



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Reducción de los costos de fabricación para
recubrimientos alquídicos de alto desempeño para la
industria marina y de protección**

**Autor
Simón Gilabad Quiroz Gaviria**

**Universidad de Antioquia
Facultad Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Medellín, Colombia
2021**



Reducción de los costos de fabricación para recubrimientos alquídicos de alto desempeño
para la industria marina y de protección

Simón Gilabad Quiroz Gaviria

Informe de práctica
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Químico

Asesores.

Ingeniero Químico Diego Pérez Mesa
Ingeniero Químico Juan Miguel Marín Sepúlveda, PhD

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Química
Medellín, Colombia
2021.

Tabla de contenido

1	Resumen	5
2	Introducción.....	5
3	Objetivos.....	6
3.1	Objetivo General.....	6
3.2	Objetivos específicos	6
4	Marco teórico.....	7
5	Metodología.....	10
5.1	Se Identificaron y seleccionaron contratipos de resinas y solventes para el producto a reformular, a través de las siguientes actividades:	10
5.2	Se realizaron pruebas funcionales para el producto alquídico que garanticen calidad y el costo del recubrimiento.	10
5.3	Se hizo una validación comparativa entre los prototipos fabricados contra el producto actual.	11
5.4	Se realizó informe y comprobación de contratipos.	11
6	Resultados y análisis.....	11
6.1	Identificación y selección de contratipos de resinas y solventes.	11
6.1.1	Evaluación de resinas proveedor 1.	11
6.1.2	Evaluación de resina proveedor 2.....	14
6.1.3	Evaluación de solvente proveedor 3.....	14
6.2	Fabricación de producto con resinas alternativas y solvente.....	15
6.3	Definición de propiedad de diseño para el producto alquídico.....	17
6.4	Pruebas funcionales para el recubrimiento con alternativa de resina	18
6.4.1	Propiedades líquidas	18
6.4.2	Pruebas mecánicas.....	18
6.4.3	Pruebas de aplicación	23
6.4.4	Pruebas de Apariencia	27
6.4.5	Pruebas de estabilidad	29
6.4.6	Prueba de secado (Drying time recorder).....	31
6.4.7	Chequeos especiales	32
6.5	Pruebas funcionales para el recubrimiento con solvente contratipo.....	37
6.5.1	Propiedades líquidas	37
6.5.2	Pruebas de apariencia	37
6.5.3	Pruebas de estabilidad	38
6.5.4	Prueba de secado (Drying time recorder).....	39

6.6	Estimación de Ahorro	40
7	Conclusiones.....	41
8	Referencias	42

Reducción de los costos de fabricación para recubrimientos alquídicos de alto desempeño para la industria marina y de protección.

1 Resumen

En la unidad de negocio de PMC del área de I+D de PPG Industries Colombia Ltda se identificó una posible oportunidad de ahorro en los costos de fabricación partiendo desde la formulación de una familia de productos alquídicos, por lo que en el trabajo se evaluaron diferentes alternativas de resinas y solventes locales, con el fin de servir de contratipo para las materias primas actuales de la familia de productos mencionada anteriormente. Para esto se seleccionaron y evaluaron resinas de dos proveedores locales, además de un solvente como posible contratipo, donde se descartaron las resinas que no cumplieron con las especificaciones técnicas y posteriormente se fabricaron en planta piloto los diferentes prototipos del producto alquídico con las resinas y el solvente seleccionado. A partir de los productos fabricados, se chequearon las propiedades de la test card y luego de aprobadas estas propiedades, se realizaron las diferentes pruebas mecánicas, pruebas de aplicación y apariencia, pruebas de estabilidad del producto y se sometieron a chequeos especiales (Cámara salina, cámara húmeda y UV-A). Teniendo los resultados de estas pruebas, se concluye que es posible hacer el cambio de solvente debido a que los resultados obtenidos en las pruebas de secado, estabilidad y apariencia son comparables con respecto al estándar, mientras que en el caso del cambio de resina, aunque se cumple con las pruebas de secado, aplicabilidad, apariencia y mecánicas, se presenta una falla de adherencia del recubrimiento en la cámara salina. La modificación del solvente para la elaboración del producto, permite obtener una expectativa de ahorro de USD 6154 anuales.

2 Introducción

PPG Industries Colombia Ltda. es una filial PPG Industries, la cual fue fundada en 1883 y opera en más de 70 países de todo el mundo. Es un fabricante del sector químico especializado en la producción y distribución de pinturas y recubrimientos de alto rendimiento para la industria, el transporte, los productos de consumo, y los mercados de construcción. Está conformada por cinco unidades de negocio, divididas en Industria & Motos, Packaging, OEM, PMC y Refinish [1]. La unidad de negocio de recubrimientos marinos y de protección (PMC) es ampliamente reconocida, ya que ofrece productos y servicios de vanguardia que protegen los activos de algunas de las industrias y entornos más desafiantes del mundo, las cuales pueden estar

bajo efectos destructivos de la corrosión, las incrustaciones marinas, los impactos, temperaturas extremas, productos químicos y fuego. Algunos ejemplos de estas industrias son: infraestructura y transporte de petróleo, gas y químicos, minería, aguas y aguas residuales, la industria de la energía, entre otros [2]. Actualmente en la unidad de negocio de PMC se tiene una familia de productos alquídicos los cuales en su fórmula presentan una resina importada por un único proveedor internacional, debido a esto existen riesgos de desabastecimiento y suministro de materia prima, por lo que surge la necesidad de definir alternativas locales para el suministro de dicha materia prima, esto con el fin de suplir fallas que se puedan presentar con el proveedor y reducir los tiempos de abastecimiento, además, se busca una reducción en los costos de formulación. Para lograr este propósito es necesario identificar y seleccionar contratipos para la materia prima, preparar las muestras de producto reformulado en planta piloto, con el fin de evaluar las diferentes propiedades líquidas del recubrimiento y realizar pruebas funcionales en las que se verifique la calidad y durabilidad del producto, para posteriormente comparar los resultados obtenidos del prototipo con el producto actual. Teniendo esto se diligenciaría el informe correspondiente y se haría el montaje de la receta para su posterior aplicación en planta.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

- Reducir los costos de fabricación para recubrimientos de familia alquídica.

3.2 Objetivos específicos

- Seleccionar alternativas de resinas y solventes locales para el producto de familia alquídica.
- Evaluar propiedades físicas de las resinas mediante pruebas de laboratorio.
- Verificar durabilidad en el tiempo de los recubrimientos obtenidos con la reformulación.
- Comparar estabilidad, apariencia y resistencia mecánica del producto actual con respecto al reformulado.
- Definir propiedades de diseño para el recubrimiento alquídico, por medio de la verificación de lotes producidos.
- Estimar el ahorro logrado por el cambio de formulación del producto.

4 Marco teórico

Pintura: La pintura es un material capaz de formar una película continua y uniforme sobre la superficie que se aplica (denominado sustrato), básicamente para protegerla y/o decorarla y puede ser o no pigmentada. Los componentes básicos de las pinturas son: resina (20-60%), pigmento (2-40%), aditivos (0-5%) y solventes (30-80%). Las principales etapas de la fabricación de pinturas posterior a su formulación, son las que presentan a continuación (Ver **Figura 1**):

Empastado o predispersión: Consiste en la humectación de materiales sólidos en el medio líquido.

Molienda: Los pigmentos son dispersados hasta alcanzar un tamaño de partícula óptimo.

Dilución: Se agregan los materiales restantes especialmente los sensibles a la temperatura, se debe tener agitación con turbulencia, para lograr mayor homogeneidad.

Posteriormente, previo al filtrado y envasado del producto terminado, se realiza la tinturación del producto, en donde se ajusta el color final de acuerdo a lo deseado por el cliente. En la **Figura 1** se puede observar el proceso general de fabricación de pinturas [3].



Figura 1: Diagrama de flujo del proceso general para la fabricación de pinturas líquidas.

Resina o ligantes: Sustancia viscosa en la mezcla, cuya misión es la de mantener unidas las partículas sólidas, pigmento y cargas, una vez la pintura está seca. Según el tipo de resina utilizada la pintura tendrá unas características de secado y resistencia determinadas; entre los tipos de resinas tenemos acrílicas, poliéster, uretano, epóxica, alquídica, entre otras. La resina define propiedades de la pintura como: dureza, flexibilidad, brillo, DOI, nivelación, resistencia química, mecánica y adhesión [4].

Pigmento: Son partículas sólidas coloridas e insolubles en el medio en que se encuentran, por lo que están en dispersión, proporcionan propiedades de relleno al material y protección a la corrosión. Se debe cuidar la relación entre los pigmentos y las resinas, ya que dicha relación influye en las características o propiedades como: resistencia a la humedad, protección a la corrosión, % de sólidos, nivelación, brillo y otras; dicha proporción en el proceso de formulación se conoce como pigment/binder ratio (P/B) [4].

Aditivos: Son productos que se adicionan en pequeña cantidad en la formulación de la pintura, con alto grado de eficiencia, capaces de modificar significativamente las propiedades específicas de la pintura [4].

Solventes: Líquidos volátiles de olor característico, usados para facilitar el manejo y la aplicación de la pintura; estos controlan propiedades de aplicación tales como: viscosidad, resistividad, sólidos, resistencia al descuelgue [4].

Resinas alquídicas: Es un poliéster complejo modificado con aceite que sirve como agente formador de películas en algunas pinturas, su nombre se debe al origen químico de la resina, que se basa comúnmente en una reacción de polimerización entre un alcohol y un ácido dicarboxílico. Cuando se agrega un aceite insaturado como el aceite de tung, linaza o ricino a los compuestos formadores de éster, el resultado es un poliéster ramificado que contiene grupos laterales de ácidos grasos [5].

Pintura alquídica: Una pintura alquídica típica consiste en el poliéster modificado con aceite para formar la película de recubrimiento, un disolvente como hexano o mineral spirits para ayudar en la aplicación, naftenatos de metal para catalizar la reacción de secado y pigmento para proporcionar color. El contenido de aceite en la formulación puede variar, un alquídico de aceite largo contiene 60% o más de ácido graso en peso, un alquídico de aceite medio contiene entre 40-60% de ácido graso y un alquídico corto contiene menos del 40% [5].

Conocer las propiedades de las pinturas líquidas es fundamental para formular pinturas con óptima aplicabilidad. A continuación, se detallan algunas de las propiedades más importantes.

Viscosidad: Indica la resistencia que ofrecen los fluidos al flujo, siendo uno de los principales factores a controlar en la pintura. Entre las formas de medir esta propiedad tenemos: copas de viscosidad (Ford 4, Din 4, Zhan, etc.), viscosímetro Brookfield, viscosímetro KU, entre otros [6].

Porcentaje de sólidos: Es la cantidad de material no volátil presente en la pintura líquida [7].

Densidad: Es una magnitud escalar que permite relacionar la cantidad de masa presente en un determinado volumen, se puede medir mediante copas de densidad o picnómetro [8].

Aplicabilidad: Equivale a la facilidad de una pintura para ser aplicada a brocha, por pulverización, por inmersión, etc [4].

Poder cubriente: Es la capacidad que tiene un recubrimiento de ocultar uniformemente, el color o las diferencias de color de un sustrato. Se puede medir esta propiedad por medio de un criptómetro o medidor de espesores de película seca [9].

Espesor: Es la cantidad de pintura aplicada por unidad de superficie [4].

Índice de nivelación: Es el espesor húmedo mínimo para nivelar una vez aplicada la pintura mediante leneta normalizada [10].

Índice de descuelgue: Es el máximo espesor, en húmedo, que se puede aplicar por capas sin descuelgue [11].

Adherencia: Es la capacidad que tiene un producto para fijarse a un sustrato [12].

Impacto: Es la capacidad que tiene una superficie para absorber la energía sin que se afecte sus propiedades [13].

Flexibilidad: Coincide con la capacidad de una pintura para deformarse elásticamente [14].

Dureza: Es la habilidad de una sustancia sólida a resistir la deformación superficial o abrasión [15].

Esfuerzo de tinturación: Capacidad que tiene un pigmento para dar o cambiar el tono de otro pigmento. Este puede estar determinado por el tipo y la cantidad de pigmento, la finura de la molienda y la dispersión del pigmento [12].

Brillo: Es la capacidad que tiene una superficie de reflejar la luz [17].

DOI: Nitidez o claridad con la que es reflejado un objeto por una superficie (efecto espejo del recubrimiento) [10].

Molienda: Establece el grado de finura de la dispersión de los pigmentos en la pintura líquida. Se evalúa en piedras de molienda y se obtienen los resultados tanto en micras como en Hegman [18].

5 Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados se llevó a cabo la siguiente metodología:

- 5.1 Se Identificaron y seleccionaron contratipos de resinas y solventes para el producto a reformular, a través de las siguientes actividades:
 - Búsqueda de proveedores locales.
 - Elección de posibles contratipos de resinas y solventes a partir de datos de fichas técnicas y contacto con los proveedores.
 - Solicitud de muestras de resinas y solventes para ensayos.
 - Medición de propiedades físicas como viscosidad variando la tasa de dilución de la resina y %Sólidos por medio del método IR.
 - Comparación de propiedades contratipos y resina actual.
 - Elección de resinas y solvente para la fabricación del producto.

- 5.2 Se realizaron pruebas funcionales para el producto alquídico que garanticen calidad y el costo del recubrimiento.
 - Fabricación del producto con resinas y solventes alternativas.
 - Pruebas de intemperismo acelerado (UV, humedad y salinidad)
 - Pruebas de estabilidad (2-4 meses) y estabilidad acelerada.
 - Verificación de aplicabilidad en Airless.
 - Corridos a varios espesores, corrido en gota, brillo y nivelación.
 - Pruebas mecánicas entre ellas flexibilidad, impacto y dureza.
 - Comprobación del porcentaje de sólidos de diferentes muestras de retención de lotes producidos para la familia de productos alquídicos.
 - Se establece propiedad de diseño (rango de % de sólidos) para los productos, de acuerdo con los datos obtenidos de las muestras de retención.

- 5.3 Se hizo una validación comparativa entre los prototipos fabricados contra el producto actual.
- Comparación de los resultados obtenidos en las pruebas de apariencia, mecánicas, aplicabilidad y chequeos especiales.
- 5.4 Se realizó informe y comprobación de contratipos.
- Informe con los principales resultados obtenidos y se adjuntan evidencias fotográficas.
 - Cálculo de expectativa de ahorro en el producto.
 - Se concluye cuales de las resinas y solventes sirven como contratipo para las materias primas del producto actual.

6 Resultados y análisis

6.1 Identificación y selección de contratipos de resinas y solventes.

En la siguiente evaluación se tuvieron en cuenta 4 resinas, 3 resinas (Alternativa 1, Alternativa 2 y Alternativa 3) correspondientes al proveedor 1 y una resina (Alternativa 4) correspondiente al proveedor 2. También un solvente (Alternativa 5) correspondiente al proveedor 3. Además, se define como estándar (STD) a la resina actual del producto alquídico y al solvente de dicho producto.

6.1.1 Evaluación de resinas proveedor 1.

Inicialmente se realizó la evaluación de las resinas contratipos para el proveedor 1, donde se hace la medición de propiedades como % de sólidos y viscosidad en el viscosímetro Brookfield para las tres alternativas.

A continuación, en la **Tabla 1** se presentan los resultados para la medición de sólidos para cada una de las resinas.

Tabla 1. % de sólidos en las muestras de resina del proveedor 1 y estándar.

Resina	%Sólidos	%Sólidos promedio
STD	68,32	67,91
	67,5	
Alternativa 1	69,7	70,03
	70,35	
Alternativa 2	70,88	71,39
	71,9	
Alternativa 3	67,5	67,47
	67,44	

En la **Tabla 2** se presentan los valores de viscosidad para las resinas del proveedor 1.

Tabla 2. Viscosidad de resinas sin adición de solvente.

Resina	SPINDLE	% Torque	Viscosidad(cP)
STD	5	EEEE	EEEE
	6	73,20%	14620
	7	25,50%	20400
Alternativa 1	5	EEEE	EEEE
	6	EEEE	EEEE
	7	51,1%	40960
Alternativa 2	5	EEEE	EEEE
	6	88,9%	17760
	7	28,6%	22880
Alternativa 3	4	EEEE	EEEE
	5	79,7%	6384
	6	32,4%	6480

Nota: Para el momento de la lectura en el viscosímetro se garantiza una temperatura de $23 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y se usa una velocidad de 50 RPM.

A partir de los resultados obtenidos de la medición de viscosidad para las resinas sin adición de solvente que se muestra anteriormente (Ver **Tabla 2**), se descarta como posible opción de contratipo la Alternativa 3, debido a que su viscosidad presenta gran diferencia en comparación con el estándar.

Posteriormente se verificó el comportamiento de la viscosidad de las resinas al adicionar solvente. En las

Tabla 3 y **Tabla 4**, se presenta los resultados de viscosidad para las resinas, realizando adiciones de solvente del 25 y 50% con base en el peso de la resina.

Tabla 3. Viscosidad de resinas + 25% de solvente.

Resina	SPINDLE	% Torque	Viscosidad (cP)
STD	3	45,7%	916
	4	24,30%	976
	5	13,20%	1064
Alternativa 1	3	EEEE	EEEE
	4	EEEE	EEEE
	5	56%	4480
	6	23,5%	4700

	7	6,8%	5440
Alternativa 2	3	55,30%	1106
	4	28,10%	1124
	5	13,40%	1072

Nota: Para el momento de la lectura en el viscosímetro se garantiza una temperatura de $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ y se usa una velocidad de 50 RPM.

Tabla 4. Viscosidad de resinas + 50% de solvente.

Resina	SPINDLE	% Torque	Viscosidad (cP)
STD	2	18,4%	146,4
	3	7,30%	144
	4	EEEE	EEEE
Alternativa 1	2	76,40%	1526
	3	29,20%	584
	4	14,50%	580
	5	7%	560
	6	EEEE	EEEE
Alternativa 2	2	13,6%	108,8
	3	EEEE	EEEE
	4	EEEE	EEEE

Nota: Para el momento de la lectura en el viscosímetro se garantiza una temperatura de $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ y se usa una velocidad de 50 RPM.

Con los datos obtenidos de viscosidad para las diferentes tasas de dilución, se realiza el gráfico presente en la **Figura 2** para comparar el comportamiento de las resinas con la adición de solvente.

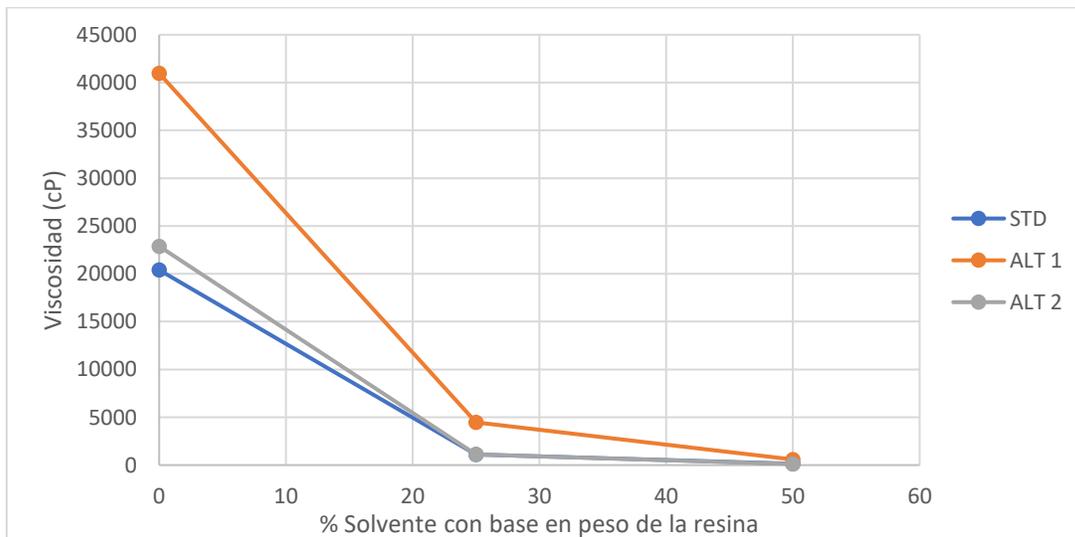


Figura 2. Variación de la viscosidad con la adición de solvente.

De acuerdo con la figura anterior, se puede ver que la Alternativa 2 tiene un comportamiento similar con respecto al estándar al variarse la tasa de dilución, mientras que la Alternativa 1 para las diferentes tasas de dilución presenta una viscosidad mucho mayor respecto al estándar y la Alternativa 2, por lo que se elige la Alternativa 2 por su similitud como resina contratipo del proveedor 1.

6.1.2 Evaluación de resina proveedor 2

En el caso del proveedor 2 solamente se tiene por evaluar una alternativa (Alternativa 4), debido a que la resina dispuesta por este proveedor fue mandada a hacer lo más similar posible a la resina estándar, mientras que en el caso del proveedor 1 eran resinas alquídicas que tenían en su portafolio de ventas. Para esta resina se rectifica el porcentaje de sólidos reportado por el proveedor, como se ve en la **Tabla 5**.

Tabla 5. % de sólidos para la Alternativa 4.

Resina	% Sólidos
Alternativa 4	70
	70,2
	70,2

Por lo que según el rango de sólidos definido para la resina estándar (69-71 % de sólidos), se encuentra centrado el valor.

6.1.3 Evaluación de solvente proveedor 3

En esta evaluación se hace una verificación del posible contratipo de solvente del proveedor 3, para esto las muestras de solvente de la alternativa y estándar, son enviadas a servicio técnico de una empresa externa, con el fin de analizar las muestras por cromatografía de gases y espectroscopia infrarroja FTIR.

6.1.3.1 Análisis de espectroscopia FTIR y cromatografía de gases

Se hace el análisis de espectroscopia infrarroja con el fin de identificar los grupos funcionales presentes en las muestras de solvente. En la **Figura 3** se presentan los espectros de las muestras, en los cuales no hay diferencias significativas, el ruido que se observa es debido a que las muestras se evaporan rápidamente, lo que no permite tomar un espectro de mejor calidad. La Muestra 1 corresponde al estándar, mientras que Muestra 2, a la alternativa de solvente.

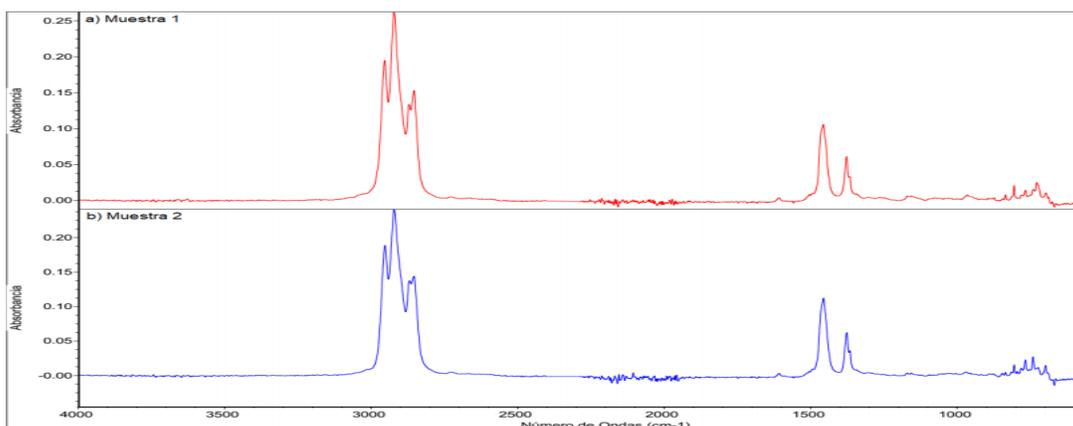


Figura 3. Espectros FTIR a) Muestra 1 y b) Muestra 2.

A partir del análisis por cromatografía de gases acoplado a un detector de masas, se determina la composición de los solventes, donde se observa que para ambas muestras de solvente las composiciones son similares, por lo que se confirma que el solvente puede usarse para la fabricación del producto, los resultados del análisis se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Composición de solventes obtenidas por GC/MS.

Composición (%)	Muestra 1 (STD)	Muestra 2 (Alternativa)
Alifático liviano	31,87	28,67
Alifático pesado	45,16	55,78
Total, Alifático	77,03	84,45
Tolueno	--	--
Xilol	--	--
Aromático liviano	21,69	14,63
Aromático pesado	1,26	0,919
Total Aromático	22,95	15,55

6.2 Fabricación de producto con resinas alternativas y solvente

Para la fabricación de este producto se llevan a cabo dos etapas, una primera que es el empastado, donde se homogenizan los componentes (resina, cargas, pigmento, aditivos y solventes) y se dispersa el pigmento hasta conseguir el tamaño de partícula requerido, verificando la molienda. Luego una etapa de dilución, donde se agregan los componentes faltantes (solvente y aditivos) y se homogeniza los materiales con agitación constante.

Definidas las alternativas de resinas para cada proveedor, se prosigue con la fabricación del producto alquídico en planta piloto, según lo ya descrito anteriormente, usando las diferentes resinas.

Al realizarse el pesaje en planta piloto del ensayo con la resina Alternativa 2 del proveedor 1, se presenta un problema de especificación del producto, debido a que la viscosidad del ensayo fabricado queda por fuera del rango con un valor de 240cP este valor es menor al límite inferior del rango definido para el producto (500-1000cP), por lo que se decide repetir el pesaje y se valida que el producto fabricado con esta resina queda por fuera del rango, por lo cual se descarta la resina Alternativa 2 como posible contratipo y se informa a servicio técnico del proveedor 1 el problema presentado, por lo que sugieren fabricar el producto con la resina Alternativa 1, haciendo esto se detecta en la etapa de empastado que el producto es muy viscoso y además este se adhiere al eje del agitador haciéndose necesario aumentar las RPM más de lo que dice la formula guía del producto para garantizar la debida dispersión, es posible observar esto en la figura presentada a continuación. (Ver **Figura 4**).



Figura 4. Fase de empastado con la resina Alternativa 1 del proveedor 1.

Finalizada la fabricación del ensayo, se observa en la **Figura 5** que presenta un aspecto “chicloso”, no fluye y una elevada viscosidad, este último resultado era de esperarse ya que en las evaluaciones realizadas anteriormente a las resinas del proveedor 1 (Ver **Figura 2**), se obtenía para esta alternativa (Alternativa 1) una viscosidad mucho mayor en comparación con las otras resinas a las diferentes tasas de dilución trabajadas, por lo que se verifica el porcentaje de sólidos para descartar un posible mal pesaje y se encuentra que están centrados (60% de sólidos), de acuerdo a estos resultados se descarta esta opción como posible contratipo.

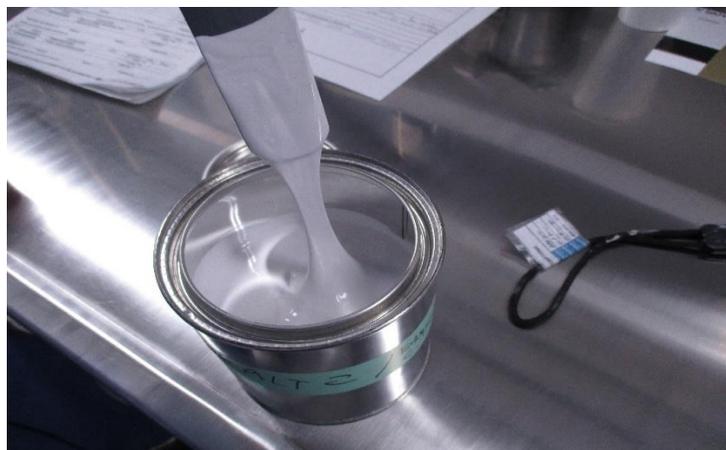


Figura 5. Producto fabricado con la resina alternativa 1 del proveedor 1.

Según lo mostrado anteriormente, ninguna de las resinas del proveedor 1 sirve como contratipo de la resina estándar, por lo tanto, los productos fabricados con ellas no son tenidos en cuenta para las futuras evaluaciones que se mostrarán más adelante. El producto posteriormente se fabricó con la resina Alternativa 4 del proveedor 2 y con este se realizaron las pruebas comparativas contra el producto estándar.

También se hizo la fabricación del producto con el posible solvente contratipo (Alternativa 5) y se valida al igual que con la Alternativa 4 algunas pruebas comparándose el producto fabricado contra el estándar.

6.3 Definición de propiedad de diseño para el producto alquídico

Paralelamente a las caracterizaciones realizadas con las resinas y el solvente de los diferentes proveedores, se hizo una verificación del porcentaje de sólidos en diferentes muestras de retención del producto alquídico (muestras de lotes fabricados en planta del producto estándar guardadas en Control y Calidad), esto con el fin de definir el rango de sólidos que debe tener el producto, ya que actualmente en esta familia de productos su parámetro de ajuste es la viscosidad y se desea migrar a una propiedad que se pueda medir de forma más ágil y rápida. A continuación, en la **Tabla 7** se muestran los resultados obtenidos para la medición de sólidos de cuatro muestras de lotes anteriores solicitadas a Control y Calidad.

Tabla 7. % de sólidos en muestras de lotes anteriores fabricados en planta.

Batch - Reference	% Sólidos
Lote 1	59.82
Lote 2	61.93
Lote 3	59.43
Lote 4	60.14

A partir de los resultados de la tabla anterior, se define el rango de sólidos (propiedad de diseño) para el producto entre 59-61%.

6.4 Pruebas funcionales para el recubrimiento con alternativa de resina

Después de fabricar el producto con la Alternativa 4 del proveedor 2, se realizaron los diferentes chequeos y pruebas funcionales para validar el producto y ver si es comparable con el estándar, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para las diferentes pruebas.

6.4.1 Propiedades líquidas

Inicialmente se realiza la evaluación de las propiedades líquidas para el recubrimiento, el chequeo de estas propiedades es fundamental, ya que el parámetro de ajuste del producto debe estar en el rango para poder seguir con las demás evaluaciones, por lo que en la **Tabla 8**, se presentan los resultados para las propiedades medidas, donde se puede ver que tanto para el estándar como para el producto fabricado con la Alternativa 4, las propiedades evaluadas están en los rangos definidos. Adicionalmente, debido a que se trabajó con un producto base L, el cuál es un producto de base tinturable, se debía garantizar que el esfuerzo de tinturación cumpliera.

Tabla 8. Propiedades líquidas Alternativa 4 vs STD.

Propiedad	Min.	Máx.	ALT 4	STD	Unidad
Visc. Brookfield (SP3@100rpm)	500	1200	587	555	cP
Molienda	25	35	25	25	H
Densidad	1.08	1.11	1.11	1.10	g/mL
Tiempo de secado	60	240	93	90	min
Brillo	75	100	92	94	GU
Esfuerzo de tinturación	98	102	99.66	100	%
% Sólidos	59	61	61	60.14	%

Se observa que los resultados para el estándar y el ensayo son comparables para las diferentes propiedades medidas.

6.4.2 Pruebas mecánicas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las pruebas mecánicas que fueron evaluadas al producto fabricado y el estándar.

6.4.2.1 Flexibilidad

Esta prueba se hace acorde con la norma ASTM D-522, donde este método de ensayo tiene como fin la determinación de la resistencia al agrietamiento (flexibilidad) del recubrimiento aplicado sobre una lámina de sustrato. Se usa un mandril cónico para la evaluación que consta de un cono de metal, un brazo giratorio de flexión de paneles y abrazaderas de panel, todo esto montado sobre una base de metal, como se ilustra en la **Figura 6**.



Figura 6. Mandril cónico.

A continuación, se muestran los resultados de la prueba en la **Figura 7**, donde se observa que no hay fisuras en el recubrimiento en ninguno de los dos casos.



Figura 7. Resultados prueba de flexibilidad.

En la **Tabla 9** se presenta la elongación total que sufre el recubrimiento de acuerdo al procedimiento planteado por la norma para reportarlo, en el que se mide la distancia en la que aparece la primera fractura en el recubrimiento, con esto se lee el porcentaje de elongación en la **Figura 8y**

un factor de corrección en la **Figura 9** y que se aplica por el espesor del recubrimiento.

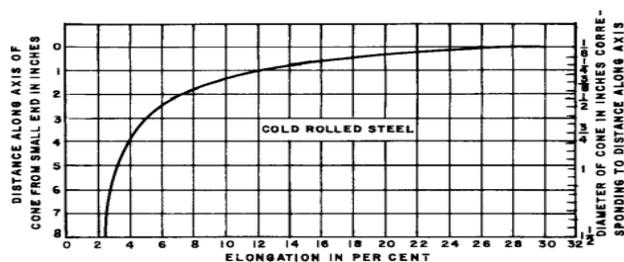


Figura 8. Distancia de fractura vs porcentaje de elongación.

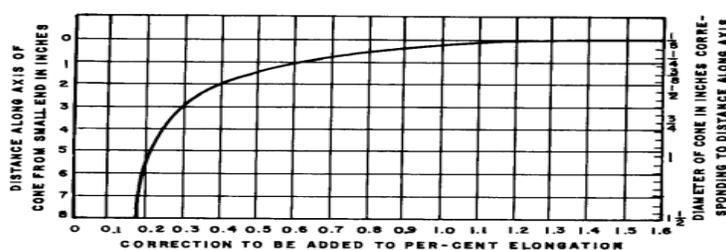


Figura 9. Corrección por espesor del recubrimiento.

El porcentaje de elongación total se calcula con la siguiente fórmula donde, E es el porcentaje de elongación total, e1 la elongación leída de la **Figura 8**, c1 el factor de corrección leído de la **Figura 9** y t el espesor en seco del recubrimiento.

$$E = e1 + t * c1 \quad \text{Ecuación 1}$$

Tabla 9. Elongación total del recubrimiento.

Test	Distancia de falla (in)	Espesor (mils)	Elongación total (%)
STD	0	1.6	34.5%
ALT 4	0	1.6	34.5%

6.4.2.2 Dureza Persoz

En este método de prueba se usa un probador de amortiguación de péndulo en la determinación de la dureza del recubrimiento que se ha aplicado sobre un sustrato rígido (Cold rolled), dicha prueba se hace acorde con la norma ASTM D4366, donde el principio del método es que la amplitud de oscilación del péndulo disminuye al tocar una superficie más rápidamente cuanto más suave es la superficie.

Para este chequeo se tomaron datos de dureza en el péndulo Persoz a diferentes tiempos luego de aplicarse el producto sobre el sustrato. En la **Figura 10** se muestra cómo varía el número de oscilaciones con el tiempo.

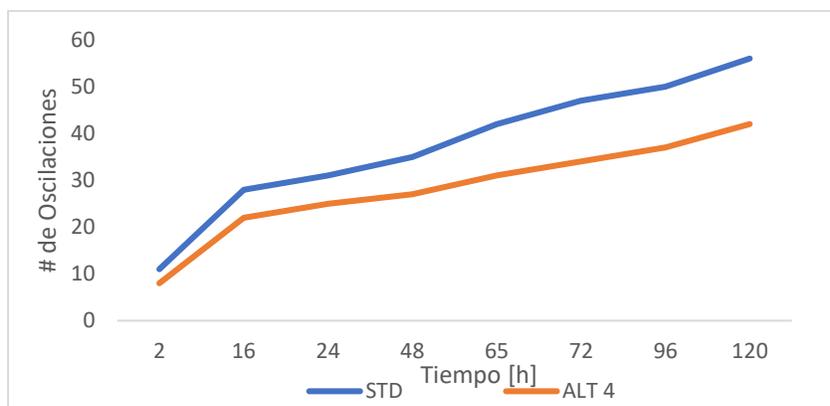


Figura 10. Variación del número de oscilaciones en el tiempo.

De acuerdo con la figura anterior, se puede observar que, para los diferentes tiempos el estándar presenta mayor número de oscilaciones, lo que se traduce en una mayor dureza. Además, se puede ver cómo los dos recubrimientos tienen la misma tendencia o comportamiento al irse aumentando paulatinamente el número de oscilaciones o dureza.

6.4.2.3 Impacto

Los recubrimientos aplicados sobre un sustrato se someten a impactos perjudiciales durante la fabricación de artículos y su uso en servicio, por lo tanto, esta prueba de resistencia al impacto es útil para predecir el rendimiento del recubrimiento por su capacidad para resistir el agrietamiento causado por impactos.

En esta prueba se usa una barra metálica cilíndrica con una masa conocida dentro de un tubo guía, donde se varía la altura de caída de la barra sobre el recubrimiento, esta prueba se realiza según lo planteado en la norma ASTM D2794, en la **Figura 11** se observan los resultados de la prueba.

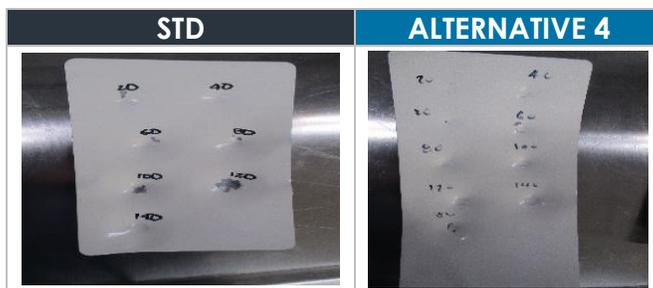


Figura 11. Resultados de la prueba de impacto en las láminas.

De acuerdo con la figura anterior, se puede ver que se presenta igual punto de falla tanto para el estándar como la alternativa, adicionalmente, se repite el chequeo a otras alturas superiores, donde se comprueba que el recubrimiento falla después de las 60lbf-in aplicadas.

Tabla 10. Tabulación de fallas según las libras fuerza-pulgadas aplicadas.

Altura de falla [Lbf-in]	20	40	60	80	100	120	140
STD	PASÓ	PASÓ	FALLÓ	FALLÓ	FALLÓ	FALLÓ	FALLÓ
ALT 4	PASÓ	PASÓ	FALLÓ	FALLÓ	FALLÓ	FALLÓ	FALLÓ
Energía de impacto [J]	6.78 J						

Según la tabla anterior, la energía de impacto que soporta el recubrimiento en ambos casos para que se presenten fisuras es de 6.78 J.

6.4.2.4 Adherencia por el método Pull-Off

Este ensayo cubre un procedimiento para evaluar la fuerza de extracción, o también llamada adherencia de un sistema de recubrimiento a sustrato metálico, esta prueba se valida según la norma ASTM D4541 usando el dispositivo que se muestra en la **Figura 12**.

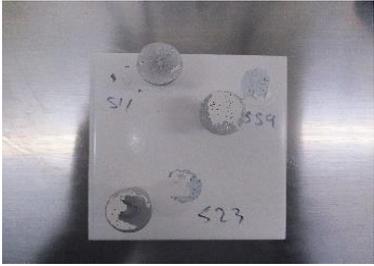
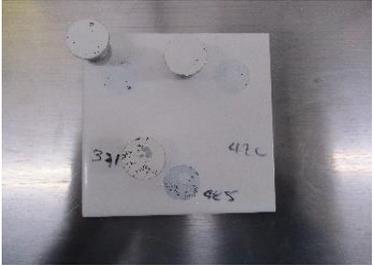


Figura 12. Medidor de adherencia.

La prueba se realiza pegando con una goma adhesiva, los “test head” o también llamados Dollys en el recubrimiento aplicado en el sustrato, dependiendo del material adhesivo se deja secar por 24 horas o menos tiempo y posteriormente, se utiliza el equipo de adherencia Pull-Off mostrado en la figura anterior, donde este reporta el valor de esfuerzo (Psi o MPa) [19].

A continuación, en la **Tabla 11** se presentan los resultados obtenidos para la prueba que se realiza por triplicado en diferentes lugares del recubrimiento y se reporta el esfuerzo medido, además, se menciona el tipo de falla que se presenta para cada una de las medidas.

Tabla 11. Resultados prueba de adherencia Pull-Off.

STD			Alternativa 4		
					
No.	Esfuerzo [psi]	Tipo de falla	No.	Esfuerzo [psi]	Tipo de falla
1	511	- / Y	1	371	A/B
2	523	A/B	2	485	A/B
3	559	A/B	3	420	A/B
Avg.	531	A/B	Avg.	425	A/B
Espesor del recubrimiento			130µm		

Nota: (A/B) Falla de adherencia entre sustrato y primera capa del recubrimiento, (-/Y) Falla de adherencia entre adhesivo y última capa del recubrimiento.

En la tabla anterior se observa que, en el caso del estándar, se tiene una mejor adherencia para las 3 mediciones que se realizan, la falla presentada que más se repite es del tipo (A/B) en ambos casos, que quiere decir que se presenta una falla de adherencia entre el sustrato y el recubrimiento en su primera capa, también hay una falla del tipo (-/Y) para el estándar, la cual corresponde a una falla de adherencia entre el adhesivo y la capa final del recubrimiento.

6.4.3 Pruebas de aplicación

A continuación, se presentan las pruebas de aplicación realizadas con el producto fabricado y el estándar, entre los chequeos realizados está la aplicación con Airless y repintabilidades a diferentes tiempos.

6.4.3.1 Aplicación Airless

La aplicación con Airless se hace con el fin de comprobar que no haya cambios en la reología del producto, además se verifica que el producto se deje aplicar, es decir, que abra el abanico adecuadamente con la boquilla especificada por la ficha técnica del producto.

Para esta aplicación de acuerdo con la ficha técnica del producto alquídico, se usa una boquilla con un orificio de 0.019 in [20]. Los resultados de la aplicación se ilustran en las **Figura 13** y **Figura 14**.

ALTERNATIVE 4	0.019 in		
			
	Resultados	Appearance	ok
		Pinholes	<input type="checkbox"/>
		Wrinkling	<input type="checkbox"/>
Sag thickness		84 (µm)	

Figura 13. Aplicación con Airless Alternativa 4.

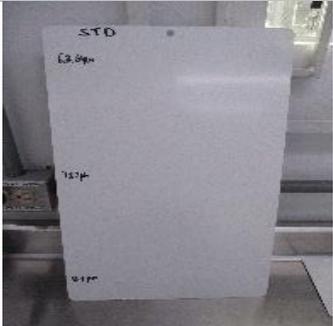
STD	0.019 in		
			
	Resultados	Appearance	ok
		Pinholes	<input type="checkbox"/>
		Wrinkling	<input type="checkbox"/>
Sag thickness		74 (µm)	

Figura 14. Aplicación con Airless STD.

Se observa que se presenta buena nivelación y brillo en el acabado, en ambos casos se deja aplicar adecuadamente con la pistola Airless, además, no se presentan defectos en la pintura como pinholes, chorreo o arrugas.

6.4.3.2 Poder cubriente

En la **Tabla 12** se presentan los resultados de la prueba de poder cubriente tanto para el ensayo con la Alternativa 4 como para el estándar, aquí en esta prueba se hace una aplicación en degrade, donde el sustrato se divide en 5 zonas y se van disminuyendo las capas que se dan a cada una de estas, luego de aplicar el producto y dejar su respectivo tiempo de secado al

ambiente, se hace la medición del espesor en seco para cada una de las franjas.

Tabla 12. Prueba poder cubriente STD y Alternativa 4.

STD		ALTERNATIVA 4	
			
T [μm]	dE*cmc	T [μm]	dE*cmc
12	4.84	12	5.32
31	1.51	25	2.22
38	0.66	38	0.72
45	0.31	47	0.65
55	0	60	0

A partir de los datos de la tabla anterior se realiza la **Figura 15**, donde se ve la variación del parámetro dE*cmc (diferencia de color) respecto al espesor aplicado.

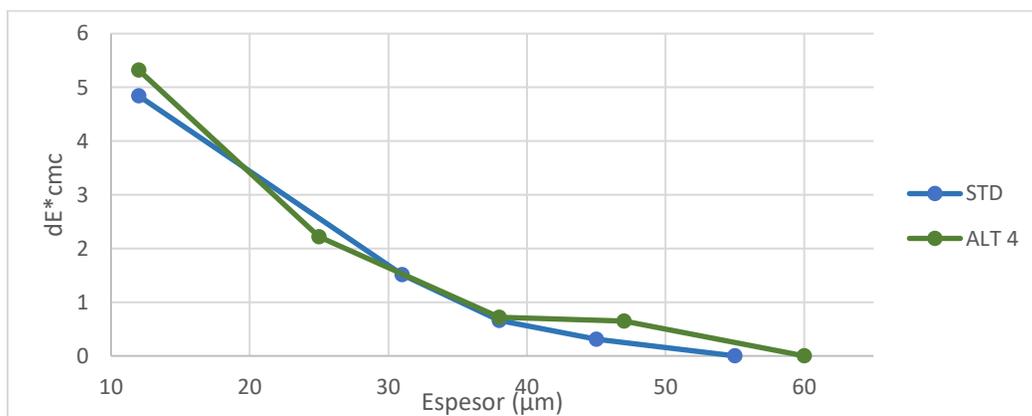


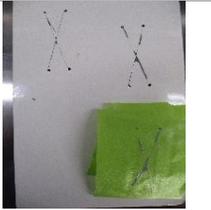
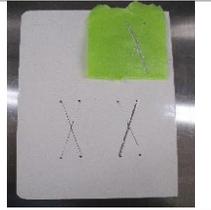
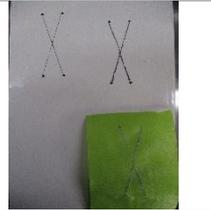
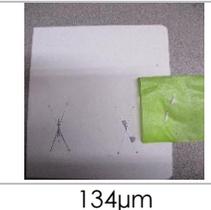
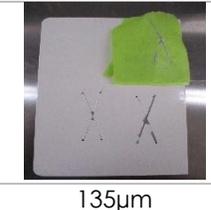
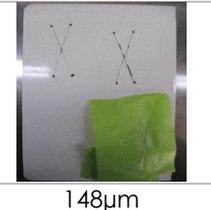
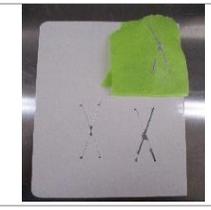
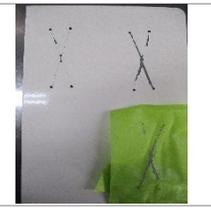
Figura 15. Variación del poder cubriente según el espesor.

Se observa que el poder cubriente para el producto está situado en aproximadamente $38\mu\text{m}$ (1.5mils) de aplicación, esto corresponde a la tercera franja en el sustrato, aquí el parámetro de diferencia de color es menor a 1 correspondiente con la tolerancia permitida de este parámetro en PMC.

6.4.3.3 Repintabilidades

A continuación, se reportan los resultados del chequeo de repintabilidades, prueba en la que se busca evaluar la adherencia al aplicar más capas de recubrimiento, luego de una primera aplicación. Para esta prueba se usan láminas con sandblasting y se hacen los repintes luego de la primera aplicación a 24h, 2 semanas y 4 semanas [21].

Tabla 13. Resultado de pruebas de adherencia realizadas en los repintes.

ALT 4 + ALT 4	24h	2 semanas	4 semanas
			
	161µm	142µm	165µm
	X-cut Adh Knife 10	X-cut Adh Knife 6	X-cut Adh Knife 8
X-cut Adh Tape 5	X-cut Adh Tape 3	X-cut Adh Tape 3	
STD + STD	24h	2 semanas	4 semanas
			
	128µm	135µm	125µm
	X-cut Adh Knife 8	X-cut Adh Knife 10	X-cut Adh Knife 8
X-cut Adh Tape 3	X-cut Adh Tape 3	X-cut Adh Tape 3	
STD + ALT 4	24h	2 semanas	4 semanas
			
	134µm	135µm	148µm
	X-cut Adh Knife 8	X-cut Adh Knife 8	X-cut Adh Knife 8
X-cut Adh Tape 3	X-cut Adh Tape 3	X-cut Adh Tape 3	
ALT 4 + STD	24h	2 semanas	4 semanas
			
	144µm	139µm	150µm
	X-cut Adh Knife 8	X-cut Adh Knife 8	X-cut Adh Knife 8
X-cut Adh Tape 4	X-cut Adh Tape 2	X-cut Adh Tape 3	

Luego de realizar los repintes y dejar el tiempo de curado adecuado, se hace la evaluación de adherencia en corte en X con cuchilla y cinta, de acuerdo con la norma ASTM D6677 y ASTM D3359, respectivamente.

A partir de lo mostrado en la **Tabla 13**, se observa que son comparables los resultados obtenidos tanto en el caso del estándar y el producto fabricado con la alternativa. Para el chequeo de adherencia con cuchilla es posible notar que se desprende más fácilmente el producto con la alternativa, mientras que en el caso del estándar difícilmente hay algún desprendimiento.

6.4.4 Pruebas de Apariencia

En estas evaluaciones se buscan encontrar posibles defectos que puedan aparecer en el recubrimiento, así como también posibles fallos de nivelación y bajo brillo.

6.4.4.1 DOI (Distintividad de imagen) y Brillo

En la **Tabla 14** se reportan los resultados para la medición de DOI y el brillo a 60°, tanto para la Alternativa como el estándar, esta medición se hace sobre una lámina aplicada con el recubrimiento.

Tabla 14. Resultados prueba de nivelación y brillo.

ALTERNATIVA 4		STD	
Espesor	Espesor	Espesor	65µm
60° GU	82	60° GU	83
R	4.2	R	3.6
SW	43.2	SW	53.6
LW	25	LW	38.2
DOI	69.4	DOI	70.6

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior, se puede observar que los resultados son comparables entre la Alternativa 4 y el estándar, donde se tiene un producto con alto brillo.

6.4.4.2 Apariencia sobre leneta

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar un corrido en leneta del producto a diferentes espesores, esto con el fin de verificar si

hay aparición de ondulaciones, pliegues o arrugas en la superficie del recubrimiento a medida que se aumenta el espesor [22].

Tabla 15. Resultados de los corridos sobre leneta a diferentes espesores.

ALTERNATIVA 4	6 mils	8 mils	10 mils	12 mils	15 mils	20 mils
STD	6 mils	8 mils	10 mils	12 mils	15 mils	20 mils

De acuerdo con la **Tabla 15** se observa que no se presentan defectos en el aspecto del recubrimiento en ninguno de los dos casos.

6.4.4.3 Compatibilidad con tintas

En esta prueba se verifica la compatibilidad que tiene el producto alquídico con una tinta determinada, en este caso se evalúan tres tintas diferentes (Tinta 1, Tinta 2 y Tinta 3).

Para realizar la evaluación se adiciona una cantidad conocida de tinta al recubrimiento, se homogeniza adecuadamente y posteriormente se hace un corrido en leneta a un espesor de 6 mils, luego de esto se pasa el dedo de forma horizontal por encima del recubrimiento, después de haber dejado secar por un tiempo de 1 min y 5 min, posteriormente se verifica si hay diferencias en el tono o incompatibilidades, los resultados se muestran en la **Figura 16** [23].

	STD	ALT 4
	Tinta 1	Tinta 1
After 1 min		
After 5 min		
	Aprobado	Aprobado

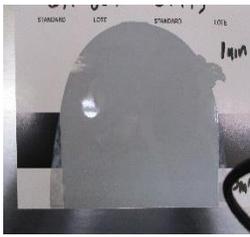
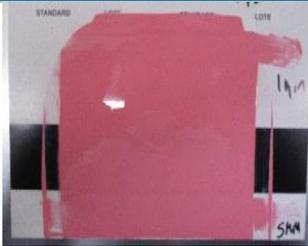
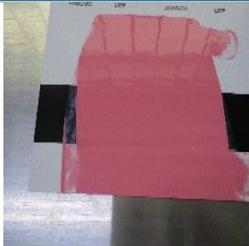
		Tinta 2	Tinta 2
After 1 min			
After 5 min			
		Aprobado	Aprobado
		Tinta 3	Tinta 3
After 1 min			
After 5 min			
		Aprobado	Aprobado

Figura 16. Prueba de compatibilidad de tintas.

Para las tres tintas se observa que hay homogeneidad en el color y no hay incompatibilidades entre el producto y la tinta, por lo que se aprueba el chequeo tanto para el estándar como para el producto fabricado con la Alternativa 4.

6.4.5 Pruebas de estabilidad

Debido a que el producto no siempre es aplicado recién se fabrica, sino que puede ser almacenado en bodega y permanecer allí por varios meses, es necesario que en el momento que se deba aplicar, cumpla con todas las especificaciones técnicas, es por esto que se realizan pruebas de estabilidad para el producto, en las que se verifica cómo varían propiedades líquidas y si se presentan fenómenos como piel, geles, aparición de grumos, sedimentación de los pigmentos, entre otros.

6.4.5.1 Estabilidad acelerada.

En esta prueba se llevan muestras del producto estándar y el fabricado con la alternativa a un horno el cual opera a 40°C, se deja allí por un tiempo de 120 horas y luego se deja reposar la muestra por un periodo de 2 horas, esto con el fin de que llegue a temperatura ambiente, posteriormente, se hacen las evaluaciones correspondientes para verificar posibles cambios en las propiedades y apariencia del recubrimiento, en la **Tabla 16** se muestran los resultados obtenidos [24].

Tabla 16. Resultados estabilidad acelerada.

Evaluación	Piel (P)	Sinéresis (Sn)	Gel (G)	Sedimentación (S)	Viscosidad (Vs)	Resultados
STD	I	III	I	I	I	Aprobado
ALT 4	I	III	I	I	I	Aprobado

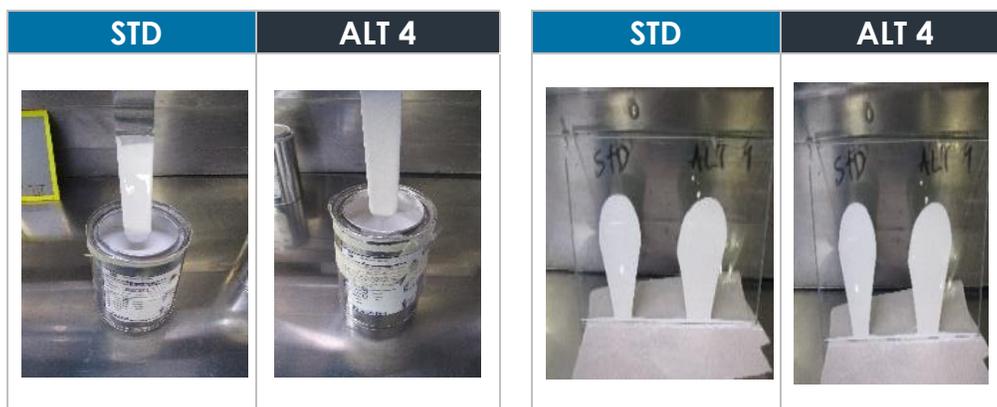


Figura 17. Corrido en gota y revisión muestras.

Según los resultados mostrados en la tabla anterior, se da una calificación correspondiente si hay presencia del fenómeno o cambios significativos en las propiedades de las muestras, por lo que se da una calificación de (I) en los fenómenos piel, gel, sedimentación y viscosidad. Esta calificación para los tres primeros quiere decir que no hay presencia de estos defectos en las muestras de pintura, mientras que en el caso de la viscosidad la calificación de (I) indica que hay un cambio en la viscosidad menor al 15%, en este caso fue de aproximadamente el 7%, tanto en el estándar como en el ensayo. También se puede observar que en ambos casos el fenómeno de sinéresis fue calificado en (III), lo cual quiere decir que hay una separación de fases con un sobrenadante encima y una capa de pintura con cuerpo más grueso debajo.

Además de evaluar si hay presencia de piel, sinéresis, geles, sedimentación y cambios en la viscosidad, se hace un corrido en gota como se muestra en la **Figura 17** al lado derecho, esto con el fin de verificar si hay presencia de grumos o cambios en la apariencia, en este caso no hay diferencias con respecto a la muestra antes de ingresar al horno.

Teniendo en cuenta las evaluaciones realizadas anteriormente en las que no hay cambios en la apariencia, ni presencia de los defectos ya mencionados, se aprueba la estabilidad acelerada para el producto fabricado con la alternativa de resina y es comparable los resultados con el estándar.

6.4.6 Prueba de secado (Drying time recorder)

La prueba de medición del tiempo de secado se realiza de acuerdo con la norma ASTM D5895, donde se hace un corrido en vidrio a 76 μ m y se usa el equipo Drying time recorder programado a 6 horas, luego se hace la lectura de cada etapa de secado correspondiente, como se muestra en el esquema de la **Figura 18** [25].

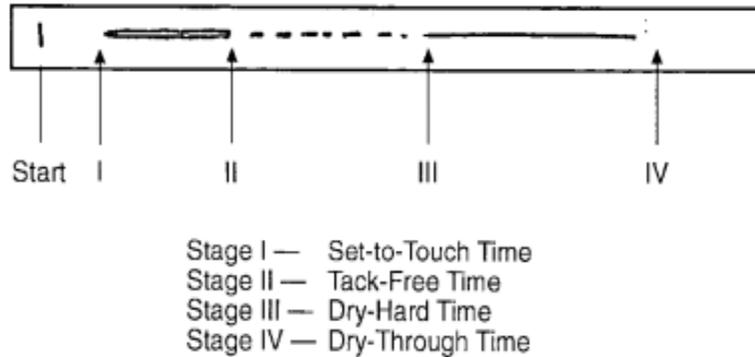


Figura 18. Representación de etapas de secado.



Figura 19. Etapas de secado en registradas en vidrio.

Tabla 17. Resultados de tiempos de secado en el Drying recorder test.

Product	I: Secado al tacto	II: Secado libre de tactosidad	III: Secado duro	IV: Secado final
STD	15 min	1h 37min	2h 20min	4h
ALT 4	10 min	1h 15min	2h 30 min	3h 50 min

De acuerdo con los resultados reportados en la **Tabla 17**, se observa que las diferentes zonas de secado para ambos productos, se alcanzan en tiempos muy similares, por lo que la alternativa es comparable con el estándar.

6.4.7 Chequeos especiales

Estos chequeos buscan reproducir ambientes a los que puede estar sometido el recubrimiento, tales como humedad, salinidad o luz UV, con esto se quiere verificar la calidad, durabilidad y posibles cambios en el acabado a causa del entorno en el que se encuentre.

6.4.7.1 Cámara húmeda

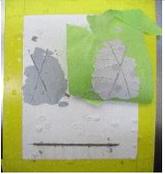
La prueba de cámara húmeda se realiza de acuerdo con la norma ASTM D2247, donde esta se limita solamente a dar el procedimiento para garantizar una humedad relativa del 100% y no especifica la preparación de las láminas y evaluación de los resultados. Por lo que esto se complementa con lo contenido en la norma ISO 12944-5, en donde se define como a partir del tipo de tecnología en este caso alquídica, el tipo de corrosión o ambiente y la durabilidad del recubrimiento, se define el sistema de recubrimiento a usar y el espesor adecuado para la prueba. Además, con la norma ISO 12944-6, se definen los métodos de prueba para verificar el rendimiento del recubrimiento en el laboratorio.

El uso de esta prueba sirve para predecir el comportamiento del recubrimiento bajo una atmosfera con humedad constante. El fallo del recubrimiento en los ensayos de humedad puede darse por factores como contaminación del sustrato, inadecuada preparación de la superficie o deficiencia en el recubrimiento en sí.

Para este chequeo se usan láminas de Cold Rolled que han sido tratadas con sandblasting, esto con el fin de eliminar toda corrosión o impurezas que puedan tener las láminas, también porque se garantiza un perfil de anclaje, el cual se refiere a la rugosidad que la superficie debe tener para que el recubrimiento que se vaya a aplicar se adhiera fácilmente a la superficie del sustrato.

Inicialmente sobre la lámina se aplica una base compatible con el acabado a un espesor de 3 mils, se comprueba dicho espesor con una galga en húmedo, se deja el tiempo de aireo necesario y se prosigue en aplicar el acabado a 2 mils, se deja el tiempo de curado correspondiente de una semana, se realiza un corte horizontal de 5 cm garantizando que se llega hasta el sustrato y se ingresa a la cámara húmeda, donde se deja el recubrimiento hasta un tiempo máximo según lo establecido con la norma ISO 12944-6, en este caso 480 horas [26].

Tabla 18. Resultados de la prueba para los diferentes tiempos de evaluación.

	Alternativa 4			
	48 h	120 h	240 h	480 h
				
Scratch [mm]	2.2	1.4	1.01	0.64
Blistering	8 + D	8 + D	2 + M	2 + M
Rusting	10	10	10	10
Flaking	0	0	0	0
Cracking	0	0	0	0
Adhesion	0	0	0	0
	STD			
	48 h	120 h	240 h	480 h
				
Scratch [mm]	1	1.25	1.26	0.23
Blistering	6 + MD	6 + D	6 + D	4+D
Rusting	10	10	10	10
Flaking	0	0	0	0
Cracking	0	0	0	0
Adhesion	0	0	0	0

De acuerdo a los resultados mostrados en la **Tabla 18** , se puede observar que no hay presencia de rusting, flaking o cracking en el recubrimiento para los diferentes tiempos de evaluación, estos al igual que el scratch se evalúan según la norma ISO 4628. Además, se puede ver la pérdida de adherencia que se presenta en el acabado tanto para el estándar como la alternativa, donde al hacerse el ensayo de adherencia según la norma ASTM D3359 se desprende parte del acabado de la base. La evaluación del scratch da resultados similares, donde se mide de forma vertical si se desprende parte del recubrimiento al aplicar una pequeña fuerza alrededor del corte hecho con la cuchilla, mientras que en el caso del blistering, se nota una leve mejoría en la densidad del ampollamiento y un tamaño de ampolla mayor para la alternativa con respecto al estándar. Por lo que al compararse los resultados obtenidos para el estándar y la Alternativa 4, son comparables en ambos casos.

6.4.7.2 Cámara UV-A

Esta prueba se realiza acorde con la norma ASTM G53, donde se usa el equipo de intemperismo acelerado QUV el cual reproduce los daños causados por la luz solar, la lluvia y el rocío. En pocos días o semanas, el

equipo puede reproducir el daño que se produce durante meses o incluso años al estar el recubrimiento al aire libre. Para simular la intemperie en exteriores, el equipo expone las láminas aplicadas con el producto a ciclos alternos de luz UV y condensaciones controladas. Los efectos de luz solar natural se llevan a cabo utilizando lámparas de UV especiales, en cambio se simula el efecto de la lluvia o rocío con spray de agua y humedad condensada [27].

En la **Tabla 19** se presentan los resultados obtenidos de cómo varía el brillo en el tiempo en que las láminas fueron expuestas a la prueba y la coordenada de color correspondiente al amarillamiento del recubrimiento.

Tabla 19. Resultados de cámara UV-A Alternativa 4.

Alternativa 4			
Inicial	200 h	400 h	600 h
			
DEcmc vs Inicial	0.51	0.65	1.04
Brillo 60° GU	48	43	38
Db vs Inicial	0.21	0.53	0.64

Tabla 20. Resultados de cámara UV-A STD.

STD			
Inicial	200 h	400 h	600 h
			
DEcmc vs Inicial	0.75	0.88	1.43
Brillo 60° GU	56	44	42
Db vs Inicial	0.34	0.65	1.11

Se observa que a medida que se aumenta el tiempo del chequeo empieza a disminuir el brillo, aumenta el amarillamiento del recubrimiento y el parámetro de variación de color (dE^*cmc) se va alejando del rango de aprobación tanto para la alternativa como para el estándar, esto se puede observar en las **Tabla 19** y **Tabla 20**.

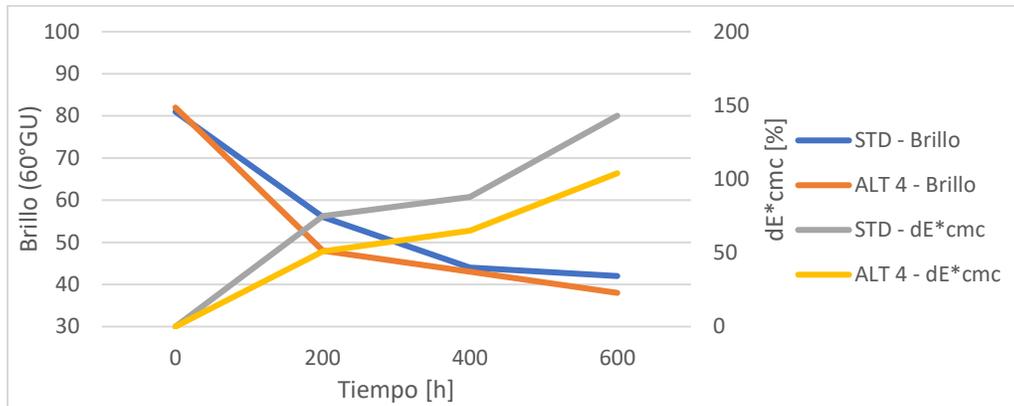


Figura 20. Variación de Brillo y dE*cmc a los diferentes tiempos.

En la **Figura 20**, se observa que el brillo en el caso de la Alternativa 4 disminuye de forma más rápida al pasar 200 horas, mientras que el parámetro de aprobación dE*cmc al cabo de 600 horas para el estándar presenta una mayor variación con respecto a la Alternativa 4 con un valor de 143% frente a un 104% respectivamente. Además, de acuerdo con las tablas **Tabla 19** y **Tabla 20** el amarillamiento (Db) es mayor en el caso del estándar al finalizar las 600 horas.

6.4.7.3 Cámara salina

En la prueba de cámara salina se somete el recubrimiento a una exposición acelerada de un ambiente corrosivo, donde se busca evaluar el recubrimiento con respecto a la corrosión, formación de ampollas, pérdida de adhesión y otras fallas en la película que se puedan presentar.

Para este método se sigue la norma ASTM D1654, donde se plantea el debido proceso para la evaluación de la prueba, aquí no se menciona la preparación del recubrimiento al igual que en la prueba de humedad, por lo que esto se complementa con lo contenido en la norma ISO 12944-5, en donde se define como a partir del tipo de tecnología en este caso alquídica, el tipo de corrosión o ambiente y la durabilidad del recubrimiento, se define el sistema de recubrimiento a usar y el espesor adecuado para la prueba. Además, con la norma ISO 12944-6, se definen los métodos de prueba para verificar el rendimiento del recubrimiento en el laboratorio.

Al igual que en la cámara húmeda se sigue el mismo proceso para la aplicación del producto, donde se usan láminas tratadas con sandblasting, se aplica una base compatible con el producto a un espesor de 3 mils, se verifica el espesor en húmedo, se airea las láminas y posteriormente se aplica el acabado a un espesor de 2 mils, luego de esto se dejan curando por una semana y antes de ingresar a la cámara salina, se hace un corte

horizontal de 5 cm. El tiempo máximo de exposición en la cámara salina se define según la norma ISO 12944-6, en este caso 720 horas [28].

Tabla 21. Resultados de cámara salina para los diferentes tiempos de evaluación.

Alternativa 4	120 h	240 h	480 h	720 h
				
Blistering	10	10	10	10
Rusting	10	10	10	8
Creep	0	0	0	6
Adhesion	0	0	0	0
STD	120 h	240 h	480 h	720 h
				
Blistering	10	10	10	2 + M
Rusting	10	10	10	8
Creep	0	0	0	6
Adhesion	2	2	2	1

En la **Tabla 21**, se observan los resultados obtenidos para la prueba de cámara salina en los diferentes tiempos, donde no hay presencia de rusting, creep y blistering en las 3 primeras evaluaciones hasta un tiempo de 480 horas para ambos casos, alternativa y estándar. Se puede observar que hay creep u oxidación a lo largo del corte a las 720 horas y un leve rusting que se ve como pequeñas manchas de oxidación a lo largo de la película, tanto en el estándar como en la alternativa. Además, aparecen ampollas en el recubrimiento (blistering) para el caso del estándar a las 720 horas.

En la evaluación de adherencia, se puede observar que, para los diferentes tiempos en el caso de la alternativa, se presentan fallas en el chequeo de adherencia en corte en X con cinta, donde se puede ver que hay desprendimiento del acabado desde la base en una gran porción del recubrimiento para todos los tiempos de evaluación.

Debido a esta falla de adherencia que presenta el producto fabricado con la resina Alternativa 4 en el chequeo de cámara salina, no se aprueba esta resina para ser contratipo de la actual.

6.5 Pruebas funcionales para el recubrimiento con solvente contratipo

Después de fabricar la alternativa 5 con el posible contratipo de solvente, se realizan las siguientes pruebas con el fin de validar el producto y ver si es comparable con el producto alquídico estándar, a continuación, se presentan los resultados de dichas pruebas.

6.5.1 Propiedades líquidas

Al igual que en el caso de la resina, inicialmente se evalúan las propiedades líquidas del recubrimiento, obteniéndose los resultados mostrados en la **Tabla 22**, se observa que el recubrimiento cumple con las especificaciones técnicas ya que todas las propiedades se encuentran dentro de los rangos definidos.

Tabla 22. Propiedades líquidas con Alternativa 5.

Propiedad	Min.	Máx.	Alternativa 5	Unidades
Visc. Brookfield (SP3@100rpm)	500	900	641	cP
Molienda	25	35	25	µm
Densidad	1.08	1.11	1.10	kg/gal
Tiempo de secado	60	240	105	min
Brillo	75	100	91.5	GU
Esfuerzo de tinturación	98	102	99.66	%
% sólidos	57	61	58.54	%

6.5.2 Pruebas de apariencia

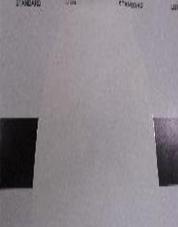
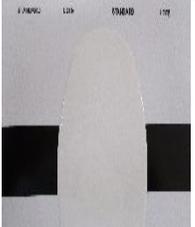
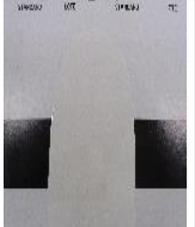
En este caso se evalúan posibles cambios de apariencia que pueda tener el recubrimiento respecto al estándar, así como la presencia de grumos, incompatibilidades y otros defectos.

6.5.2.1 Apariencia sobre leneta

En la **Tabla 23** se presentan los resultados de los corridos a diferentes espesores del recubrimiento, donde se puede ver que los resultados tanto para la alternativa como el estándar, son comparables y no hay presencia de ningún defecto en la pintura, como la aparición de grumos o presencia de arrugas a un bajo espesor, por lo que esto indica que no hay ninguna

incompatibilidad entre la alternativa de solvente y los demás componentes de la fórmula para el producto alquídico

Tabla 23. Resultados de corridos sobre leneta a diferentes espesores.

	6 mils	8 mils	10 mils	12 mils	15 mils	20 mils
ALTERNATIVA 5						
STD						

6.5.3 Pruebas de estabilidad

Al igual que en las pruebas realizadas para el cambio de resina, es necesario comprobar la estabilidad del producto fabricado con el solvente (Alternativa 5).

6.5.3.1 Estabilidad acelerada

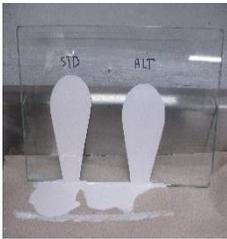
Para este chequeo se sigue el mismo procedimiento realizado en el caso del cambio de resina, se presentan los resultados en la **Tabla 24**, donde se puede observar que no hay presencia de piel, sedimentación o geles en la muestra de recubrimiento, de acuerdo con la calificación de la sinéresis hay una separación de fases, pero se puede volver a incorporar el producto con una leve agitación, en el caso de la viscosidad su calificación hace referencia a que hay un cambio de esta propiedad menor al 15%.

Tabla 24. Resultados de estabilidad acelerada para Alternativa 5.

Evaluación	Piel (P)	Sinéresis (Sn)	Geles (G)	Sedimentación (S)	Viscosidad (Vs)	Resultado
ALT 5	I	III	I	I	I	Aprobado
STD	I	III	I	I	I	Aprobado

En la **Tabla 25** se presenta un corrido en gota al iniciar la prueba y pasadas las 120 horas, tanto para el producto estándar como la alternativa (Alternativa 5), donde se observa que la apariencia es igual para las muestras pasado el tiempo del chequeo.

Tabla 25. Resultados de corrido en gota.

	STABILITY		DROP DRAW DOWN	
	INITIAL	FINAL	INITIAL	FINAL
STD				
ALT 5				

6.5.4 Prueba de secado (Drying time recorder)

La prueba de secado se realiza de igual manera a como fue descrita para el producto fabricado con la resina contratipo donde se usa el equipo Drying time recorder para realizar el ensayo. A continuación, se presentan las diferentes zonas de secado tanto para el producto estándar como la alternativa (Alternativa 5). Se puede observar en la **Tabla 26** que se presentan leves diferencias en el secado libre de tactosidad y secado duro, pero el secado final es bastante similar, por lo que el producto fabricado con la alternativa de solvente es comparable al estándar.

Tabla 26. Resultados de prueba de secado para Alternativa 5.

Producto	I: Secado al tacto	II: Secado libre de tactosidad	III: Secado duro	IV: Secado final
ALT 5	15	45	1h 37 min	4h 30min
STD	15	1 h 37min	2h 20min	4h

6.6 Estimación de Ahorro

A continuación, se hace una estimación del posible ahorro por la implementación del cambio de solvente para el producto alquídico. Esto no se realiza en el caso del cambio de resina debido a que las cuatro alternativas evaluadas, no sirven como contratipo para el producto, ya que mostraron estar fuera de especificación en viscosidad y adherencia.

Tabla 27. Precio de solventes y granel.

Solvente Alternativa (\$/kg)	\$2.797
Solvente STD (\$/kg)	\$3.332
Diferencia(\$/kg)	\$535
Precio Granel con STD (\$/kg)	\$7.600.00
Precio Granel con ALT (\$/kg)	\$7.065.00

Para el producto alquídico se tiene un volumen total de producción de 40.000 L/año solamente en el caso de Colombia para distribución interna, usando este valor y la densidad del producto de 1.1 g/mL, se prosigue en calcular la producción anual en peso.

$$\text{Producción anual} \left(\frac{kg}{\text{año}} \right) = 1.1 \frac{kg}{L} * 40.000 \frac{L}{\text{año}} = 44.000 \frac{kg}{\text{año}}$$

A partir del valor del granel y la producción anual, se calcula el valor en pesos que se gasta en la fabricación del producto.

$$\text{Valor en \$ STD} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 7.600 \frac{\$}{kg} * 44.000 \frac{kg}{\text{año}} = 334.400.000 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$\text{Valor en \$ ALT} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 7.065 \frac{\$}{kg} * 44.000 \frac{kg}{\text{año}} = 310.860.000 \frac{\$}{\text{año}}$$

Donde la diferencia entre el valor con el estándar menos el valor con la alternativa de solvente, es el ahorro logrado.

$$\text{Ahorro} \left(\frac{\$}{\text{año}} \right) = 334.400.000 \frac{\$}{\text{año}} - 310.860.000 \frac{\$}{\text{año}} = 23.540.000 \frac{\$}{\text{año}}$$

De acuerdo con lo anterior, se puede tener una expectativa de ahorro de aproximadamente \$23.540.000 anuales (USD 6154 anuales), con la implementación del cambio de solvente para el producto alquídico, cabe destacar que puede ser mayor dicho ahorro, si se tiene en cuenta los demás países a los que se exporta el producto.

7 Conclusiones

Mediante la metodología aplicada se logra evaluar la factibilidad de las cuatro resinas contratipo seleccionadas de los dos proveedores, donde las tres resinas del proveedor 1 son descartadas por problemas de especificación en viscosidad, mientras que la resina del proveedor 2 se descarta debido a que al fabricar el producto y realizar las diferentes pruebas funcionales se presenta una pérdida de adherencia en comparación al producto estándar en el chequeo de cámara salina.

La alternativa de solvente del proveedor 3 presenta propiedades adecuadas y resulta ser un contratipo de solvente para el producto alquídico, ya que cumple de forma satisfactoria con las pruebas realizadas de secado, apariencia y estabilidad, manteniéndose la calidad del recubrimiento y especificaciones del producto.

Se definió como propiedad de diseño el porcentaje de sólidos para el producto alquídico, especificando el rango con base en las muestras de retención escogidas, dándose la oportunidad de iniciar un proceso de cambio del parámetro de ajuste viscosidad para la familia de productos alquídicos.

La evaluación del producto desarrollado en condiciones de intemperismo acelerado en el laboratorio, es fundamental, ya que permite conocer cómo se comportará el producto en condiciones de exposición real y se puede concluir a partir de los resultados obtenidos en estas pruebas, si el recubrimiento funcionará a condiciones de aplicación real y cumplirá con los requerimientos de calidad y durabilidad.

La evaluación inicial de las materias primas, en el caso de las resinas viscosidad y sólidos, permitió conocer diferencias presentes entre las alternativas y el estándar, esto fue importante ya que daba información del posible comportamiento del producto fabricado con dicha alternativa.

La expectativa de ahorro con la implementación del cambio de solvente para el producto alquídico es de aproximadamente USD 6154 anuales solamente para Colombia, por lo que se puede esperar un ahorro mayor teniendo en cuenta los demás países a los que se exporta el producto alquídico.

Se propone buscar otras alternativas locales de proveedores para la resina alquídica, con el fin de evaluarlas y seleccionar una posible resina contratipo e implementarla en la fabricación del producto.

8 Referencias

- [1] PPG INDUSTRIES, «PPG REFINISH,» PPG, 2020. [En línea]. Available: <https://es.ppgrefinish.com/es/>. [Último acceso: 08 Marzo 2021].
- [2] PPG INDUSTRIES, «PPG PMC,» PPG, 2020. [En línea]. Available: <https://www.ppgpmc.com/about-us>. [Último acceso: 08 03 2021].
- [3] C. División técnica I+D, «Conceptos básicos de las pinturas,» Medellín, 2011.
- [4] PPG INDUSTRIES, «Características de la pintura líquida,» Medellín, 2019.
- [5] T. E. o. E. Britannica, «Britannica,» Encyclopedia Britannica, 4 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/alkyd-resin>.
- [6] PPG Industries Ltda, «Viscosidad Brookfield,» de *Documento IIP-199*, Itagüí – Antioquia, Autor, 1997, p. 1.
- [7] PPG Industries Ltda, «Porcentaje de Sólidos,» de *Documento IIP-13*, Itagüí – Antioquia, Autor, 1998, p. 1.
- [8] PPG Industries Ltda, «Densidad directa,» de *Documento IIP-11*, Itagüí – Antioquia, Autor, 1997, p. 1.
- [9] PPG Industries Ltda, «Poder Cubriente,» de *Documento IIP-175*, Itagüi - Antioquia, Autor, 1997, p. 1.
- [10] PPG Industries Ltda, «Nivelación,» de *Documento IIP-37*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2015, p. 1.
- [11] PPG Industries Ltda, «Chorro,» de *Documento IIP-184*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2015, p. 1.
- [12] PPG Industries Ltda, «Adherencia,» de *Documento IIP-29*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2018, p. 1.
- [13] PPG Industries Ltda, «Impacto,» de *Documento IIP-49*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2021, p. 1.
- [14] PPG Industries Ltda, «Impacto,» de *Documento IIP-55*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2019, p. 1.
- [15] PPG Industries Ltda, «Dureza,» de *Documento IIP-41*, Itagüi - Antioquia, Autor, 1999, p. 1.
- [16] PPG Industries Ltda, «Esfuerzo de tinturación,» de *Documento IIP-88*, Itagüi - Antioquia, Autor, 1997, p. 1.
- [17] PPG Industries Ltda, «Brillo,» de *Documento IIP-27*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2018, p. 1.
- [18] PPG Industries Ltda, «Molienda,» de *Documento IIP-200*, Itagüí – Antioquia, Autor, 1997, p. 1.

- [19] PPG Industries Ltda, «Adherencia Pull-Off,» de *Documento IIP-221*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2019, p. 1.
- [20] PPG PMC, «PPG Protective and Marine Coatings,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ppgpmc.com/products/sigmarine-48>. [Último acceso: 21 07 2021].
- [21] PPG Industries Ltda, «Repintabilidades,» de *Documento IIP-97*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2017, p. 1.
- [22] PPG Industries Ltda, «Apariencia aspecto,» de *Documento IIP-92*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2018, p. 1.
- [23] PPG Industries Ltda, «Rub-Out Test,» de *Documento IIP-116*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2017, p. 1.
- [24] PPG Industries Ltda, «Estabilidad Almacenamiento,» de *Documento IIP-22*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2018, p. 1.
- [25] PPG Industries Ltda, «Secatividad,» de *Documento IIP-133*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2018, p. 1.
- [26] PPG Industries Ltda, «Resistencia a la humedad,» de *Documento IIP-54*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2018, p. 1.
- [27] PPG Industries Ltda, «UV,» de *Documento IIP-57*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2017, p. 1.
- [28] PPG Industries Ltda, «Resistencia a la corrosión,» de *Documento IIP-52*, Itagüi - Antioquia, Autor, 2018, p. 1.