. 2** Medición de Viscosidad y Punto Gel en Cocina de Almidón



- **Ensayos Mecánicos realizados**

**Figura A. 3** Preparación y análisis de % humedad en la termobalanza



**Figura A. 4** Preparación y ensayo de peso básico



**Figura A. 5** Muestras antes y después de ensayo de PAT



**Figura A. 6** Muestras para ensayos FCT y ECT respectivamente

