

Evaluación del impacto del paquete de estabilizantes Alphagary en la eficiencia productiva y calidad de tuberías y accesorios de PVC en PAVCO Wavin

Natalia Andrea Nieto Rodríguez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Practica Empresarial

Director

Fernando Viejo Abrante

PhD en Ciencia y Tecnología de los materiales

Tutor

Victor Hugo Becerra Puerto

Ingeniero Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Tabla de contenido

1. Introducción.....	8
2. Objetivos.....	10
2.1. Objetivo General.....	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. Marco Conceptual.....	11
3.1. Cloruro de Polivinilo (PVC).....	11
3.2. Estabilizantes térmicos en la industria del PVC	11
3.3. Normativas ambientales y sostenibilidad en la industria del PVC	12
4. Metodología.....	14
4.1. Fase 1: Caracterización y comparación de estabilizantes	14
4.2. Fase 2: Preparación de muestras en laboratorio.....	15
4.2.1. <i>Tubería corrugada</i>	16
4.2.2. <i>Tubería convencional</i>	17
4.2.3. <i>Accesorios</i>	17
4.3. Fase 3: Análisis reológico	18
4.4. Fase 4: Escalado a planta y ensayo piloto.....	19
4.5. Fase 5: Pruebas de calidad del producto terminado.....	20
5. Resultados.....	23
5.1. Fase 1. Caracterización y comparación de los estabilizantes	23

IMPACTO DE ALPHAGARY EN TUBERÍA Y ACCESORIOS DE PVC	3
5.1.1. <i>Tubería corrugados</i>	23
5.1.2. <i>Tubería Convencional</i>	25
5.1.3. <i>Accesorios PVC</i>	26
5.2. Fase 3. Análisis reológico	29
5.2.1. <i>Tubería corrugada</i>	29
5.2.2. <i>Tubería convencional</i>	31
5.2.3. <i>Accesorios</i>	32
5.3. Fase 4: Escalado a planta ensayo piloto.....	33
5.3.1. <i>Tubería corrugada</i>	34
5.3.2. <i>Tubería convencional</i>	35
5.3.3. <i>Accesorios</i>	36
5.4. Fase 5: Pruebas de calidad de producto terminado	38
5.4.1. <i>Tubería corrugada</i>	38
5.4.2. <i>Tubería convencional</i>	39
5.4.3. <i>Accesorios</i>	39
6. Conclusiones.....	41
7. Recomendaciones	42
Referencias bibliográficas.....	43

Lista de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	22
Figura 2 Reología tubería corrugada Actual vs Alphagary.....	24
Figura 3 Curvas reológicas del calcio-zinc para tubería convencional	25
Figura 4 Reología accesorios Actual vs Alphagary (ensayo 1).	27
Figura 5 Reología accesorios Actual vs Alphagary (ensayo 2)	27

Lista de tablas

Tabla 1 Organización de los ensayos de materia prima.	14
Tabla 2 Matriz experimental para tubería corrugada novafort.	16
Tabla 3 Matriz experimental para sanitaria amarilla tubería convencional.	17
Tabla 4 Matriz experimental para accesorios de sanitaria amarilla.	18
Tabla 5 Condiciones de los ensayos realizados en el plastógrafo.	18
Tabla 6 Referencias de productos seleccionados para evaluación en planta según formulación.	19
Tabla 7 Datos reológicos de los puntos A y D para tubería corrugada.	24
Tabla 8 Datos reológicos de los puntos A y D para tubería convencional.	26
Tabla 9 Datos reológicos de los puntos A y D para accesorios.	28
Tabla 10 Resultados de las curvas reológicas de fusión y estabilidad en las formulaciones de Novafort.	30
Tabla 11 Resultados de las curvas reológicas de fusión y estabilidad de las fórmulas de tubería sanitaria amarilla.	31
Tabla 12 Resultados de las curvas reológicas de fusión y estabilidad para accesorios de sanitaria amarilla.	32
Tabla 13 Resultados de los ajustes realizados en los ensayos de Novafort de planta.	34
Tabla 14 Resultados de los ajustes realizados en los ensayos de sanitaria amarilla en planta.	35
Tabla 15 Condiciones de inyección para los ensayos de sanitaria amarilla en planta.	37
Tabla 16 Condiciones de carga en inyectora para el ensayo de accesorio Sanitaria amarilla en planta.	37

Resumen

Título: Evaluación del impacto del paquete de estabilizantes Alphagary en la eficiencia productiva y calidad de tuberías y accesorios de PVC en PAVCO WAVIN.*

Autor: Natalia Andrea Nieto Rodríguez**

Palabras Clave: Estabilizantes térmicos, calcio-zinc, formulación, optimización.

Descripción: Este proyecto tiene como objetivo optimizar las formulaciones de PVC en PAVCO WAVIN mediante la implementación de estabilizantes térmicos de calcio-zinc (Ca-Zn) suministrados por Alphagary, reduciendo costos y mejorando la eficiencia productiva. La transición responde a normativas ambientales internacionales como REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) y RoHS (Restriction of Hazardous Substances), que restringen el uso de metales pesados en la industria del PVC.

Aunque para 2023 el 80% de la producción ya incorporaba estabilizantes Ca-Zn (Calcio-zinc), surgieron desafíos como la disminución del rendimiento, el aumento del desperdicio (SCRAP) y el sobrepeso de los productos. Para solucionar estos problemas, el proyecto busca ajustar las formulaciones con estabilizantes térmicos de Alphagary, garantizando calidad y desempeño. Además, fortalecerá la verticalidad en la producción al contar con un proveedor dentro del grupo Orbia, reduciendo costos y asegurando el suministro de materia prima. Desarrollado en Colombia, este proyecto aspira a generar resultados replicables en otras empresas de Orbia a nivel internacional, promoviendo sostenibilidad y competitividad en la fabricación de tuberías y accesorios de PVC.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Fernando Viejo Abrante, PhD en Ciencia y Tecnología de los materiales. Tutor: Víctor Hugo Becerra Puerto, Ingeniero Industrial

Abstract

Title: Evaluation of the impact of the Alphagary stabilizer package on the production efficiency and quality of PVC pipes and fittings at PAVCO WAVIN.*

Author: Natalia Andrea Nieto Rodríguez**

Keywords: Thermal stabilizers, calcium-zinc, formulation, optimization.

Description: This project aims to optimize PVC formulations at PAVCO WAVIN by implementing calcium-zinc (Ca-Zn) thermal stabilizers supplied by Alphagary, reducing costs and improving production efficiency. The transition responds to international environmental regulations such as REACH (Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals) and RoHS (Restriction of Hazardous Substances), which restrict the use of heavy metals in the PVC industry.

Although by 2023, 80% of production already incorporated Ca-Zn (calcium-zinc) stabilizers, challenges arose such as decreased yield, increased waste (SCRAP), and product overweight. To solve these problems, the project seeks to adjust the formulations with Alphagary thermal stabilizers, ensuring quality and performance.

In addition, it will strengthen vertical integration in production by having a supplier within the Orbia group, reducing costs and ensuring the supply of raw materials. Developed in Colombia, this project aims to generate replicable results in other Orbia companies internationally, promoting sustainability and competitiveness in the manufacture of PVC pipes and fittings.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Fernando Viejo Abrante, PhD in Materials Science and Technology. Tutor: Victor Hugo Becerra Puerto, Industrial Engineer

1. Introducción

La producción anual de cloruro de polivinilo (PVC) a nivel mundial supera los 44 millones de toneladas, consolidándose como uno de los polímeros más utilizados por su versatilidad y amplia aplicación en diferentes industrias (Energy Cycle, 2024). En Colombia, Pavco Wavin destaca como uno de los principales productores de PVC, con una capacidad de fabricación aproximada de 18.9 millones de toneladas anuales (Pavco, 2023).

Pavco Wavin, con una trayectoria que se remonta a 1962 bajo el nombre Pavco, forma parte desde 2019 del grupo global Orbia, anteriormente conocido como Mexichem (Orbia, 2019). La marca Wavin, pionera en la fabricación de tuberías de presión en PVC desde 1955 en Holanda, cuenta con más de 60 años de experiencia en sistemas para conducción de agua potable, alcantarillado, manejo de aguas lluvias y proyectos sostenibles a nivel mundial (Wavin, 2023). En Colombia, Pavco Wavin opera con plantas de producción en Bogotá y Guachené, y se posiciona como un referente en innovación, calidad y sostenibilidad, promoviendo procesos alineados con la economía circular (Pavco, 2023).

El PVC es un material ampliamente utilizado por sus propiedades y versatilidad, pero presenta limitaciones de estabilidad térmica que requieren el uso de estabilizantes térmicos. Tradicionalmente, estos han incluido compuestos a base de metales pesados como plomo y cadmio, cuya toxicidad ha motivado regulaciones internacionales para su eliminación (Sánchez & Chirinos, 2014). Como alternativa, la industria ha adoptado estabilizantes de calcio-zinc, que son más amigables con el medio ambiente (Comisión de las Comunidades Europeas, 2000).

Desde 2021, Pavco Wavin ha impulsado la transición hacia estabilizantes de calcio-zinc, integrándolos en sus procesos productivos para 2023. No obstante, este cambio ha traído retos como la reducción en el rendimiento, aumento del desperdicio (SCRAP) y sobrepeso en los

productos, debido a las variaciones en la formulación y los aditivos presentes en los paquetes suministrados por distintos proveedores (Pavco, 2023).

Con la intención de optimizar costos y asegurar la continuidad en la calidad de sus productos, Pavco Wavin está evaluando el impacto que tiene la implementación del paquete de estabilizantes de calcio-zinc suministrado por Alphagary, empresa afiliada al grupo Orbia. Esto implica adaptar el nuevo estabilizante a las formulaciones existentes de tuberías convencionales, corrugadas y accesorios de PVC, con la expectativa de mejorar la eficiencia del proceso productivo y el desempeño del producto final.

¿De qué manera impacta la implementación del paquete de estabilizantes de calcio-zinc suministrado por Alphagary en la eficiencia del proceso productivo, calidad y desempeño de las formulaciones de tuberías y accesorios de PVC en Pavco Wavin?

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar el impacto del paquete de estabilizantes suministrado por Alphagary en la eficiencia del proceso productivo, calidad y el desempeño en diferentes formulaciones para tuberías y accesorios de PVC.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el impacto del estabilizante de calcio-zinc de Alphagary en las propiedades térmicas (tiempo de estabilidad de las formulaciones de PVC, en comparación con las formulaciones actuales.
- Determinar la concentración óptima de estabilizante Calcio-zinc de Alphagary en formulaciones de PVC para mejorar su procesabilidad y vida útil, mediante la evaluación de parámetros reológicos.
- Escalar a nivel planta piloto la formulación de PVC que, según los resultados de laboratorio, presente mejor desempeño en términos de procesabilidad y propiedades finales, ajustando los parámetros de proceso de extrusión e inyección para obtener productos de calidad.
- Validar que los tubos y accesorios producidos con las nuevas formulaciones cumplan con los estándares de calidad con mejoras en las condiciones de procesabilidad, sin comprometer la calidad y el desempeño del producto final.

3. Marco Conceptual

3.1. Cloruro de Polivinilo (PVC)

El cloruro de polivinilo (PVC) es un polímero ampliamente utilizado en diversas industrias debido a su versatilidad, resistencia y bajo costo de producción. Se emplea en la fabricación de tuberías, accesorios, materiales de construcción, embalajes y productos médicos. Sin embargo, su estabilidad térmica limitada requiere el uso de estabilizantes para evitar su degradación durante el procesamiento y la vida útil del producto. (*Lamnawar et al. 2013*)

3.2. Estabilizantes térmicos en la industria del PVC

El cloruro de polivinilo (PVC) es un polímero termoplástico ampliamente utilizado por su versatilidad, bajo costo y resistencia química. No obstante, presenta una inestabilidad térmica significativa, lo que hace necesario el uso de estabilizantes térmicos que eviten su degradación durante el procesamiento y la vida útil del producto (*Sánchez & Chirinos, 2014*).

Históricamente, los primeros estabilizantes térmicos empleados fueron compuestos a base de plomo y cadmio, conocidos por su alta eficacia. Posteriormente, se introdujeron los estabilizantes organoestánicos, que son compuestos organometálicos donde uno o más grupos orgánicos (basados en carbono) están unidos directamente al átomo central de estaño (Sn). Estos estabilizantes, como los derivados de dibutilestaño o metilestaño, ofrecieron importantes ventajas como alta transparencia, buena resistencia térmica y estabilidad al color, por lo que fueron ampliamente utilizados, especialmente en productos rígidos y en aplicaciones en contacto con alimentos (*Rahimi & Bender, 1997*).

No obstante, los compuestos organoestánicos también presentan riesgos toxicológicos, tanto para la salud humana como para el medio ambiente, debido a su potencial de bioacumulación y liberación de estaño. Esto ha motivado una transición hacia alternativas más seguras y sostenibles, como los estabilizantes a base de calcio-zinc, los cuales son libres de metales pesados, compatibles con las regulaciones internacionales y cada vez más utilizados en la industria moderna del PVC (*Wyppych, 2016*).

3.3. Normativas ambientales y sostenibilidad en la industria del PVC

El desarrollo sostenible es un factor clave en la industria del PVC, donde la reducción de emisiones contaminantes y la eliminación progresiva de sustancias peligrosas han llevado a la adopción de normativas ambientales más estrictas. Estas regulaciones buscan reducir el impacto ambiental de los estabilizantes térmicos a base de metales pesados, incentivando el uso de alternativas más seguras como el calcio-zinc.

- Regulación Europea REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)

REACH es una normativa de la Unión Europea implementada en 2007 por la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA). Su objetivo es garantizar un alto nivel de protección para la salud humana y el medio ambiente mediante la evaluación y restricción de sustancias químicas peligrosas. En el contexto del PVC, REACH ha impuesto restricciones al uso de estabilizantes con plomo y estaño, promoviendo la transición hacia compuestos menos tóxicos como los estabilizantes de calcio-zinc (*ECHA, 2007*).

- Directiva RoHS (Restriction of Hazardous Substances)

La Directiva RoHS, vigente en la Unión Europea desde 2003 y actualizada en 2011 (RoHS 2), regula el uso de sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos. Aunque su alcance se centra en estos productos, ha influido en la industria del PVC al limitar la presencia de plomo, mercurio, cadmio y otros metales pesados en materiales industriales, incentivando la búsqueda de alternativas más seguras (*Parlamento Europeo, 2011*).

- Regulación en Estados Unidos: TSCA (Toxic Substances Control Act)

En Estados Unidos, la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA) otorga a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) la autoridad para evaluar y restringir el uso de químicos peligrosos. Si bien no prohíbe directamente los estabilizantes a base de plomo y estaño en PVC, ha impulsado normativas sobre exposición laboral y disposición de residuos que fomentan el uso de alternativas como el calcio-zinc (*EPA, 2023*).

- Regulaciones en América Latina

Países como Brasil, México y Colombia han adoptado marcos regulatorios alineados con las normativas internacionales. En Colombia, por ejemplo, la Resolución 0689 de 2016 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece criterios de seguridad para sustancias químicas utilizadas en la industria, incluyendo restricciones a ciertos estabilizantes metálicos en plásticos (*MADS, 2016*).

4. Metodología

El presente proyecto se desarrolló siguiendo una metodología estructurada en cinco fases principales, orientadas a la caracterización, análisis y validación del uso de estabilizantes en tuberías y accesorios de PVC.

4.1. Fase 1: Caracterización y comparación de estabilizantes

Se realizó un análisis de laboratorio del material de ensayo, tomando como referencia la información presentada en la Tabla 1. Para asegurar la fiabilidad y repetibilidad de los resultados, cada prueba fue ejecutada por duplicado. El material fue clasificado según su aplicación tubería corrugada, tubería convencional o accesorios y, posteriormente, se compararon sus características frente a las del calcio zinc suministrado por Alphagary, con el objetivo de evaluar su comportamiento y definir la formulación más adecuada.

Tabla 1

Organización de los ensayos de materia prima.

ENSAYOS	TUBERÍA CORRUGADOS	TUBERÍA CONVENCIONAL	ACCESORIOS
ACTUAL	Ensayo 1	Ensayo 1	Ensayo 1
	Ensayo 2	Ensayo 2	Ensayo 2
ALPHAGARY	Ensayo 1	Ensayo 1	Ensayo 1
	Ensayo 2	Ensayo 2	Ensayo 2

Para las pruebas de estabilidad térmica en laboratorio, se prepararon mezclas de 300 gramos utilizando una formulación base compuesta por resina PVC, estabilizante térmico, dióxido de titanio, carbonato de calcio, ayuda de proceso y lubricante. El único componente que se modificó fue el tipo de estabilizante térmico, con el fin de evaluar su impacto en el desempeño del material. Las pruebas

fueron realizadas utilizando un plastógrafo Brabender EC Plus. Los resultados que proporciona el plastógrafo son curvas reológicas, las cuales permiten analizar el comportamiento del material. El programa del equipo se ajusta para realizar ensayos de estabilidad térmica mediante el análisis de estas curvas reológicas, empleando parámetros específicos como tiempo de 300 segundos, una velocidad del tornillo de 60 revoluciones por minuto, una temperatura de 190 °C y un tamaño de muestra de 55 gramos. Todas las curvas reológicas se obtuvieron bajo condiciones experimentales uniformes para garantizar la comparabilidad entre las diferentes muestras.

4.2. Fase 2: Preparación de muestras en laboratorio

Con base en los resultados obtenidos durante la Fase 1 y comprendiendo el rol del estabilizante calcio-zinc en la formulación, se diseñaron matrices experimentales diferenciadas según el tipo de aplicación. El propósito de esta etapa fue identificar la combinación óptima de componentes que permitiera alcanzar un desempeño adecuado del material.

Para ello, se elaboraron muestras de aproximadamente 300 gramos en laboratorio para cada una de las formulaciones a evaluar. Posteriormente, se evaluaron las curvas reológicas de fusión y estabilidad térmica de cada formulación. Se compararon tres formulaciones distintas con el objetivo de seleccionar la más eficiente.

En función del tipo de tubería, se definió una formulación específica para cada producto:

- Para tubería corrugada, se estableció la fórmula destinada a “Novafort” de diámetros pequeños.
- Para tubería convencional, se definió la formulación correspondiente a “tubería sanitaria amarilla”.
- Para accesorios, se seleccionó la fórmula para “accesorios de sanitaria amarilla”.

Con el fin de optimizar las formulaciones y mejorar su desempeño, se incorporaron aditivos adicionales, buscando identificar cuáles ofrecían una mejor sinergia según la aplicación específica. Esta estrategia tuvo como finalidad obtener el mejor rendimiento posible de la formulación durante los ensayos en planta. Las concentraciones de los aditivos se expresaron en unidades de *PHR* (*Parts per Hundred Resin*), una unidad de medida ampliamente utilizada en la industria del plástico. Esta representa la cantidad en peso de cada componente en relación con cien partes en peso de resina base (por ejemplo, PVC). Este sistema de referencia permite estandarizar las formulaciones y facilitar su ajuste y comparación, manteniendo constante la proporción de resina, sin importar el tamaño del lote o la escala de producción.

4.2.1. Tubería corrugada

Se elaboró una matriz experimental para tubería corrugada, enfocada en formulaciones destinadas a productos Novafort de diámetros pequeños.

Tabla 2

Matriz experimental para tubería corrugada novafort.

Fórmula	Estabilizante	Concentración [PHR]	Observación [PHR]
Patrón	Actual	3,3	
Ensayo 1	Alphagary	3,3	
Ensayo 2	Alphagary	3,5	-CA _d
Ensayo 3	Alphagary	4	-CA _d
Ensayo 4	Alphagary	4,5	-CA _d
Ensayo 5	Alphagary	5	+0,1 CP _o
Ensayo 6	Alphagary	3,5	+0,2 CP _a
Ensayo 7	Alphagary	3,5	+0,3 CP _a
Ensayo 8	Alphagary	3,5	+0,3 CP _a +0,3 CA _d

Debido a la complejidad de la formulación base, fue necesario realizar ajustes en la dosificación de algunos aditivos como ceras polietilénica (CPo), parafínica (CPa) y aditivada (CAAd), en determinadas variantes. Estos ajustes tuvieron como objetivo optimizar la formulación general y evaluar el comportamiento del material con los ajustes de formulación (Tabla 2).

4.2.2. Tubería convencional

Se elaboró una matriz experimental para la tubería convencional, tomando como base la formulación utilizada en la tubería sanitaria amarilla. Los ajustes realizados se enfocaron exclusivamente en la concentración del estabilizante térmico, dado que se trata de una formulación más sencilla, cuya procesabilidad no presenta un alto grado de complejidad (Tabla 3).

Tabla 3

Matriz experimental para sanitaria amarilla tubería convencional.

Fórmula	Estabilizante	Concentración [PHR]
Patrón	Actual	2,8
Ensayo 1	Alphagary	2,8
Ensayo 2	Alphagary	2,7
Ensayo 3	Alphagary	2,6

4.2.3. Accesorios

Se diseñó una matriz experimental para accesorios de sanitaria amarilla, ajustando componentes clave como ayuda de proceso (AP), modificador de impacto (MI), cera aditivada (CAAd) y co-estabilizante (CE), debido a los requerimientos específicos del material (Tabla 4).

Tabla 4

Matriz experimental para accesorios de sanitaria amarilla.

Fórmula	Estabilizante	Concentración [PHR]	Observación [PHR]
Patrón	Actual	5	
Ensayo 1	Alphagary	6	+AP-0,3 MI-0,1 CAd
Ensayo 2	Alphagary	5	-0,1CAd
Ensayo 3	Alphagary	6,5	0,8AP-CAd
Ensayo 4	Alphagary	6,15	-AP-CAd
Ensayo 5	Alphagary	5,8	+0,5CE-0,3 CAd
Ensayo 6	Alphagary	6,5	+0,5CE-AP+0,3 CAd

4.3. Fase 3: Análisis reológico

En esta etapa se realiza el análisis de las curvas reológicas obtenidas a partir de los ensayos correspondientes a las matrices experimentales. Estas pruebas se llevaron a cabo utilizando un plastógrafo Brabender EC PLUS, equipo que permite evaluar el comportamiento del material durante el proceso de fusión y su estabilidad térmica bajo condiciones controladas mostradas en la Tabla 5. Se realizaron dos tipos de pruebas reológicas: curvas de fusión y curvas de estabilidad térmica.

Tabla 5

Condiciones de los ensayos realizados en el plastógrafo.

Ensayo	Tiempo [s]	Velocidad [RPM]	Temperatura [°C]
Fusión	300	60	180
Estabilidad	1800	60	190

El análisis de las curvas reológicas de fusión permite evaluar las características de plastificación del material. A través de estas curvas, se obtuvo información clave sobre las condiciones de tiempo, torque y temperatura a las cuales el material comienza a fundirse adecuadamente. Además, este ensayo posibilitó una inspección visual del material una vez plastificado, lo cual proporcionó indicios sobre su homogeneidad y la dispersión de los aditivos.

Por otro lado, el análisis de las curvas reológicas de estabilidad térmica brindó información sobre el comportamiento del material ante condiciones prolongadas de calor. Estas curvas permitieron identificar el punto en el que se inicia la degradación térmica, proporcionando datos sobre el tiempo, el torque y la temperatura asociados a la degradación del material. Esta información fue fundamental para evaluar la resistencia térmica de la formulación durante el procesamiento.

4.4. Fase 4: Escalado a planta y ensayo piloto

En esta etapa, y con base en las formulaciones previamente definidas para su evaluación en planta, se procedió a la mezcla de una tonelada de material por formulación. Posteriormente, se seleccionaron las extrusoras y la inyectora adecuada para realizar los ensayos, de acuerdo con las características del producto y la disponibilidad operativa. Considerando la programación de producción de la planta, se establecieron los productos específicos sobre los cuales se aplicarían las pruebas. Estos productos fueron seleccionados como representativos de cada tipo de aplicación: tubería convencional, tubería corrugada y accesorios. La tabla 6 muestra el detalle de los productos ensayados, junto con la formulación utilizada y su respectiva descripción.

Tabla 6

Referencias de productos seleccionados para evaluación en planta según formulación.

Producto	Fórmula de producto	Referencia de producto	Descripción
Accesorio Tubería	Sanitaria amarilla	YEE 2"	Accesorio tipo Yee de dos pulgadas
convencional	Sanitaria amarilla	4 "	Tubo liso de cuatro pulgadas
Tubería corrugada	Novafort diámetro pequeño	250mm	Tubo corrugado de doscientos cincuenta milímetros

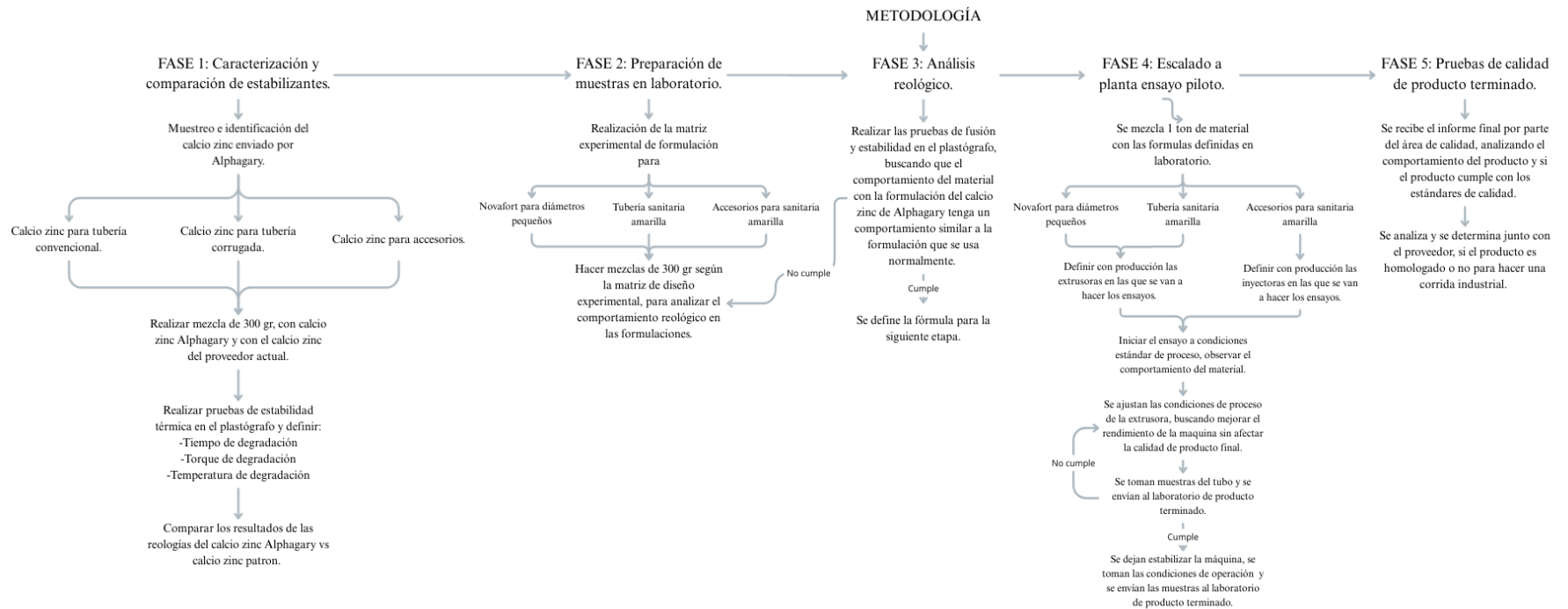
Los ensayos en planta se llevaron a cabo considerando las variables específicas de cada máquina como temperatura masa, presión de masa, velocidad de tornillo para extrusión, velocidad de inyección y perfil de calentamiento, las cuales pueden influir directamente en el comportamiento del material durante el procesamiento. El objetivo principal de esta etapa fue evaluar la procesabilidad del material en condiciones reales de producción y compararla con el comportamiento del material actualmente utilizado. Se buscó que la nueva formulación ofreciera un rendimiento superior, o al menos una mejor procesabilidad mediante la optimización de las variables de máquina. Durante estos ensayos, se consideraron posibles incidencias como bajo rendimiento, sobrepeso de material o dificultades en la plastificación. Por ello, se puso especial atención en ajustar las condiciones operativas para lograr un procesamiento estable, eficiente y con buena calidad de producto final.

4.5. Fase 5: Pruebas de calidad del producto terminado

En esta etapa, y tomando en cuenta los resultados del análisis de calidad, se evaluó si el material cumplía con las especificaciones establecidas. Se realizó un análisis general del comportamiento del material a lo largo de todos los ensayos, considerando inicialmente el cumplimiento de la calidad del producto terminado. Posteriormente, se analizó el desempeño del material en la máquina y su procesabilidad. Si ambos aspectos cumplen con los requisitos, se procedió a realizar un análisis con el proveedor y planificar una corrida larga industrial.

En la Figura 1 se muestra un resumen de manera esquemática de la metodología desarrollada a lo largo del proyecto.

Figura 1
Diagrama de flujo de la metodología del proyecto



5. Resultados

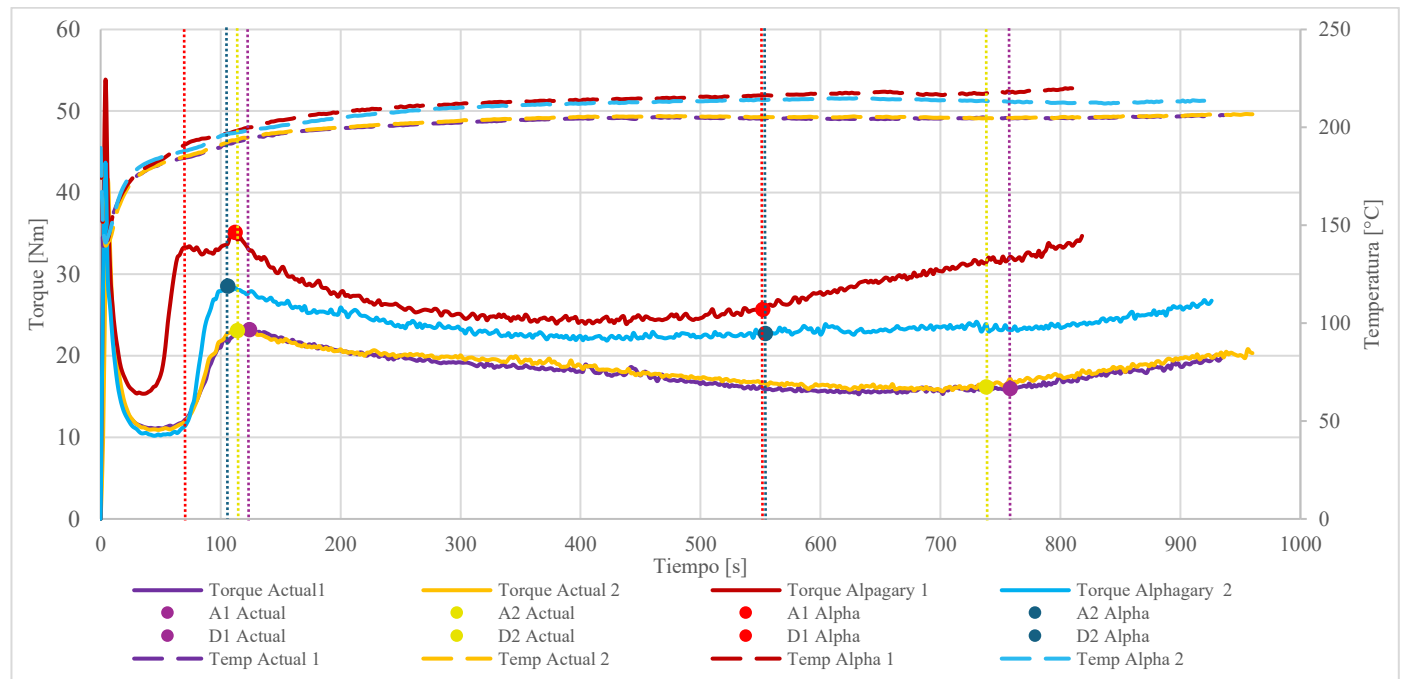
5.1. Fase 1. Caracterización y comparación de los estabilizantes

Durante el análisis de las curvas reológicas del paquete estabilizante calcio-zinc de Alphagary, se evaluó la estabilidad térmica del material mediante las curvas obtenidas en el plastógrafo, con el objetivo de determinar la resistencia térmica que este estabilizante aportó en las formulaciones durante el procesamiento de los diferentes productos de PVC. Para identificar los puntos críticos de comportamiento térmico, se determinaron el punto A (inicio de plastificación) y el punto D (inicio de degradación térmica) directamente sobre las curvas de torque versus tiempo. Estos puntos se localizaron observando cambios significativos en el torque durante el aumento progresivo de temperatura. El punto A correspondió al inicio de plastificación, momento en el que el torque comenzó a elevarse, indicando que el material empezaba a fundirse y fluir. Por otro lado, el punto D marcó el inicio de la degradación térmica, donde se detectó una caída abrupta o variación negativa en el torque, señalando la descomposición del material. Para determinar con precisión las temperaturas asociadas a estos eventos, se utilizaron líneas verticales sobre la gráfica que permitieron identificar el valor exacto de temperatura en el instante correspondiente.

5.1.1. *Tubería corrugados*

A partir del análisis de las curvas reológicas del paquete de calcio-zinc de Alphagary para tubería corrugada, se obtuvieron los resultados de estabilidad térmica a partir de los puntos A y D de la curva. La figura 2 presenta la comparación de los ensayos realizados, lo que permite observar las variaciones en el comportamiento térmico del estabilizante.

Figura 2
Reología tubería corrugada Actual vs Alphagary.



De las curvas reológicas se obtuvieron los valores de torque, temperatura y tiempo en los puntos A (fusión) y D (degradación) para cada ensayo, los cuales se registran en la Tabla 7.

Tabla 7

Datos reológicos de los puntos A y D para tubería corrugada.

PUNTOS Ensayos	A			D		
	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]
Actual 1	124	23,2	194,4	758	16	204,7
Alphagary 1	112	35,13	198	552	25,7	216,3
Actual 2	114	23,1	193,8	738	16,2	204,7
Alphagary 2	106	28,56	198,7	554	22,75	216,1

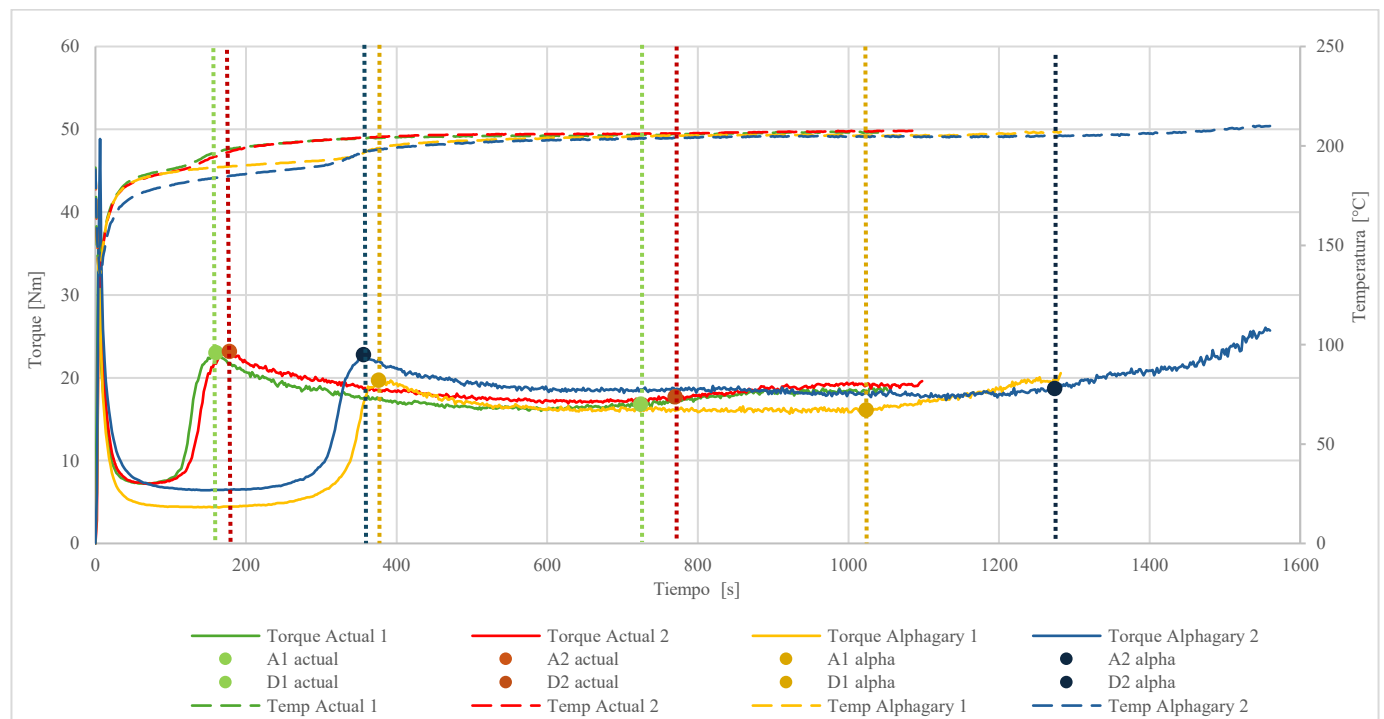
En el punto A (inicio de fusión), el estabilizante Alphagary presenta tiempos de fusión más cortos (112 y 106 segundos) en comparación con el estabilizante actual (124 y 114 segundos). Sin embargo, Alphagary requiere un mayor torque (28,56 a 35,13 Nm) y temperaturas más altas (198

°C aproximadamente) durante este proceso, lo que indica un mayor esfuerzo de cizallamiento y temperatura para iniciar la plastificación. En el punto D, el estabilizante Alphagary presenta un inicio de degradación térmica más temprano (552-554 s) que el estabilizante actual (738-758 s). Sin embargo, Alphagary muestra un mayor torque (22,75-25,7 Nm) y temperaturas más elevadas (~216 °C) en este punto, indicando mayor resistencia mecánica para que se dé la degradación.

5.1.2. Tubería Convencional

Durante el análisis reológico del paquete de calcio-zinc de Alphagary para tubería convencional, se obtienen los resultados de la estabilidad térmica a través de los puntos A y D de la curva de plastificación. La figura 3 presenta la comparación de dos ensayos realizados, permitiendo observar las variaciones en el comportamiento térmico del estabilizante.

Figura 3
Curvas reológicas del calcio-zinc para tubería convencional



De las curvas reológicas se obtuvieron los valores de torque, temperatura y tiempo en los puntos A (fusión) y D (degradación) para cada ensayo, los cuales se registran en la Tabla 8.

Tabla 8

Datos reológicos de los puntos A y D para tubería convencional.

PUNTOS Ensayos	A			D		
	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]
Actual ensayo 1	160	23	196,9	724	16,8	205,6
Alphagary ensayo 1	376	19,7	198,8	1024	16,1	205,1
Actual ensayo 2	178	23,2	197	770	17,7	206,3
Alphagary ensayo 2	356	22,8	196,4	1274	18,7	204,9

En el punto A (inicio de plastificación), el estabilizante Alphagary presenta tiempos significativamente mayores (356-376 s) en comparación con el estabilizante actual (160-178 s), lo que indica un inicio de plastificación más lento. Sin embargo, los valores de torque y temperatura son similares o ligeramente menores para Alphagary, lo que indica que el material requiere un nivel igual o menor de esfuerzo mecánico para iniciar la plastificación, a pesar de que el proceso tarda más tiempo en comenzar.

En el punto D (inicio de degradación térmica), Alphagary muestra una mayor resistencia térmica, con tiempos prolongados (1024-1274 s) frente a los del estabilizante actual (724-770 s), mientras que torque y temperatura se mantienen similares en ambos casos. Esto evidencia una mejor estabilidad térmica para la formulación Alphagary.

5.1.3. Accesorios PVC

A partir del análisis reológico del paquete de calcio-zinc de Alphagary para accesorios, se obtuvieron los resultados de la estabilidad térmica a través de los puntos A y D de la curva de

plastificación. Las figuras 4 y 5 presentan la comparación de dos ensayos realizados, permitiendo observar las variaciones en el comportamiento térmico del estabilizante.

Figura 4
Reología accesorios Actual vs Alphagary (ensayo 1).

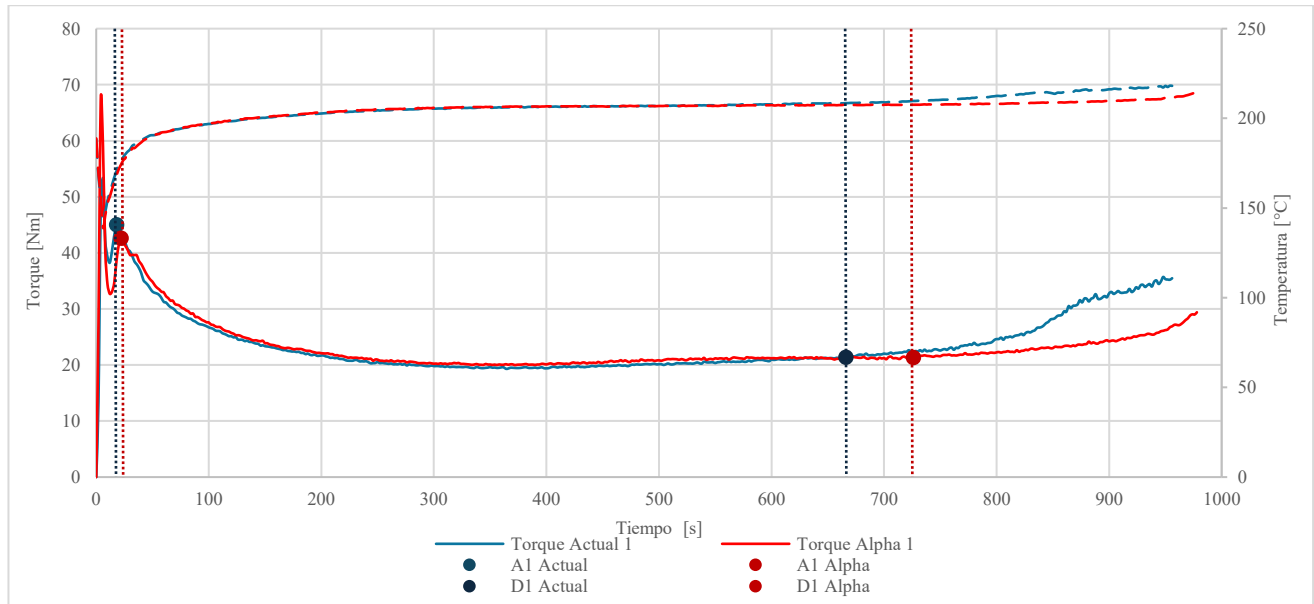
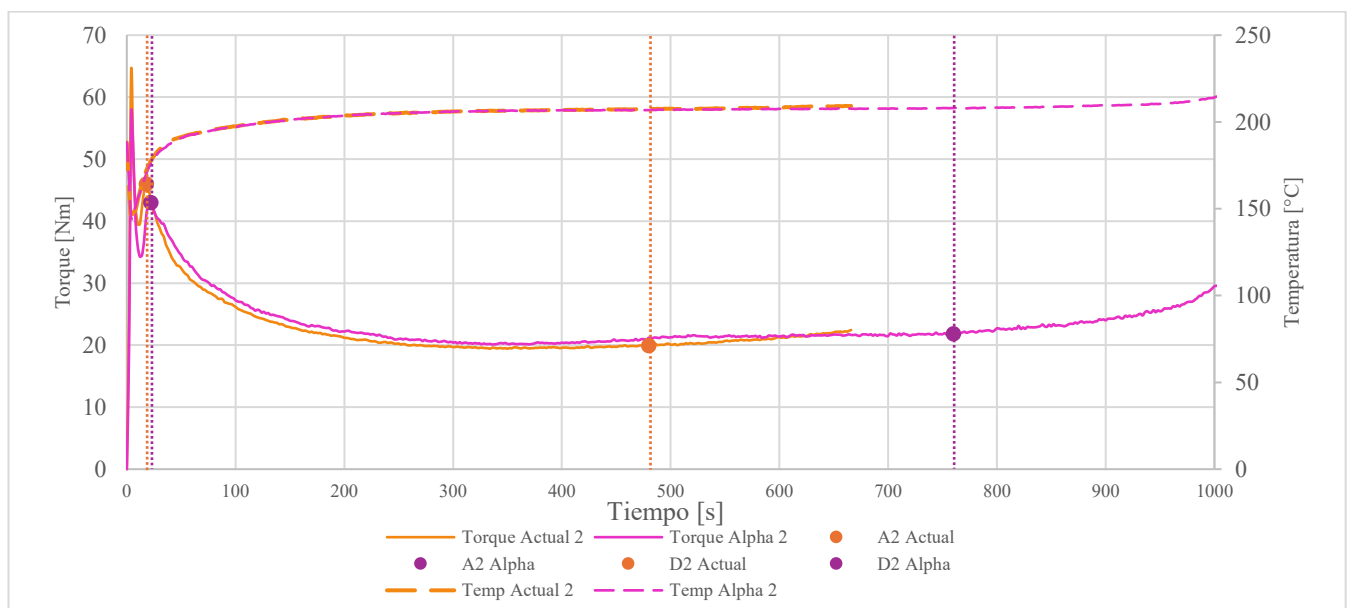


Figura 5
Reología accesorios Actual vs Alphagary (ensayo 2).



De las curvas reológicas se obtuvieron los valores de torque, temperatura y tiempo en los puntos A (fusión) y D (degradación) para cada ensayo, los cuales se registran en la Tabla 9.

Tabla 9

Datos reológicos de los puntos A y D para accesorios.

PUNTOS Ensayos	A			D		
	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]
Actual ensayo 1	18	45	170,6	666	21,4	208,5
Alphagary ensayo 1	22	42,6	174,2	726	21,3	207,6
Actual ensayo 2	18	46	172,2	480	19,9	207,5
Alphagary ensayo 2	22	43	176	760	21,8	208

En el punto A (inicio de plastificación), los tiempos registrados para la formulación actual son de 18 segundos en ambos ensayos, mientras que para Alphagary son ligeramente mayores, con 22 segundos. En cuanto al torque, la formulación actual presenta valores de 45 y 46 Nm, comparados con valores ligeramente menores para Alphagary de 42,6 y 43 Nm. Las temperaturas en este punto también son algo más altas para Alphagary, con 174,2 °C y 176 °C frente a 170,6 °C y 172,2 °C del estabilizante actual. Estos resultados sugieren que Alphagary inicia la plastificación un poco más tarde, con un esfuerzo mecánico ligeramente inferior, pero a temperaturas más elevadas.

En el punto D (inicio de degradación térmica), Alphagary muestra tiempos mayores, 726 y 760 segundos, en comparación con los 666 y 480 segundos de la formulación actual, indicando una mejor estabilidad térmica. Los valores de torque son similares entre ambos estabilizantes, con ligeras variaciones alrededor de 21 Nm. Las temperaturas en este punto son prácticamente iguales, con Alphagary en torno a 207,6 °C y 208 °C, y el estabilizante actual cerca de 208,5 °C y 207,5 °C.

5.2. Fase 3. Análisis reológico

La información obtenida en esta etapa permitió establecer comparaciones entre las formulaciones desarrolladas con el paquete estabilizante a base de calcio-zinc suministrado por Alphagary y la formulación patrón actualmente utilizada en planta. Los ensayos se diseñaron para evaluar el comportamiento del material en función de dos parámetros reológicos clave: la fusión del compuesto y su estabilidad térmica. El objetivo fue identificar tendencias en el desempeño del estabilizante y determinar su impacto sobre las propiedades finales de cada formulación. A partir de las curvas reológicas de fusión y estabilidad obtenidas, se recopilaron datos de tiempo, torque y temperatura, los cuales fueron fundamentales para analizar y comprender el comportamiento del material durante el procesamiento.

En particular, la curva de fusión permitió determinar las características del punto de plastificación de cada formulación evaluada. De igual forma, los valores registrados facilitaron la identificación de las condiciones iniciales de degradación térmica del material, información esencial para establecer parámetros de procesamiento adecuados que aseguren la estabilidad y calidad del compuesto final.

5.2.1. *Tubería corrugada*

Con respecto a la tubería corrugada se evaluaron ocho formulaciones desarrolladas para productos Novafort de diámetro pequeño, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Resultados de las curvas reológicas de fusión y estabilidad en las formulaciones de Novafort.

Fórmula	Resultado de fusión			Resultado de estabilidad		
	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]
Patrón	61,80	44,35	186	444,0	25,02	214
Ensayo 1	37,80	55,90	185	294,0	26,34	217
Ensayo 2	25,80	56,62	181	319,8	31,25	216
Ensayo 3	30,00	54,96	183	337,8	31,50	217
Ensayo 4	36,00	54,03	183	364,2	29,43	216
Ensayo 5	37,80	49,87	184	378,0	27,40	215
Ensayo 6	38,40	51,96	185	330,0	29,28	216
Ensayo 7	34,20	52,74	184	340,2	29,57	217
Ensayo 8	55,80	47,11	191	334,2	28,75	216

En la etapa de fusión, la formulación patrón mostró un tiempo de 61,8 segundos, torque de 44,35 Nm y temperatura de 186 °C. Las formulaciones modificadas presentaron tiempos de fusión menores, destacando el Ensayo 2 con el tiempo más corto (25,8 segundos), lo que mejora la eficiencia operativa. Aunque su torque de fusión fue alto (56,62 Nm), está dentro de los límites aceptables, pero requiere un control cuidadoso de la presión y variables de proceso para evitar sobrecargas. La temperatura de fusión del Ensayo 2 fue de 181 °C, ligeramente inferior al patrón, lo que podría reducir el consumo energético. En estabilidad térmica, el patrón resistió 444 segundos antes de degradarse, mientras que el Ensayo 2 presentó 319,8 segundos, suficiente para procesos continuos. Además, su torque durante esta fase se mantuvo estable (31,25 Nm) a 216 °C, indicando buena resistencia térmica.

Se escogió el Ensayo 2 debido a su rápido tiempo de fusión, que mejora la eficiencia operativa, y a su temperatura de fusión ligeramente menor, que puede reducir el consumo energético. Aunque presenta un torque de fusión elevado, este se mantiene dentro de los límites aceptables para

el equipo, siempre que se controlen adecuadamente las condiciones de procesamiento. Además, su estabilidad térmica es suficiente para procesos continuos, garantizando un desempeño confiable en planta.

5.2.2. *Tubería convencional*

Con respecto a la tubería convencional se evaluaron tres formulaciones desarrolladas para productos de sanitaria amarilla, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Resultados de las curvas reológicas de fusión y estabilidad de las fórmulas de tubería sanitaria amarilla

Fórmula	Resultado de fusión			Resultado de estabilidad		
	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]
Patrón	72	47,07	188	408	24,86	212
Ensayo 1	120	38,71	191	444	25,87	212
Ensayo 2	64,2	43,27	188	534	25,79	213
Ensayo 3	88,2	35,67	189	656,4	21,54	210

Analizando los resultados obtenidos de las curvas reológicas de fusión, la formulación patrón presentó un tiempo de plastificación de 72 segundos, un torque de 47,07 Nm y una temperatura de 188 °C. En comparación, el Ensayo 3 mostró un tiempo ligeramente mayor (88,2 segundos), pero con un torque más bajo (35,67 Nm) y una temperatura similar (189 °C), lo que indica menor resistencia al corte y un procesamiento más suave para el equipo. Por otra parte, los resultados de la curva reológica de estabilidad térmica, el ensayo 3 se destacó con un tiempo de 656,4 segundos, significativamente superior al patrón (408 segundos), y un torque bajo de 21,54 Nm, evidenciando buena resistencia a la degradación térmica. La temperatura en esta fase fue de 210 °C, dentro del rango adecuado para mantener la integridad del material. En conjunto, estos resultados posicionan

al ensayo 3 como la formulación más adecuada para correr en planta, al ofrecer un equilibrio favorable entre facilidad de fusión y estabilidad térmica prolongada, ideal para el procesamiento de tubería convencional, en este caso para los productos de tubería sanitaria amarilla

5.2.3. Accesorios

Con respecto a los accesorios se evaluaron seis formulaciones desarrolladas para productos de sanitaria amarilla, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Resultados de las curvas reológicas de fusión y estabilidad para accesorios de sanitaria amarilla

Fórmula	Resultado de fusión			Resultado de estabilidad		
	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Torque [Nm]	Temperatura [°C]
Patrón	7,8	62,91	157	658,2	17,78	205
Ensayo 1	12	60,7	161	406,2	1880	206
Ensayo 2	10,2	66,69	158	384	20,4	206
Ensayo 3	10,2	65,83	160	420	21,34	207
Ensayo 4	10,2	61,49	161	424,2	20,44	206
Ensayo 5	7,8	65,58	160	421,8	20,97	206
Ensayo 6	10,2	56,9	162	445,8	19,13	206

En la fase de fusión, la formulación patrón presentó el menor tiempo (7,8 s), con un torque elevado de 62,91 Nm y una temperatura de 157 °C. Las formulaciones modificadas mostraron tiempos de fusión entre 10,2 y 12 segundos, con excepción del Ensayo 5, que igualó al patrón con 7,8 segundos, indicando una rápida plastificación. Además, este ensayo presentó un torque de 65,58 Nm y una temperatura de 160 °C, valores que, aunque similares al patrón, reflejan un buen comportamiento de procesamiento.

El Ensayo 6 destacó por tener el torque de fusión más bajo (56,9 Nm) y la mayor temperatura de fusión (162 °C), lo que sugiere una menor resistencia al corte y un proceso más fluido. Sin

embargo, su tiempo de fusión fue mayor (10,2 s). Por su parte, el Ensayo 2 registró el torque más alto (66,69 Nm), lo que podría representar una mayor exigencia sobre el sistema de inyección.

En cuanto a la estabilidad térmica, la formulación patrón alcanzó el mayor tiempo antes de degradarse (658,2 s) con un torque de 17,78 Nm, lo que indica excelente resistencia térmica. Entre las formulaciones modificadas, el Ensayo 5 mostró un comportamiento muy favorable, con un tiempo de 421,8 segundos y un torque de 20,97 Nm, dentro del rango óptimo para procesos de inyección, además de mantener la temperatura en 206 °C.

Aunque otros ensayos como el 4 y 6 también alcanzaron buenos niveles de estabilidad (424,2 s y 445,8 s respectivamente), el balance general del Ensayo 5 entre fusión rápida, torque aceptable y buena estabilidad térmica motivó su selección para ser corrido en planta.

5.3. Fase 4: Escalado a planta ensayo piloto

Teniendo en cuenta que en esta etapa se evaluó el comportamiento de las formulaciones seleccionadas directamente en planta, se consideraron variables clave del proceso para cada aplicación. En el caso de los ensayos por extrusión, se monitorearon parámetros como la presión de masa, rendimiento, y la estabilidad del material durante el procesamiento. Por otro lado, en los ensayos realizados en inyectoras, se evaluaron principalmente el tiempo de ciclo y la estabilidad térmica del material durante el llenado y moldeo.

Con base en los resultados obtenidos bajo estas condiciones reales de operación, se realizó un análisis detallado del comportamiento de cada formulación, lo que permitió identificar su viabilidad técnica y desempeño frente a los requisitos del proceso productivo.

5.3.1. *Tubería corrugada*

Se llevó a cabo el ensayo en planta para la producción del producto Novafort de diámetro pequeño (250 mm), empleando la formulación seleccionada con estabilizante Alphagary. El arranque del proceso se realizó inicialmente bajo las condiciones operativas estándar utilizadas con el material convencional (formulación actual). Sin embargo, durante las primeras fases del procesamiento se evidenciaron signos de degradación térmica, lo que llevó a realizar ajustes en los parámetros de operación.

Como acción correctiva, se redujo el perfil de temperatura en 5 °C, ajustándolo de 185–190 °C a un rango de 180–185 °C. Este cambio permitió estabilizar térmicamente el material durante la extrusión. Paralelamente, se incrementó la velocidad del corrugador, lo que favoreció la salida del producto y permitió aumentar el rendimiento de producción, pasando de 420 kg/h a 436 kg/h, como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13

Resultados de los ajustes realizados en los ensayos de Novafort de planta.

Variables	Unidades de medida	Actual	Alphagary
Rendimiento	kg/h	420	436
Dosificador de material	RPM	54	56
Presión de masa	Bar	145	214
Temperatura de masa	°C	180	179
Perfil de temperaturas	°C	185-190	180-185

Se registraron variaciones en parámetros clave del proceso: la presión de masa aumentó de 145 bar a 214 bar debido al comportamiento reológico de la nueva formulación, aunque permaneció dentro de los límites operativos. La temperatura de masa se mantuvo estable (180 °C en el material

actual frente a 179 °C en Alphagary), indicando una adecuada transferencia térmica. El dosificador operó ligeramente por encima del valor habitual (56 RPM vs. 54 RPM), acorde con el aumento del rendimiento.

En conjunto, estos resultados muestran que, tras los ajustes realizados, la formulación Alphagary permitió un procesamiento estable sin señales de degradación térmica, optimizando el rendimiento sin comprometer la calidad del producto final. Esto valida su viabilidad técnica para la producción industrial de tubería Novafort de 250 mm. Además, la mayor presión de masa y torque registrado en máquina concuerdan con los resultados de laboratorio, evidenciando una menor resistencia térmica reológica de Alphagary en comparación con el material actual, lo que explica la tendencia a la degradación.

5.3.2. Tubería convencional

Durante los ensayos en planta con formulaciones estabilizadas de Alphagary para la tubería lisa sanitaria amarilla de 2" (pulgadas), se realizaron varios ajustes en la máquina antes del corte de muestras, con el objetivo de optimizar las condiciones de proceso. Estos ajustes incluyeron la modificación de la velocidad del husillo y del puller, la dosificación del material, así como el control de presión y temperatura de masa (Tabla 14).

Tabla 14

Resultados de los ajustes realizados en los ensayos de sanitaria amarilla en planta.

Variables	Unidades de medida	Actual	Alphagary 1	Alphagary 2	Alphagary 3	Alphagary 4
Velocidad del tornillo	Rpm	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5
Velocidad del puller	Rpm	8,4	8,4	8,4	8,4	9,3
Dosificación del material	Rpm	50,9	51	54	57	57
Presión de masa	Bar	181,1	171,2	166,5	165,4	163
Temperatura de masa	°C	180,9	180,1	179,5	178,9	178,3

Rendimiento	Kg/h	610	626	626	626	714
-------------	------	-----	-----	-----	-----	-----

Observando los ajustes que se hicieron, se mantuvo constante la velocidad del tornillo (25,5 rpm), permitiendo evaluar el comportamiento del material bajo condiciones estables. Se observó una mejora en la dosificación, que aumentó progresivamente de 51 a 57 rpm frente a los 50,9 rpm del material actual, lo cual permitió incrementar el rendimiento de 610 kg/h hasta un máximo de 714 kg/h en el último ajuste. Esto representa una mejora del 17% en productividad.

La presión de masa presentó una disminución progresiva, pasando de 171,2 a 163 bar, en comparación con los 181,1 bar registrados con el material actual. Este comportamiento refleja una menor resistencia al flujo y un mejor desempeño reológico de la formulación Alphagary. Aunque inicialmente se esperaba un aumento significativo en la presión teniendo en cuenta los resultados de laboratorio debido al incremento en el rendimiento, esta variable se mantuvo controlada, lo cual evidencia una adecuada compensación del sistema.

Por su parte, la temperatura de masa se mantuvo estable, con valores entre 180,1 °C y 178,3 °C, sin indicios de degradación térmica. Finalmente, la velocidad del puller se incrementó levemente en el último ajuste (9,3 rpm), lo cual está en consonancia con el aumento del rendimiento.

5.3.3. Accesorios

Se realizaron ensayos en planta para evaluar el comportamiento de la formulación Alphagary en la producción de accesorios mediante proceso de inyección, comparándola con el material estándar actualmente utilizado. A diferencia de los productos fabricados por extrusión, en este caso el parámetro más relevante es el tiempo de ciclo, ya que una reducción en este valor se traduce directamente en un incremento de la productividad. Por tanto, los ajustes durante los ensayos se

enfocaron en optimizar este tiempo sin comprometer la estabilidad del material ni la calidad del producto final.

Tabla 15

Condiciones de inyección para los ensayos de sanitaria amarilla en planta.

Condiciones de inyección	Unidades de medida	Actual	Alphagary
Posición set	mm	60-94	60-94
Presión set	Bar	65-90	65-90
Flujo set	mm/s	7.7 to 9.9	4 to 16

Tabla 16

Condiciones de carga en inyectora para el ensayo de accesorio Sanitaria amarilla en planta.

Condiciones de carga	Unidades de medida	Actual	Alphagary
Posición set	mm	25-93	20-100
Presión set	Bar	90	90
Flujo set	mm/s	30-33	27
Contrapresión set	Bar	8	10
Temperatura	°C	157-180	175-195
Tiempo de ciclo	s	45	53,5

En las condiciones de inyección, se mantuvieron constantes la posición y la presión de inyección, pero se observó un rango más amplio en el flujo de inyección con Alphagary (4–16 mm/s vs. 7,7–9,9 mm/s), lo que indica mayor flexibilidad del material durante el llenado del molde.

Respecto a las condiciones de carga, Alphagary permitió un recorrido más amplio (20–100 mm frente a 25–93 mm) y operó con un flujo ligeramente menor (27 mm/s), lo que sugiere una

fusión más controlada. La contrapresión aumentó levemente (de 8 a 10 bar), y la temperatura del proceso también fue más alta (175–195 °C frente a 157–180 °C), acorde con las necesidades del nuevo estabilizante.

El tiempo de ciclo se incrementó de 45 a 53,5 segundos, lo cual resultó desfavorable para el proceso, ya que implica una reducción en la productividad. Adicionalmente, se observó delaminación en la pared interna y externa del accesorio. A pesar de estas observaciones, se decidió enviar las muestras al laboratorio de producto terminado para su evaluación.

5.4. Fase 5: Pruebas de calidad de producto terminado

En esta etapa se realizó el análisis del comportamiento del producto terminado correspondiente a los ensayos efectuados con la formulación con calcio-zinc de Alphagary para los diferentes productos. El objetivo principal fue verificar que los productos obtenidos con las formulaciones cumplieran con los requisitos establecidos por las normas de calidad que regulan los productos fabricados por la empresa. Este análisis permitió evaluar la viabilidad técnica del nuevo material no solo en términos de procesamiento, sino también en cuanto al desempeño y conformidad del producto final frente a los estándares internos y normativos vigentes.

5.4.1. Tubería corrugada

Para la tubería corrugada, el producto terminado de Novafort diámetro pequeño de 225 mm debe cumplir con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 3722-3, la cual especifica las condiciones que deben cumplir las tuberías plásticas estructuradas. Como parte de los ensayos realizados por el laboratorio de calidad, se verificó tanto el cumplimiento dimensional del tubo como su desempeño en diversas pruebas físico-mecánicas, entre ellas: resistencia al diclorometano, resistencia al calor, rigidez del anillo, flexibilidad del anillo y resistencia al impacto.

Estas evaluaciones son fundamentales para asegurar la calidad, durabilidad y funcionalidad del producto en condiciones reales de instalación y operación.

Como resultado, el laboratorio de calidad concluyó que la formulación evaluada en el producto Novafort diámetro pequeño de 255 mm presenta buena procesabilidad, un formado adecuado del tubo, y cumple con todos los requisitos exigidos por la NTC 3722-3, lo que valida su viabilidad técnica para la producción de tubería corrugada conforme a los estándares normativos.

5.4.2. Tubería convencional

En el análisis realizado para la tubería convencional, específicamente para la tubería sanitaria amarilla de 2” pulgadas, se verificó el cumplimiento de la Norma Técnica Colombiana NTC 1087. Esta norma establece requisitos específicos en cuanto a dimensiones, ensayos mecánicos como el aplastamiento transversal, resistencia al impacto, así como ensayos químicos que incluyen resistencia a la acetona, resistencia al diclorometano y absorción de agua.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio, la tubería fabricada con calcio zinc de Alphagary cumple satisfactoriamente con todos los parámetros y requisitos estipulados en la NTC 1087. No obstante, se identificó una observación relacionada con el acabado del producto final.

Específicamente, se recomendó mejorar la tonalidad del color, dado que la muestra presentó una tonalidad en comparación con el producto de línea.

5.4.3. Accesorios

Para el caso de los accesorios, se realizaron los ensayos correspondientes sobre el producto tipo *Yee* de 2” pulgadas de sanitaria amarilla. Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de producto terminado, donde se evaluó el cumplimiento de los requisitos establecidos en la Norma

Técnica Colombiana NTC 1341. Esta norma exige que el material cumpla con los ensayos de calidad del moldeo, resistencia al impacto y resistencia química.

A pesar de la presencia de delaminación interna y externa en el accesorio, este cumple con los requisitos establecidos por la NTC 1341. La delaminación observada se asoció a las condiciones del proceso durante el moldeo, lo que indica que no se alcanzaron los parámetros óptimos necesarios para evitar este defecto en el producto terminado. Adicionalmente, se reportó una perforación en el punto de inyección del accesorio, atribuida a la dificultad para estabilizar el proceso de fabricación.

6. Conclusiones

La implementación del estabilizante térmico calcio-zinc de Alphagary en las formulaciones de PVC para tubería corrugada y tubería convencional en Pavco Wavin demostró ser una posible solución efectiva para mejorar la eficiencia productiva y la calidad del producto final.

Los resultados obtenidos en laboratorio y planta confirmaron que las formulaciones de tubería corrugada y convencional con Alphagary ofrecen mejor procesabilidad y mayor estabilidad térmica, alcanzando un desempeño técnico superior al de las formulaciones actuales. Las mejoras más significativas se observaron en el Ensayo 2 para tubería corrugada y en el Ensayo 3 para tubería convencional.

Sin embargo, en la formulación para accesorios no se logró una procesabilidad adecuada del material, y no se evidenciaron mejoras en el tiempo de ciclo ni en la apariencia final del producto, a diferencia de lo observado en las tuberías corrugada y convencional.

En conclusión, el proyecto respondió satisfactoriamente a la pregunta de investigación y cumplió con los objetivos planteados al caracterizar técnicamente los estabilizantes, definir concentraciones óptimas por aplicación, validar el comportamiento en planta y asegurar que los productos finales cumplan con los estándares de calidad exigidos. Este proceso permitió mejorar significativamente el desempeño de las formulaciones para tuberías y sentar las bases para futuras implementaciones y ajustes en otras líneas de producción.

7. Recomendaciones

Realizar corridas industriales prolongadas, se recomienda ejecutar corridas largas con las formulaciones seleccionadas, especialmente en la línea de tubería convencional y tubería corrugada, para validar su comportamiento bajo condiciones reales de operación continua. Además, es importante realizar ensayos en diferentes diámetros y referencias de producto, con el fin de garantizar la procesabilidad, estabilidad térmica y cumplimiento de especificaciones técnicas en toda la gama de productos.

Se recomienda solicitar al proveedor Alphagary una reformulación específica del estabilizante calcio-zinc utilizado en la línea de accesorios sanitarios, con el objetivo de mejorar las propiedades del material y su comportamiento durante el proceso de inyección.

Establecer parámetros específicos por tipo de producto dado que cada línea (tubería corrugada, convencional y accesorios) presentó comportamientos distintos, se sugiere definir perfiles de temperatura, presión y velocidad adaptados a cada formulación para maximizar la eficiencia y minimizar el producto no conforme (scrap).

Replicar el modelo en otras plantas del grupo Orbia. Los resultados obtenidos en Colombia pueden ser aplicables en otras operaciones del grupo. Se recomienda compartir la metodología y las buenas prácticas para fomentar la estandarización y sostenibilidad en la producción de PVC.

Referencias bibliográficas

- Energy Cycle. (2024). *Global PVC production forecast*. Recuperado de <https://energycycle.com/global-pvc-production-forecast-2024>
- European Chemicals Agency. (2007). *REACH regulation*. <https://echa.europa.eu/regulations/reach>
- Lamnawar, K., Zhang, H., & Maazouz, A. (2013). Coextrusion of Multilayer Structures, Interfacial Phenomena. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471440264.PST584>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Resolución 0689 de 2016*. <https://www.minambiente.gov.co>
- Orbia. (2023). *Quiénes somos*. Recuperado de <https://orbia.com/quienes-somos>
- Parlamento Europeo. (2011). *Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la restricción del uso de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos (RoHS 2)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32011L0065>
- Pavco Wavin. (2023). *Soluciones para conducción de agua*. Recuperado de <https://pavcowavin.com/soluciones>
- Plastics Europe. (2023). *European PVC production statistics*. Recuperado de <https://plasticseurope.org/pvc-statistics>
- Rahimi, M., & Bender, H. (1997). Organotin Compounds in the Environment: Chemistry and Toxicology. *Environmental Science and Pollution Research*, 4(1), 15–21. <https://doi.org/10.1007/BF02987415>

Sánchez, M., & Chirinos, R. (2014). Estabilizantes térmicos para PVC: una revisión. *Polímeros:*

Ciência e Tecnologia, 25(4), 263–273. <https://doi.org/10.4322/polimeros.2014.048>

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Toxic Substances Control Act (TSCA)*.

<https://www.epa.gov/tsca>

Wypych, G. (2016). *PVC Formulary* (2nd ed.). ChemTec Publishing.