

Centro de Enseñanza Técnica y Superior

Con reconocimiento de validez oficial de estudios del Gobierno del Estado de Baja California según Acuerdo de fecha 10 de octubre de 1983



Protocolo de análisis para la validación de los recubrimientos utilizados en los instrumentos musicales de Fender.

tesis para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta:

Ruben Chanes González

Directora:

Dra. Dalia Holanda Chávez García

Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad)

Ensenada, Baja California, México a 5 de diciembre del 2019

**Protocolo de análisis para la validación de los
recubrimientos utilizados en los instrumentos musicales de
Fender.**

Tesis/Proyecto de aplicación que para obtener el grado de Maestro en
Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

Ruben Chanes González

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Dalia Holanda Chávez García

M.C. Amanda Georgina Nieto Sánchez

Dr. Mario Humberto Guzman Jimenez

M.C. Amanda Georgina Nieto Sánchez
Coordinadora del Posgrado en Ingeniería
e Innovación

Ruben Chanes González © 2019

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor
Resumen de la tesis que presenta Ruben Chanes González como requisito parcial para
la obtención del grado de Maestro en Ingeniería e Innovación.

Protocolo de análisis para la validación de los recubrimientos utilizados en los instrumentos musicales de Fender.

Resumen aprobado por:

Dra. Dalia Holanda Chávez García

Este proyecto fue llevado a cabo en la empresa Instrumentos Musicales Fender en Ensenada, Baja California, México, donde se utilizan pinturas como parte de la fabricación de sus guitarras y bajos. Antes de realizar esta investigación, el tiempo y método de validación para introducir un nuevo color a producción estaba entre los 20 y 25 días. Se logró disminuir este tiempo a 15 días, mejorando el proceso en tiempo y calidad. Esto se logró realizando tareas simultáneamente y al introducir nuevas técnicas de medición con equipos de caracterización de materiales. Se generó una base de datos para identificar si un material es poliuretano o poliéster utilizando la técnica de FTIR con ATR. Se midieron los coeficientes de expansión térmicos y se relacionaron con la adherencia. Se correlacionaron dos métodos de medición de adherencia, el método cuantitativo de pull-off y el cualitativo de cross-cut. Finalmente se generó un protocolo de validación con las nuevas herramientas.

Palabras clave: Recubrimientos, FTIR , poliuretano, poliéster, cross-cut, Pull-off, TMA.
Abstract of the thesis presented by Ruben Chanes Gonzalez as a partial requirement to obtain the Master degree in Engineering and Innovation.

Protocolo de análisis para la validación de los recubrimientos utilizados en los instrumentos musicales de Fender.

Resumen aprobado por:

Dra. Dalia Holanda Chávez García

This project was carried out at the Fender Musical Instruments company in Ensenada, Baja California, Mexico, where paintings are used as part of the manufacture of their guitars and Basses. Before conducting this investigation, the time and method of validation to introduce a new color to production was between 20 and 25 days. This time was reduced to 15 days, improving the process in time and quality. This was achieved by performing tasks simultaneously and by introducing new measurement techniques with material characterization equipment. A database was generated to identify if a material is polyurethane or polyester using the FTIR technique with ATR. It was possible to measure the thermal expansion coefficients and relate them to the adhesion. Two methods of adhesion measurement were correlated, the quantitative pull-off method and the qualitative cross-cut method. Finally, a validation protocol was generated with the new tools.

Keywords: Coatings, FTIR , polyurethane, polyester, cross-cut, Pull-off, TMA.

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico principalmente a mi familia y seres queridos a los que también fueron parte de esta etapa de estudio. A mis padres quienes me dieron vida, educación, apoyo y consejos. A mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos, quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer esta tesis. A todos ellos se los agradezco desde el fondo de mi alma.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero brindado para poder lograr este grado de estudio mediante la beca CONACYT Nacional # 884773, y al Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad) por el apoyo y atención que me brindaron durante mis estudios para poder lograr la obtención del grado de maestría en Ingeniería e Innovación.

Agradezco a Instrumentos Musicales Fender por el apoyo brindado facilitando recursos y tiempo, para la obtención de este grado de maestría y la realización de este proyecto.

Agradezco a la Dra. Dalia Holanda Chávez y al Dr. Mario Guzmán por brindarme parte de su invaluable tiempo y un gran apoyo, mediante su guía y enseñanzas.

Tabla de contenido

Resumen español	ii	
Resumen inglés	iii	
Resumen inglés	iv	
Dedicatorias	v	
Agradecimientos	vi	
Lista de figuras	vii	
Lista de tablas	viii	
Capítulo 1	Introducción	
1.1	Planteamiento del problema	5
1.2	Justificación	6
1.3	Antecedentes bibliográficos	7
1.4	Preguntas de Investigación	9
1.5	Hipótesis	10
1.6	Objetivos generales	11
1.7	Objetivos Específicos	11

Capítulo 2	Marco Teórico	
2.1	Recubrimientos	12
2.2	Tipos de recubrimiento.	12
2.3	Por qué fallan los recubrimientos	14
2.4	Caracterización de recubrimientos	
2.4.1	Prueba <i>cross-cut</i>	15
2.4.2	Prueba <i>Pull-off</i>	16
2.4.3	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	17
2.4.4	Análisis Termomecánico (TMA)	19
Capítulo 3	Metodología	
3.1	Materiales	22
3.2	Métodos	23
3.3	Plan de trabajo	25
Capítulo 4	Resultados y discusión	
4.1	Resultados FTIR	
4.1.1	FTIR Poliuretanos	
4.1.2	FTIR Poliéster	
4.2	Pruebas <i>Cross-cut</i> y <i>Pull-off</i>	
Capítulo 5	Conclusiones	
	Referencias	13
	Anexos	

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de Ishikawa para la aplicación de recubrimientos. (Streitberger,2007)	2
Figura 2. Molécula de los poliesters (Crompton,2009)	5
Figura 3. Reacción del poliuretano (Malik,2005)	7
Figura 4. Diagrama de <i>cross-cut</i> para identificar el nivel de delaminación (Streitberger, 2007)	8
Figura 5. Se muestran tres ejemplos de prueba de cross cut, (1) prueba 5B con buena adherencia sin delaminación (2) Prueba 0B , laminación total, fallo de TOP COAT y color (3) Prueba 3B, falló de TOPCOAT delaminación.	9
Figura 6. Tipos de vibraciones para identificar compuestos.(William,2011)	
Figura 7. Viaje de la luz en un sistema de espectroscopia por ATR.(Brunatti,2015)	10
Figura 8. Regiones de diagnóstico y huella dactilar de los espectros.(Estay,2014)	2
Figura 9. Tabla de identificación de los poliuretanos, se muestran las vibración y estiramientos de las moléculas más importantes que conforman a los poliuretanos. (Rangel,2014)	5
Figura 10. Tabla de identificación de los poliésteres, se muestran las vibraciones y estiramientos de las moléculas más importantes que conforman a los poliuretanos.(Zieba,2017)	7
Figura 11. Diagrama de funcionamiento del analizador termomecánico. (Crompton,2013)	8
Figura 12. Gráfica de una análisis termomecánico sobre un material.(crompton,2013)	9
Figura 13. Instrumentos de medición de los métodos físicos, A) Metodo cross-cut TQC Sheen CC3000 Cross Cut B) Método pull-off defelsko positest AT-A automatic adhesion Tester	9
Figura 15. Tabla de actividades	10
Figura 16. Espectroscopia del color poliuretano lime green	
Figura 17. Espectroscopia del color poliuretano Fiesta Red.	
Figura 18. Espectroscopia del color poliuretano snowwhite.	

Figura 19. Espectroscopia del color poliéster lime green

Figura 20. Espectroscopia del color poliéster fiesta red.

Figura 21. Espectroscopia del color poliéster snowwhite.

Figura 22. Resultados obtenidos de la correlación entre la prueba de cross-cut y pull-off.

Figura 23. Prueba pull-off arriba y cross-cut abajo

Figura 24. Dummies de madera utilizados para realizar pruebas de pinturas, tonalidad y adherencia.

Lista de tablas

Tabla 1. Espectroscopia del color poliéster fiesta red.

Capítulo 1. Introducción

El primer uso de pinturas se dio hace aproximadamente 30,000 años. Las personas usaban mezcla de tierra, residuos de hollín grasas y plantas, como una manera adornar sus cuerpos y viviendas (Brock, 2000). En la revolución industrial el uso de recubrimientos dejó de ser utilizada en decoración para ser empleada como método de protección en distintos productos. Esto sucedió por que el uso de la madera dejó de ser el principal material de construcción, dando lugar al hierro. A partir de ese momento, la tecnología de los recubrimientos ha ido avanzando a paso acelerado, dando lugar a las técnicas utilizadas hoy en día en la industria.

Desde la segundo mitad del siglo XX, la industria se encarga de fabricar diferentes objetos para el uso cotidiano de las personas. La mayoría de estos objetos son expuesto a las condiciones ambientales naturales y al desgaste por el uso diario. Para evitar la degradación prematura de los objetos fabricados es un común que se recubren con otros materiales. Un recubrimiento es un proceso industrial, que consiste en cubrir por completo un sustrato (cuerpo al que se le aplicara el recubrimiento) con un material adherible, con el fin de cambiar sus propiedades superficiales, tales como su aspecto, adhesión, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste y condiciones ambientales. Las pinturas se definen normalmente como un recubrimiento pigmentado que forma una película al curarse, cuando una pintura no contiene pigmento se le conoce como barniz. (Stauffer, 1993) . Para elegir una pintura como recubrimiento de un sustrato, es importante tomar en cuenta numerables aspectos. Lo primero que se debe definir, deberá ser, cuales son las propiedades que se quieren cambiar o conservar del sustrato. Después de tener esos parámetros, se eligen que tipo de recubrimiento es compatible con el sustrato y con qué tecnología se cuenta para su aplicación.

La industria es una actividad que tiene como finalidad, transformar las materias primas en productos elaborados (Ángel, 2016). Su principal objetivo es generar utilidad, esto lo puede lograr de dos maneras, fabricando un producto barato, de baja calidad con el objetivo de venderlo a gran escala y tener un margen mínimo o haciendo un producto de muy alta calidad, con la mejor materia prima y fabricado con la última tecnología, lo cual le dará prestigio a la marca y podrá vender a un mejor precio. Dejando esto claro, el

fabricar un producto se deben de tener en cuenta esos factores. Como se puede lograr fabricar un producto de muy alta calidad, pero que no represente un costo tan grande que minimice la utilidad. Es por eso que siempre se deberá tener como objetivo maximizar utilidad y calidad, un trabajo que se vuelve cotidiano en la industria.

La luthería es una actividad consistente en fabricar o reparar instrumentos musicales de cuerda, principalmente violines y guitarra. Es una profesión que ha existido desde que se empezaron a utilizar los instrumentos de cuerda y que fue por mucho tiempo una actividad totalmente artesanal (González, 2009).

La guitarra surgió en los años 1930s después de la invención del amplificador eléctrico, pero oficialmente se reconoce a Leo Fender como su inventor en 1950 (Waring et al. 2001). A partir de ese año, diferentes marcas de la industria han realizado cambios en los guitarras, agregando más cuerdas, cambiando formas del cuerpo y probando diferentes materiales. No todas las modificaciones han sido bien aceptadas, puesto que fabricar guitarras no solo es utilizar la tecnología más avanzada o fabricar una gran cantidad, si no qué, es entregar el mejor producto cumpliendo con las expectativas y gustos del cliente, una dificultad más, resulta de que las guitarras al ser instrumentos musicales, están destinado a crear arte, entonces el sonido que produce es un factor que no puedes medir, y solamente el cliente lo puede aceptar o rechazar, otros retos con los que se encuentra un fabricante de guitarras, es qué está trabajando con madera, un material natural que siempre tiene muchas variaciones, por otro lado, utilizar recubrimientos es un proceso complicado que siempre tendrá variantes, por lo que fabricar una guitarra, se encuentra con muchas dificultades en el camino.

Todas la guitarras fabricadas en Fender están hechas de madera, un material que presenta características muy peculiares, puesto que es un polímero natural que puede cambiar de acuerdo a las condiciones de humedad y temperatura a la que se encuentre. Para evitar estos cambios, la madera es recubierta con materiales sintéticos, estos materiales son capas delgadas de polímeros que lograr sellar la madera evitando que absorba humedad. Los recubrimientos en las maderas tienen la finalidad de proteger el material evitando que aumente o disminuya su volumen al estar expuesto a la humedad y temperatura, así como dar un acabado visualmente atractivo.

Recubrir un material no es una tarea sencilla, (Goldschmidt,2007) menciona que la tecnología de recubrir, es una tarea multidisciplinaria y que las pinturas no son un producto terminado, si no un producto intermedio que requiere de ciertas habilidades y conocimiento para poder llegar a un producto terminado de calidad. Para recubrir cuerpos de guitarras, se utiliza la técnica de transferencia por spray, la cual consiste en nebulizar la pintura con aire comprimido para poder lograr colocar una capa delgada y uniforme. En la figura 1, se muestran en un diagrama de Ishikawa todos los factores que pueden influir en un buen proceso de aplicación de recubrimiento.

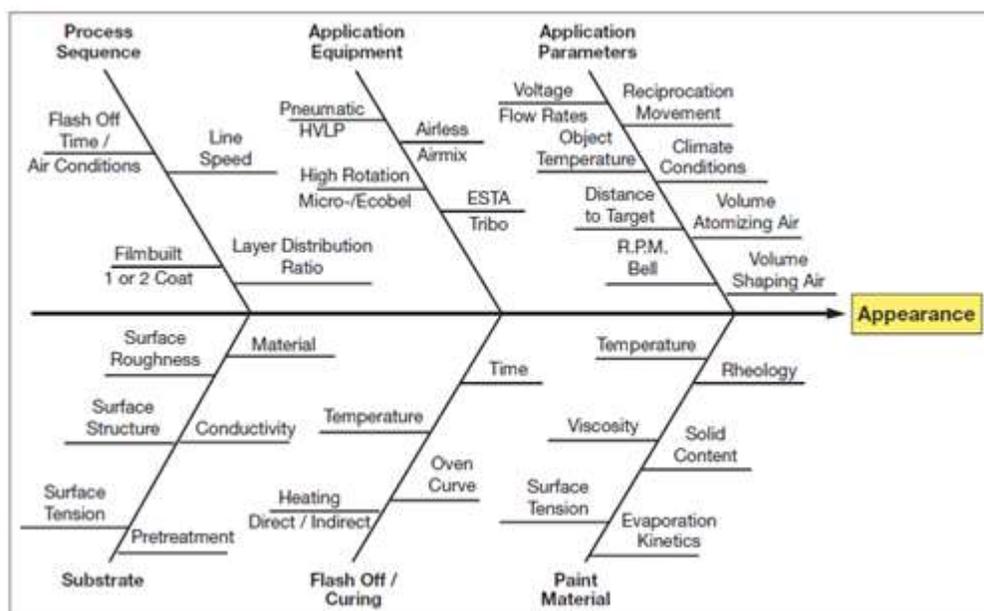


Figura 1. Diagrama de Ishikawa para la aplicación de recubrimientos.(Streitberger,2007)

Los recubrimientos son efectivos cuando se adhieren fuertemente a la superficie a la fueron aplicados y resisten a los factores con los fueron diseñados. Resistencia química, a la oxidación, al deterioro entre otros. Dwight (2009) menciona que la adherencia es el principal factor por el que un recubrimiento puede fallar, por lo que un conocimiento de cuáles son los factores que influyen para tener una mala adherencia son muy importantes para el estudio de los recubrimientos. Cuando un recubrimiento no posee buena adherencia pueden ocurrir dos fallas principales, llamadas delaminación y fractura. La delaminación ocurre cuando la adherencia de la capa superior contra una capa inferior o el sustrato no es suficiente para mantenerlos unidos y se separa. La fractura se da cuando la fuerza de cohesión entre las moléculas del mismo recubrimiento no es fuerte y se rompe.

1.1 Planteamiento del Problema

Fender Musical Instruments Corporation, es una empresa activa desde 1946, que se dedica a la fabricación de instrumentos musicales, principalmente guitarras y bajos. Estos instrumentos son construidos utilizando distintos tipos de maderas, las cuales son recubiertas con pinturas y barnices. El departamento de *Advanced Manufacturing* (manufactura avanzada, por su significado en español) se encarga de caracterizar y validar los diferentes tipos de recubrimientos utilizados sobre las guitarras. Cuando la empresa quiere introducir un nuevo producto, el cual requiere de una pintura nueva, es importante realizar este procedimiento de validación, para que se pueda llevar a cabo su producción y que no existan fallos en el recubrimiento, como agrietamientos o adherencia de la pintura.

Uno de los inconvenientes que ocurre en este proceso es el tiempo y esfuerzo que se requiere para validar una pintura, tomando en cuenta que se debe hacer para cada recubrimiento o nuevo producto que se va a realizar, por lo que es importante realizar un nuevo método que pueda suplantar al ya utilizado, con el fin de que sea más eficiente en tiempo y costo. Conocer el funcionamiento los materiales es parte fundamental en el desarrollo de nuevos productos, en este caso Fender debe conocer las variables presentes en el desarrollo de sus productos para cumplir con un elevado/alto estándar de calidad y con una manufactura de bajo costo.

Existen diferentes técnicas de laboratorio para identificar compuestos presentes en las pinturas utilizadas, el método de espectroscopia infrarroja de la transformada de Fourier (Angelone, 2018) nos proporciona una huella química de los compuestos químicos presentes en el recubrimiento, lo que nos ayudará a garantizar que las pinturas utilizadas no presentan variaciones desde el proveedor. En este proyecto se pretende generar un protocolo para garantizar que la pintura tiene todos los elementos para que funcione de manera correcta y tenga un buen desempeño durante el proceso de producción.

1.2 Justificación

En Fender la reducción de costos es una tarea que se busca implementar todos los días. Siempre se trata de mejorar los procesos disminuyendo el tiempo de ciclo, costos de materiales, mano de obra o tiempo de maquinaria. Para lograr una de las maneras para generar una reducción de costos exitosa, es necesario conocer cuál es el comportamiento ideal de los materiales que utilizan. En este caso, al reducir los defectos en las pinturas, se evitará que las guitarras tengan que ser retrabajadas, esto genera un ahorro en todos los aspectos mencionados anteriormente y principalmente se evitará el repetir el proceso de pintura/pintado en el mismo instrumento.

El tiempo que se tarda en validar la pintura de un nuevo producto en Fender oscila entre los 20 y los 25 días, el cual es demasiado tiempo para sacarlo al mercado, tomando en cuenta que el tiempo de fabricación de una guitarra no supera los 8 días.

Los siguientes puntos expresan de manera concreta la justificación del proyecto.

- El tiempo que tarda un proceso de validación es de 20 a 25 días.
- Se tendrá el producto nuevo en producción en menor tiempo.
- Reducción de costos al evitar retrabajo en instrumentos donde falle el recubrimiento.
- Un nuevo protocolo donde se pueden sustituir los ciclos de temperatura para disminuir los tiempos.

La propuesta para este trabajo es entregar un manual en donde se muestre de forma explícita los pasos a seguir para validar estas pinturas, siendo el objetivo ser más rápido y poder tener un resultado más preciso.

1.3 Antecedentes bibliográficos

Los polímeros basados en poliuretanos fueron inventados por Otto Bayer en Alemania por Otto bayer. Se fabricaron a través de una reacción química llamada poliadición, ocasionada entre los diisocianatos y los polioles. A partir de ese momento empezaron a crearse diferentes trabajos para crear más materiales con esa reacción, dando lugar a plásticos, hules, foams y pinturas. (Malik, 2005).

La tecnología de recubrimientos es una área en donde los sistemas de polímeros entrecruzados juega un papel importante en la industrial actual, usados extensamente en el recubrimientos del mercado automotriz y de muebles. En lo último años, los topcoats de dos componentes (2K) compuestos por uretanos alifáticos eran usados para proteger el exterior de vehículos aeroespaciales, puesto que las propiedades que ofrece el poliuretano.

A partir de los años 80, se han realizado una gran cantidad de estudios. M.E. Kimball trabajó en el efecto de la temperatura de curado en las redes de uretano y se concentró en la estructura y las propiedades físicas del elastómero termoestable. Los investigadores de Bayer y Dupont han realizado numerosos trabajos en el campo del revestimiento de poliuretano Sus trabajos incluyen diferenciar las pinturas de poliuretano 2K del paquete de poliuretano de un paquete (1K) usando FTIR de reflexión total atenuada (ATR) para rastrear la cinética de reacción en comparación con el uso de FTIR de transmisión usando gránulos.(Malik,2005).

En la industria, existen muchos tipos de recubrimientos, las exigencias del mercado, han empuja a las empresas a invertir más en el proceso de recubrir. Para esto es necesario contar con un laboratorio en donde se puedan realizar mediciones y experimentos a los recubrimientos antes y durante su uso. Existen dos tipos de experimentación, la química, la cual identifica los componen presentes en el compuesto o mezcla así como los porcentajes de cada compuesto, algunos ejemplos son el FTIR y el TMA. Y las físicas, la cuales ponen a prueba el desempeño de recubrimientos como la mediciones de la adherencia, como lo hacen las pruebas de *cross-cut* y *Pull-off*.

La técnica de espectroscopia infrarroja, es utilizada para identificar qué tipo de moléculas se encuentran en un compuesto. Brunatti 2015, explica la teoría qué hay detrás

de una espectrometría y como se obtiene un espectro de una lámina de pintura o del producto líquido antes de ser catalizada. Con esta herramienta es posible obtener una huella química del material que se analiza esto con el fin de poder tener conocimiento de las moléculas presentes en la mezcla y así poder identificar la composición química del recubrimiento lo que permite comparar entre distintos materiales y lograr identificar cuáles son los componentes que deben estar presentes en un recubrimiento para que logre una buena adherencia, evitando la delaminación. Cuando la radiación IR incide en una muestra, parte de la radiación es absorbida por la muestra y otra parte la atraviesa (se transmite). La señal resultante en el detector es un espectro que representa la huella molecular de la muestra. La espectroscopia Raman y la Espectroscopia Infrarroja de la Transformada de Fourier así como la UV-VIS son técnicas no invasivas ni destructivas utilizadas en la caracterización de pinturas.

El estrés residual surge en los recubrimientos cuando se aplican diferentes capas y tipos de recubrimientos sobre un sustrato, es un proceso natural que ocurre cuando se secan o curan. Goldschmidt, 2007 menciona que cuando se solidifica una película de material de recubrimiento ya sea físicamente por la evaporación de solventes o químicamente por la reacción de entrecruzamiento molecular, existe un encogimiento de la película, lo que cambia su densidad ocasionando cambio [BG4] de volumen dando lugar a un estrés residual. Esto es provocado por las fuerzas internas de un recubrimientos cuando existe un diferencia de coeficiente de expansión de los materiales utilizados en el recubrimiento, esto genera estrés residual lo que puede ocasionar una delaminación o disminución de la fuerza de adherencia (Comyn et al. 2012)

Bruce 2003, muestra las técnicas utilizadas para operar el equipo TMA 4000 de perkin elmer, con el que podemos realizar un estudio termomecánico con el cual determinar el coeficientes de expansión de un recubrimientos. Es indispensable conocer este valor, puesto que una diferencia en coeficientes de expansión entre las diferentes capas de un recubrimiento dar lugar aun de laminado, lo que hace que la pintura falle.

1.4 Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son las variables que influyen en la aplicación de un recubrimiento?
- ¿Utilizando este método de análisis se podrá identificar qué tipo de recubrimientos es, el coeficiente de expansión y correlacionar con la adherencia.
- ¿Se podrá correlación el método cualitativo contra el cuantitativo de medición de adherencia?
- ¿Se podrá utilizar este método desarrollado para todos los tipos de recubrimientos?

1.5 Hipótesis

Existe una correlación directa con la diferencia de coeficiente de expansión entre capas del recubrimiento contra la adherencia. Utilizando esta relación se implementará en el protocolo validación.

1.6 Objetivo general

Desarrollar un protocolo de validación de recubrimientos en guitarras y bajos para eliminar los ciclos de temperatura mediante el análisis de la relación entre el coeficiente de expansión de los recubrimientos, las pruebas de adherencia y la identificación química del compuesto.

1.7 Objetivos específicos

- Identificar las tecnologías de recubrimientos que se utilizan en Fender y cuáles de estos recubrimientos son los de mayor producción, determinar cuál es el proceso de validación que sigues actualmente
- Determinar el espectro IR (infrarrojo) de cada material que compone el recubrimiento y analizarlo con la técnica de espectroscopía FTIR (Transformada de Fourier Infrarrojo) utilizando el acoplamiento ATR, para identificar de qué moléculas está compuesto y determinar si es un poliuretano o un poliéster.
- Encontrar la correlación que existen entre las pruebas físicas de adherencia *cross-cut* contra las de *pull-off* y crear una base de datos para poder utilizar el *pull-off* como método cuantitativo.
- Determinar los coeficientes de expansión térmica de los diferentes materiales que componen al recubrimiento para determinar si existe una diferencia entre las capas y poder identificar si la adherencia disminuye al ser materiales distintos.
- Actualizar el protocolo de validación con las nuevas herramientas.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Recubrimientos

Un recubrimiento, es la tecnología que se encarga de cubrir por completo un sustrato, para cambiar sus propiedades químicas o físicas, con el fin de mantener o proteger su superficie. Esto le da al sustrato una apariencia distinta, que se aprovecha para usarse como decoración. En la industria existen distintos tipos de recubrimientos, pero todos se caracterizan por tener estas principales sustancias como materia prima, una resina, un solvente, aditivos, y en algunos casos también puede tener pigmentos.

Las pinturas, son solo una clasificación dentro de los recubrimientos que a su vez se pueden dividir por diferentes categorías, como son, su característica *clearcoat* o *Top Coat* (Barniz transparente, se aplica en la superficie como capa protectora), metálica, sólida. Por la capa en la que se encuentra en un sistema de recubrimiento. *primer* (pre-base, se aplica como la primer capa), color, *topcoat*), en donde va a ser aplicada (automotriz, marítimo, decorativo) por la tecnología que usa, (base agua, base aceite, UV, powder coating) o por la manera en que solidifican, (secado, catalizado, horneado) (Streitberger, 2007). Entre otras categorías, ya que existen muchas tecnologías disponibles para recubrir un material, es necesario identificar qué tipo de material se va a recubrir, qué propiedades se requieren del recubrimiento, la compatibilidad que existe entre sustrato y recubrimiento y la manera en que se va a aplicar.

2.2 Tipos de recubrimientos.

En este trabajo se estudió un sistema de recubrimiento que consisten en un primer, un color y *un top coat* (capa superficial), y el sustrato al que se aplicó es madera. Las características de estos recubrimientos es que deben tener un acabado decorativo y protector de la madera y se emplearon 3 diferentes materiales, poliuretanos y poliésteres.

Los poliésteres (figura 2) son cadenas poliméricas de ésteres, que se obtienen al hacer reaccionar ácidos multi o anhídridos multifuncionales para generar una cadena base que contengan grupos éster. Una de las desventajas de los poliésteres es que no contienen enlaces dobles conjugados, por lo que no tiene sitios donde se genera un

entrecruzamiento oxidativo, pero esto los hace químicamente manipulables, con lo que se puede lograr tener un material con gran variedad de propiedades físicas y químicas.

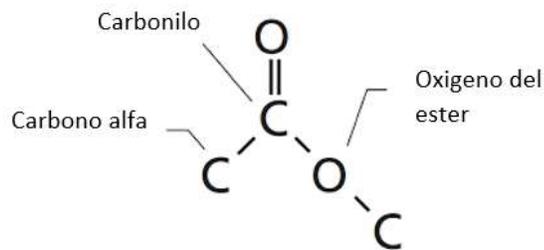


Figura 2. Molécula de los poliesters (Crompton,2009)

Los poliuretanos, son los recubrimientos más versátiles que existen, desde *lacquer* común, hasta uso automotriz de alto rendimientos. Estos recubrimientos se fabrican haciendo reaccionar el grupo alcohol (R-OH) con un isocianato (R-NCO) para formar uretano, la figura 3 muestra cómo se lleva a cabo esta reacción, y la estructura que da a lugar. Posteriormente, se genera una reacción de en cadena de poliadición, en donde las cadenas de uretanos se unen entre sí para generar poliuretano. Los uretanos usualmente consisten en dos partes, el recubrimiento y el catalizador, el cual se encarga de iniciar la reacción en cadena de los polioles y los isocianatos para generar un entrecruzamiento que al finalizar, el recubrimiento endurece y cura.

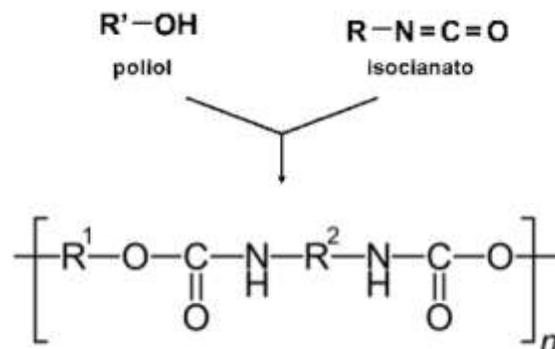


Figura 3. Reacción del poliuretano (Malik,2005)

2.3 Causas de falla de los recubrimientos

Para entender por qué los recubrimientos fallan, es necesario definir qué significa qué fallen. Un recubrimiento falla, cuando deja de cumplir el objetivo para el cual fue aplicado, esto puede ser, que estéticamente se vea mal aplicado o no uniforme, que el

recubrimiento presente grietas y deje pasar alguna sustancia que dañe al sustrato o que no tenga buena adherencia y se desprenda del sustrato. Todas estas son posibles fallas que se pueden dar en un recubrimientos, pero no son todas y las razones por las que se da no siempre se debe a lo mismo. Existe una gran cantidad de modos de falla pero las principales son: Aplicación del recubrimiento con una técnica incorrecta, formulación incorrecta, exposición a cambios de temperatura y humedad antes de curar y utilizar un sustrato incompatible. La técnica de aplicación y la exposición a cambios son factores que se controlan en las cabinas de aplicación de Fender, pero la formulación es algo que viene del proveedor y es necesario estudiar antes de aplicar.

Este estudio se enfoca a disminuir el fallo por mala adherencia, por lo que busca cuales son los factores que disminuyen la adherencia en los recubrimientos. La adherencia es fundamento principal de los recubrimientos, por qué si no tiene buena adherencia el recubrimiento se desprende del sustrato, invalidando por completo función principal que es recubrir. Aparte de los factores que hacen que un recubrimiento falle existen otros factores naturales que disminuyen la adherencia como los son el estrés mecánico o residual, que se genera cuando el material cura, los solventes se evaporan, cambiando su densidad (Weldon,2009).

2.4 Caracterización de recubrimientos.

En la industria y la ciencia, la caracterización de materiales, es cuando se habla de ciencia de materiales y se hace referencia al proceso general por el cual se logra la estructura de un material sus propiedades químicas y físicas. Es un proceso fundamental en el campo de la ciencia de materiales y en la industria, pues que sin él no se podría determinar un entendimiento científico de la ingeniería de materiales. Existen diferentes niveles a los cuales se realiza la caracterización, en donde se puede determinar con exactitud, de es que esta compuesto un material. En la industria, lo que se busca es encontrar si cumple con las características para las cuales fueron diseñadas, por lo que generalmente, solo basta con encontrar un par de parámetros para caracterizarlo. Se pueden realizar pruebas físicas o químicas, las cuales determinan si el material, cumple con las especificaciones iniciales.

2.4.1 Prueba *cross-cut*

La prueba de *cross-cut* es una prueba física que se basa en los estándares ISO 2409 y ASTM D3359 en donde se utiliza una navaja especial para hacer un corte en forma de cruz, en el recubrimiento, llegando hasta el sustrato, después de realizar la prueba, se identifica si ocurre una delaminación y qué nivel de delaminación existe, de acuerdo a la figura 3. (Streitberger, 2007)

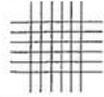
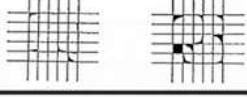
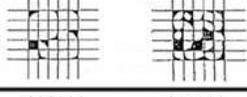
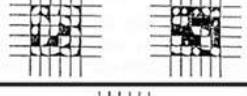
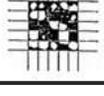
Classification	% of Area Removed	Surface of Cross-cut Area From Which Flaking has Occurred for 6 Parallel Cuts & Adhesion range by %
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5 - 15%	
2B	15 - 35%	
1B	35 - 65%	
0B	Greater than 65%	

Figura 4. Diagrama de *cross-cut* para identificar el nivel de delaminación (Streitberger, 2007)

A continuación se muestran en la figura 5 ejemplos de pruebas de *cross cut*, realizadas en los sistemas de recubrimientos utilizados en Fender, que consiste en *undercoat*, color y *top coat*.

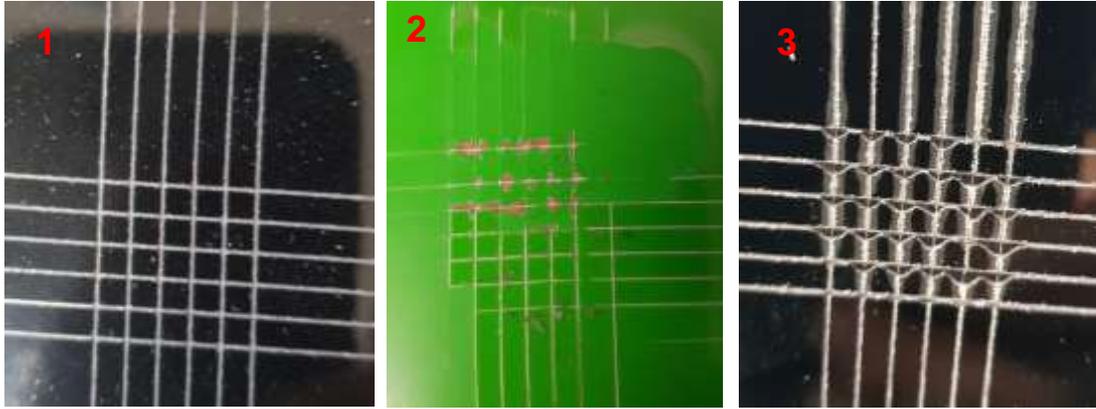


Figura 5. Se muestran tres ejemplos de prueba de cross cut, (1) prueba 5B con buena adherencia sin delaminación (2) Prueba 0B , laminación total, fallo de TOP COAT y color (3) Prueba 3B, falló de TOPCOAT delaminación.

2.4.2 Prueba *Pull-off*

La prueba de *Pull Off* también es una prueba física de adherencia mostrada en la figura 5 y es uno de los métodos de ensayo de tensión para recubrimientos. Se basa en el estándar de la ASTM D4541 y está diseñada bajo el concepto de que la fuerza de tensión necesaria para retirar de un disco metálico unido a una capa superficial del sustrato, es igual a la resistencia a la compresión del material por lo tanto a su adherencia.(Defelsko,2018)

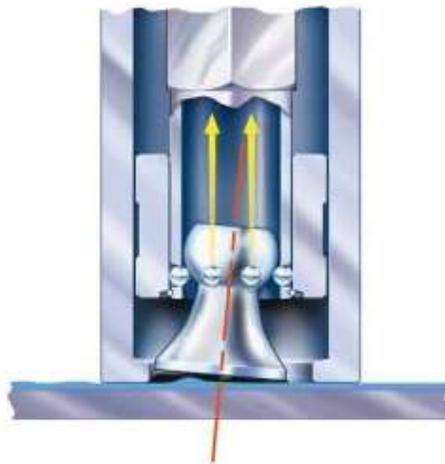


Figura 5. Diagrama del método *pull-off* (Defelsko,2018)

2.4.3 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, es una herramienta de análisis que permite identificar y estudiar sustancias químicas. Las muestras pueden ser sólidas líquidas o gaseosas, puesto que es una herramienta de caracterización química no destructiva. Su funcionamiento consiste en hacer incidir un haz de luz infrarroja, sobre muestra y leer el resultado final de haz de luz pues de qué interactuó con las moléculas de muestras. Lo que sucede es que esta luz hace vibrar a las moléculas generando una absorción en diferentes longitudes de onda, esto generar un espectrograma que puede ser posteriormente analizado. La figura 6 muestra los tipos de vibraciones que se generan las moléculas por le incidencia de la luz.

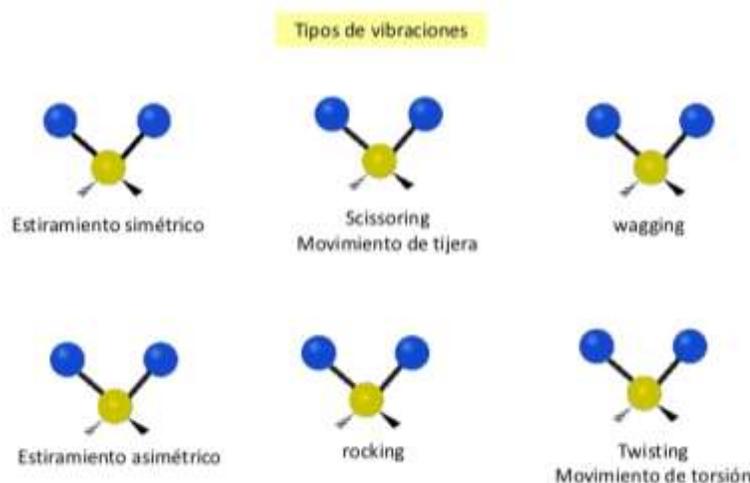


Figura 6. Tipos de vibraciones para identificar compuestos.(William,2011)

Para generar este espectrograma se utiliza un algoritmo generado a partir de una transformada de fourier, que lograr mejorar la señal de salida de la muestra (Warson,1998). Existen varias formar de tomar una espectro a una muestra, pero una de las técnicas más utilizadas es la de ATR qué significa reflexión total atenuada, puesto que no es necesario preparar la muestra para poder analizarla y esto la hace muy efectiva para generar estudios de materiales en estado sólido o líquido rápidamente, como se muestra en la figura #, el viaje del haz de luz, sobre la muestra.

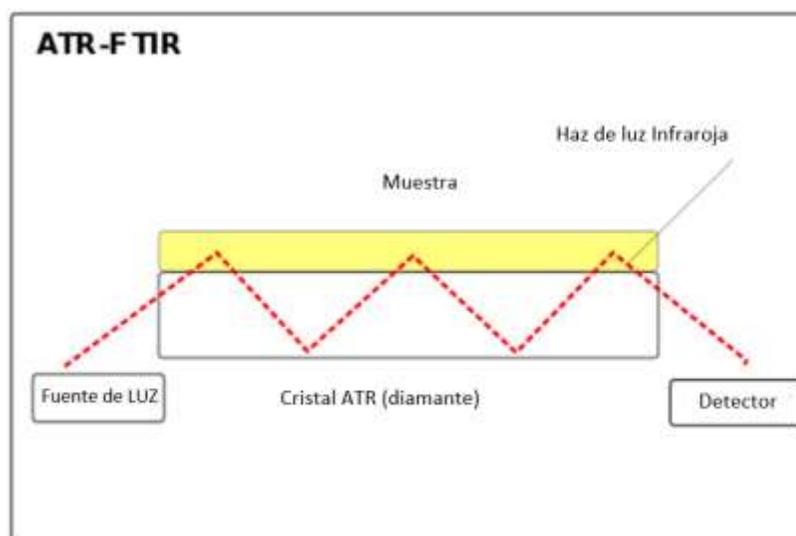


Figura 7. Viaje de la luz en un sistema de espectroscopia por ATR.(Brunatti,2015)

Una de las desventajas del ATR es que solamente puede analizar la superficie de la muestra, también hay algunos materiales que no pueden ser analizados por esta técnica si su fricción interna es muy cercana a la del diamante. Esta técnica es muy versátil para analizar polímeros puesto que es capaz de leer el espectro de recubrimientos sin catalizar, en estado líquido y catalizador en estado sólido.(Crompton,2009).

Para poder concluir un análisis de espectro, a parte de generar la medición utilizando el equipo, es necesario identificar los picos que surgen de la interacción de la luz con las moléculas, en la figura 8, se muestra una manera de identificar dichos picos y cuales son las regiones de interés. Como se observa, la región que comprende de 600 cm^{-1} a 1400 cm^{-1} se conoce como huella dactilar y es específica de cada material. Esta región es muy utilizado para generar análisis comparativo y poder identificar si un material es igual a otro. Una herramienta que se utilizar para comprar dos muestras y qué tan igual o diferentes son , es la de correlación, donde se compra la diferencia que hay en el área bajo la curva del espectro y arroja un porcentaje, lo que se busca para mencionar que un material tiene una buena correlación , es que posea un porcentaje de correlación de 98.5% a 100%. (Lindon,2000).

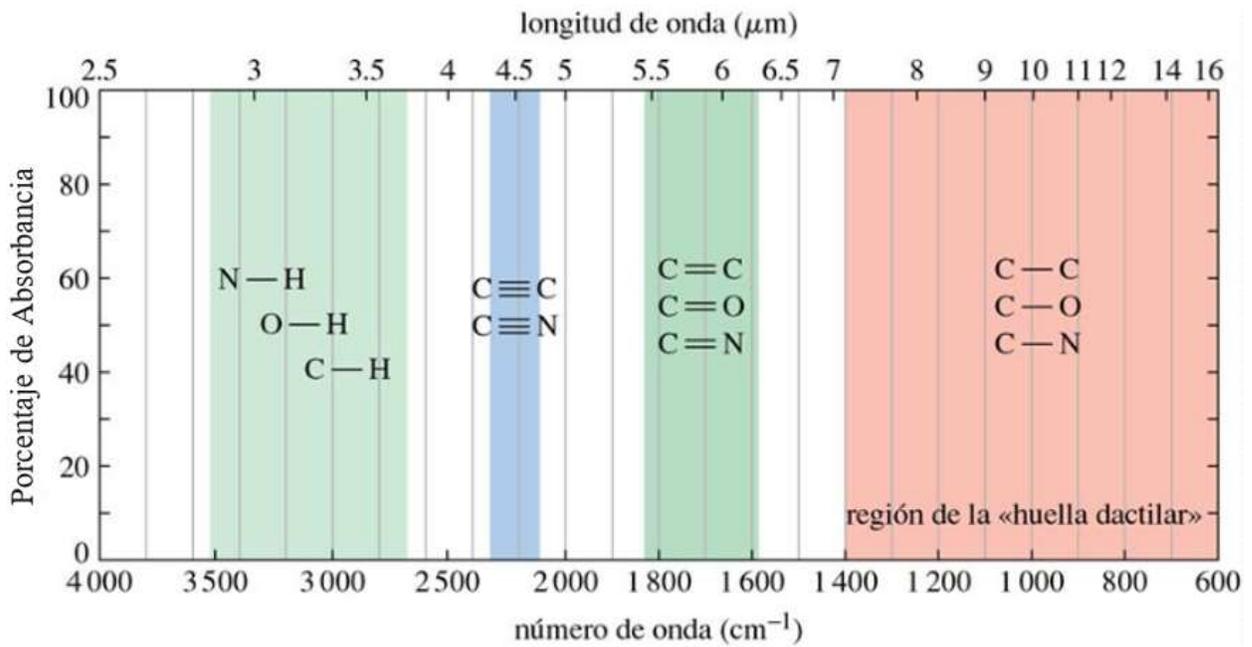


Figura 8. Regiones de diagnóstico y huella dactilar de los espectros.(Estay,2014)

A continuación en las figuras 9 y 10, se muestran las tablas de identificación de los poliuretanos y los polyester.

NÚMERO DE ONDA	ASIGNACIÓN
3360 CM^{-1}	NH, OH estiramiento
2950 CM^{-1}	Grupos alifáticos -CH ₃ y -CH ₂
2285 CM^{-1}	-N=C=O vibración
1727 CM^{-1}	Estiramiento -C=O
1689 CM^{-1}	Vibración urea -C=O
1456 CM^{-1}	C-N deformaciones
1242 CM^{-1}	C-N estiramientos
1150 CM^{-1}	C-O-C estiramientos
1015 CM^{-1}	C-C C-N y C-O estiramientos

Figura 9. Tabla de identificación de los poliuretanos, se muestran las vibración y estiramientos de las moléculas más importantes que conforman a los poliuretanos. (Rangel,2014)

Estas tablas, sirven para poder identificar , a través de una espectroscopia, qué tipo de moléculas están generando las diferentes vibraciones.

NÚMERO DE ONDA	ASIGNACIÓN
1077 CM^{-1}	Vibraciones y estiramiento en C-O y O-CH ₂
1460 CM^{-1}	CH ₂ vibración de tijera
2850 CM^{-1}	C-H vibración simétrico
2920 CM^{-1}	C-H vibración asimétrico
1285 CM^{-1}	Estiramiento en C-O y -O-C=O
970 CM^{-1}	C-O estiramiento
1126 CM^{-1}	C-O-C vibración simétrico
1252 CM^{-1}	=C-O-C vibración asimétrico
1340 CM^{-1}	CH ₂ vibraciones fuera de plan
1718 CM^{-1}	C=O estiramientos

Figura 10. Tabla de identificación de los poliésteres, se muestran las vibraciones y estiramientos de las moléculas más importantes que conforman a los poliuretanos.(Zieba,2017)

2.4.4 Análisis Termomecánico (TMA)

El TMA por sus siglas en inglés, es un análisis termomecánico se usa para caracterizar la expansión lineal, las transiciones de vidrio y los puntos de ablandamiento de los materiales mediante la aplicación de una fuerza constante a una muestra mientras varía la temperatura. Para mediciones de expansión, una sonda descansa sobre una muestra en un escenario con una presión controlada, de tal manera que es imperceptible al material, de esta manera, la sonda logra detectar estos cambio de dimensión del material. Otros experimentos de fuerza constante incluyen la medición de penetración, flexión, tensión, contracción, y expansión. En la figura 11, se muestra el esquema de funcionamiento de este instrumento.

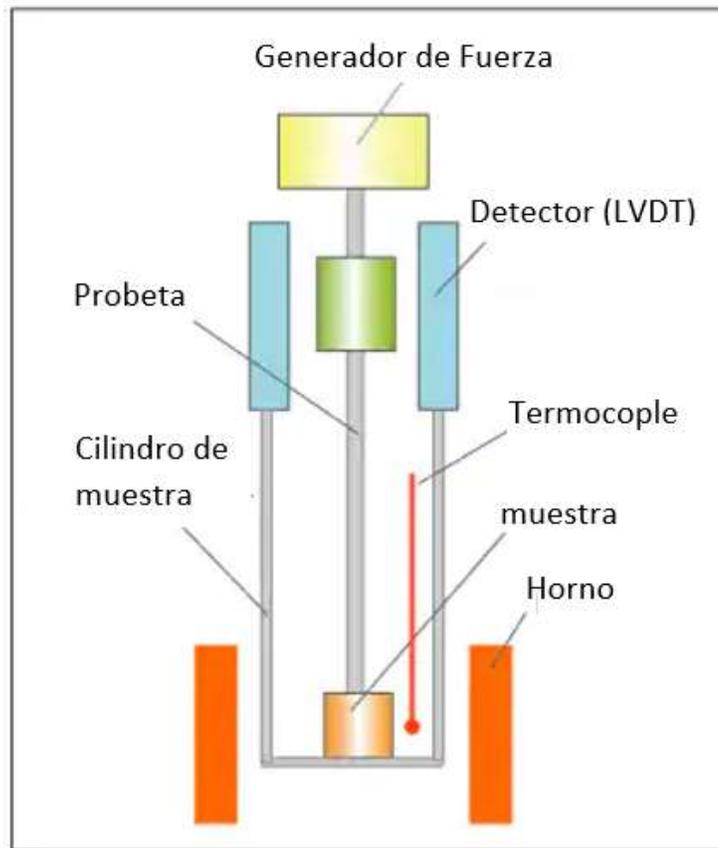


Figura 11. Diagrama de funcionamiento del analizador termomecánico. (Crompton,2013)

El instrumento de análisis termomecánico solo necesita aplicar suficiente tensión para mantener la sonda en contacto con la superficie de la muestra, pero debe tener una alta sensibilidad al cambio dimensional. El experimento debe realizarse a una velocidad de cambio de temperatura lo suficientemente lenta como para que el material se acerque al equilibrio térmico en todo momento. Si bien la temperatura debe ser la misma en todo el material, no necesariamente estará en equilibrio térmico en el contexto de relajaciones moleculares. Es por eso que un cambio lento de temperatura arrojará un mejor resultado. La figura 12, muestra una gráfica típica que genera el instrumento para analizar la muestra.

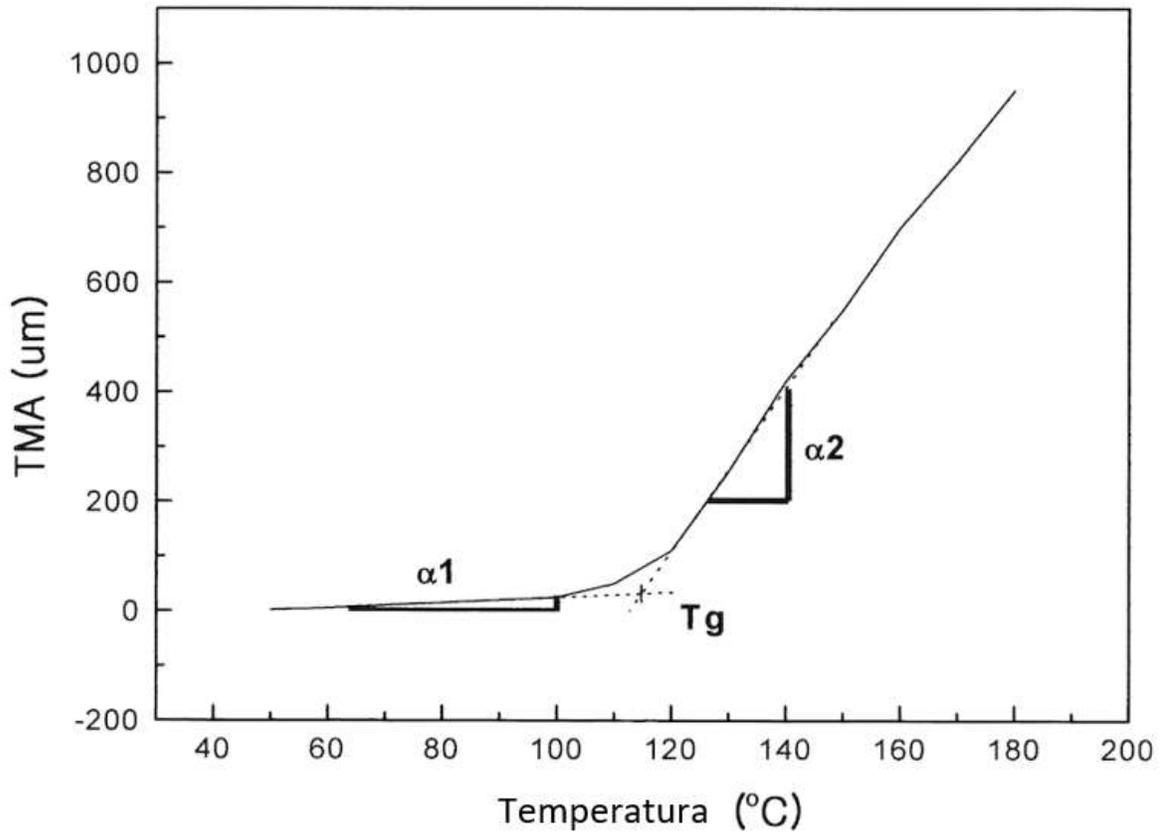


Figura 12. Gráfica de una análisis termomecánico sobre un material.(crompton,2013)

A partir de esta gráfica se calcula el coeficiente de expansión térmica utilizando la ecuación de la figura 13. Donde L es longitud y T el cambio de temperatura.

$$\alpha = \frac{L - L_0}{L_0 \cdot \Delta T}$$

Figura 13. Ecuación del coeficiente de expansión térmico.(Bruce,2003)

Capítulo 3. Metodología

El presente proyecto de aplicación busca encontrar la correlación que existe entre el coeficiente de expansión térmica contra la adherencia de los recubrimientos. Para encontrar esta relación se siguió la siguiente metodología.

3.1 Materiales

En esta investigación se utilizaron los siguientes instrumentos de medición y materiales.

- Analizador Termomecánico *TMA 4000* de *PerkinElmer*. Utilizando la probeta de penetración.
- Espectrómetro infrarrojo *FTIR Frontier Perkin Elmer*, Utilizando el método de ATR (Attenuated total reflection).
- *Metodo cross-cut TQC Sheen CC3000 Cross Cut ASTM D3359*
- *Método pull-off defelsko positest AT-A automatic adhesion Tester S/N AT11398*
- Recubrimientos y sustratos utilizados en fender.
 - Colores
 - Fiesta Red Uretano
 - Fiesta Red Poliéster
 - Lime Green Uretano
 - Lime Green Poliéster
 - Snow White Uretano
 - Snow White Poliester
 - TOPCOAT
 - Poliéster
 - Uretano
 - Undercoat
 - Poliéster
 - Sustrato
 - Madera Alder

3.2 Método

Para esta investigación se utilizaran los recubrimientos utilizados en la fabricación de guitarras y bajos en fender para generar un protocolo de validación, que consista en una serie de pasos a seguir, en donde se evaluará qué tipo de material componen a los recubrimientos ,cual es el coeficiente de expansión de cada material y cual es la fuerza de adherencia que tienen las pinturas sobre los sustratos.

3.2.1 Recubrimientos y método actual

Se buscaron las diferentes tecnologías de recubrimientos que se utilizan en Fender en mayor cantidad y se seleccionaron diferentes recubrimientos utilizados para validar en el protocolo. Se utilizó el inventario del almacén de pintura de la fábrica para identificar qué colores se utilizan actualmente que estuvieran disponible en dónde tipos de tecnología, en base poliuretano y base poliéster. Posteriormente se buscó en el histórico de aplicación de la planta para seleccionar tres colores de mayor producción que se encontrarán disponibles en las dos diferentes tecnologías.

Se evaluó el protocolo actual y se buscó una mejora para reducir los tiempos de prueba. Se analizó el procedimiento de validación utilizado actualmente, y se ajustaron las tareas a realizar para ejecutarlas en paralelo. Se realizaron *dummies* (rectángulos de 6 pulgadas por 8 pulgadas, de madera alder utilizados para realizar pruebas), utilizando todas las combinaciones posibles a partir de los tres colores seleccionados en base poliéster y poliuretano.

3.2.2 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

En esta sección se utilizó un equipo de medición de espectro Infrarrojo por transformada de Fourier con un acoplamiento ATR de marca *Perkin Elmer* modelo *FTIR Frontier*, como se muestra en la figura 14 A, para realizar mediciones de espectroscopia a los los materiales de recubrimiento utilizados en Fender. El objetivo de este método, era encontrar y caracterizar los picos de absorbanca más importantes que se presentan en un poliéster y un poliuretano, se buscó en la literatura las tablas de identificación de picos que representa a estos materiales, posteriormente se analizaron los espectros

generados por cada material estudiado y con esto, se generó una plantilla con la cual, se podrá identificar de qué material se trata.

3.2.3 Pruebas *Cross-cut* y *Pull-off* .

En el procedimiento anterior, para la validación de recubrimientos, se utiliza como prueba de adherencia un método llamada *cross-cut* (*Metodo cross-cut TQC Sheen CC3000 Cross Cut*, empleando la herramienta de la figura 13 A, se realiza un corte en forma de cruzar sobre el sustrato que se está analizando, y se evalúa el nivel de laminado que se genera a partir de la tabla de la figura 4, el cual es un método cualitativo de verificación de adherencia que va del 1 como peor caso al 5 como mejor adherencia. La desventaja de este método, es que a pesar de ser una prueba rápida, no muestra valores continuos, los cuales ocultan mucha información del comportamiento del recubrimiento, es por esto que se empleo el nuevo método cuantitativo *Pull-off* (*Método pull-off defelsko positest AT-A*) mostrado en la figura 13 B, el cual es una herramienta muy útil para realizar validaciones, puesto que arroja valores de fuerza en Libras por pulgada cuadrada (PSI) continuos, los cuales pueden servir para realizar estudios más específicos como los que se hacen esta investigación.

Para poder hacer la transición del método cualitativo al cuantitativo , primero se generó una correlación de datos, en donde se realizaron 24 elementos de prueba (*dummies*, en inglés), utilizando las diferentes combinaciones a parte de los materiales seleccionados, que son los colores Fiesta Red, Lime Green y Snow white, en base poliéster y poliuretano y se utilizaron dos tipos de Topcoat de los mismos materiales. Utilizando estos *dummies* de prueba, se realizaron las pruebas de adherencia con ambos métodos y se registraron los resultados. Posteriormente se realizó una análisis de correlación utilizando el software Minitab para analizar los resultados.

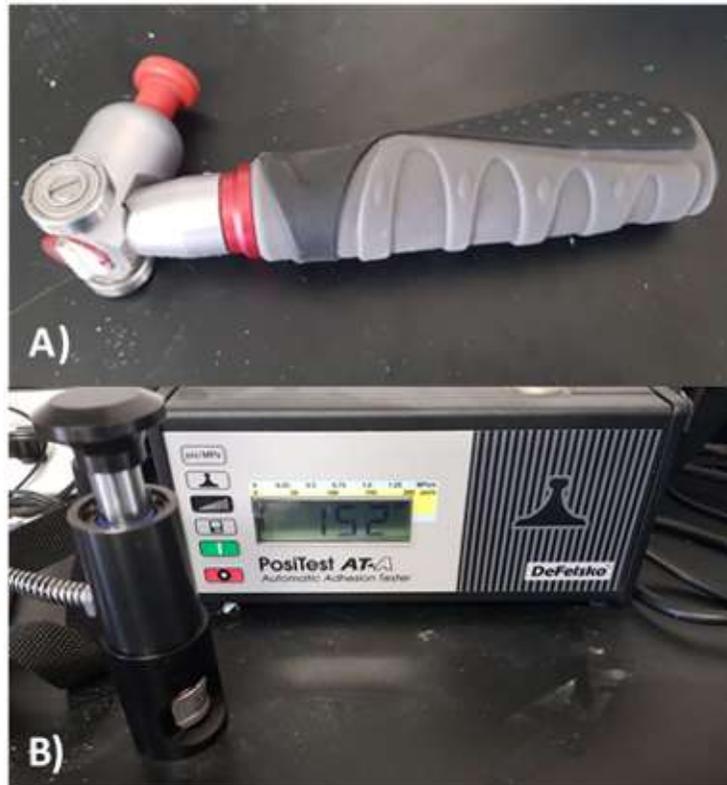


Figura 13. Instrumentos de medición de los métodos físicos, A) *Metodo cross-cut TQC Sheen CC3000 Cross Cut* B) *Método pull-off defelsko positest AT-A automatic adhesion Tester*

3.2.4 Análisis termomecánico.

Para hacer el estudio de la relación que existe entre el coeficiente de expansión y la adherencia se utilizó un analizador Termomecánico de marca *Perkin Elmer*) modelo *TMA 4000* con la probeta de expansión como se muestra en la figura 14 B. Para realizar esta medición se extrajo una muestra de cada material de los dummies de prueba previamente fabricados utilizando una navaja de precisión, se cortaron láminas cuadrados de aproximadamente 1 cm por 1 cm, con un grosor de promedio de 250 μm , como se muestra el figura 14. Se utilizó la probeta de medición de expansión, con una fuerza nula, la cual permite identificar los cambios dimensionales de la muestra con respecto al cambio de la temperatura.

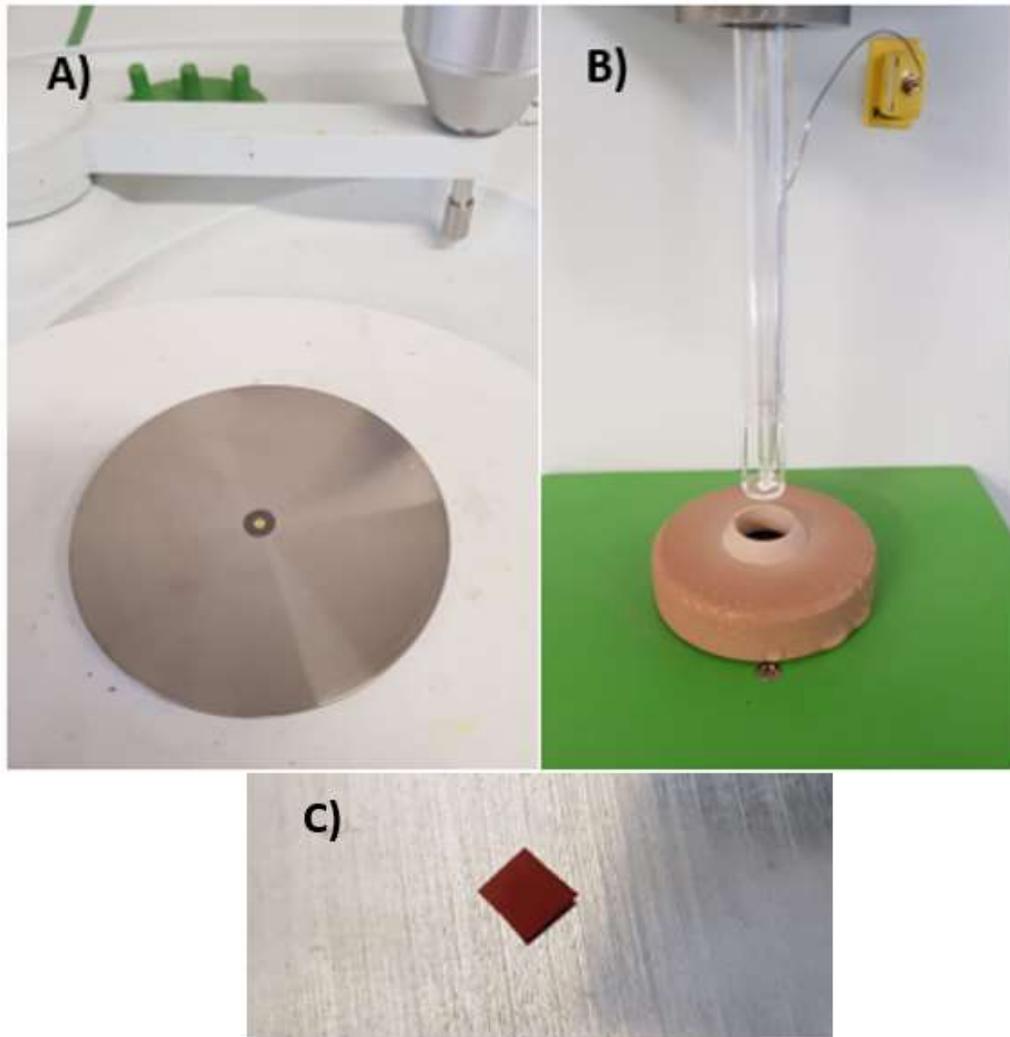


Figura 14. Instrumentos de medición de los métodos químicos y muestras, A) FTIR B) TMA y C) muestra de análisis para el TMA del Fiesta Red Poliéster

Se midió el coeficiente de expansión de todos los materiales investigados en este trabajo, empleando un gradiente de temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. El rango de temperatura fue de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, reproduciendo las temperaturas que se utilizando en ciclo de temperaturas en el método anterior. Este ciclo se realizó un total 10 veces. Posteriormente se analizaron los resultados para obtener el coeficiente de expansión utilizando la ecuación de la figura 13. Los datos se tomaron de la región en donde la pendiente de la gráfica que arroja el equipo es lineal.

3.2.5 Protocolo de validación.

Después de obtener los resultados de los análisis anteriores, se verificaron las i

3.3 Plan de trabajo

A continuación, se presenta el cronograma de las principales actividades en la figura 16, del anteproyecto iniciando las actividades en Julio del 2019. Se describe la actividad a realizar y el periodo que se prevé que se demorara.

Actividad	octubre- febrero	abril- junio	julio- agosto	septiembre	octubre	noviembre
Investigación bibliográfica pertinente al tema, recolección de artículos y libros. Verificación del proceso actual y búsqueda de posibles mejoras.	X					
Delimitación del número de recubrimientos que se van a evaluar. Propuesta de métodos que se van a utilizar.		X				
Inicio de desarrollo del método experimental, recolección de muestras y ensayo de equipos y herramientas. Procesamiento de datos y realización de gráficas			X			
Procesamiento de datos y realización de gráficas. Análisis de datos, comparación con resultados anteriores encontrados en bibliografía.				X		
Evaluación de resultados, determinar si se requiere más obtener más datos.					X	
Elaboración del informe final						X

Figura 15. Tabla de actividades

Capítulo 4. Resultado y discusión

4.1 Resultados Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

A continuación se muestran los resultados obtenidos utilizando el equipo de medición de Perkin Elmer FTIR con el aditamento ATR. Se midieron los espectros de los recubrimientos que están compuestos a base de uretanos y ésteres para poder identificar los picos que caracterizan a estos materiales. Después de tomar la espectroscopia como se indica en la metodología, se graficaron los resultados. Posteriormente se identificaron los picos más importantes que surgen de los uretanos, utilizando las tablas de referencia.

4.1.1 FTIR Poliuretanos

La figura 17, muestra los picos de espectroscopia FTIR para uretanos, como se puede observar, los picos más importantes que logra identificar la espectroscopia, son en la región de vibración de las moléculas que contienen Nitrógeno y grupos Oxígeno Hidrogeno ya que la molécula que se presenta con mayor frecuencia es la adición del isocianato ($R-N=C=O$) y el poliol ($R-OH$), que dan lugar a la creación del uretano $R'-O-C(=O)-NH-R'$. Utilizando las tablas de espectroscopias, se identifica la vibración de Nitrógeno de los grupos amino que se forman en el compuesto poliuretano. En las figuras # # #, se puede observar que en la región 3360 cm^{-1} y 2285 cm^{-1} encontramos las vibración de los grupos amina y las vibraciones de los dobles enlaces formados por $-N=C=O$.

Otra región importante que se encuentra en la zona de los 1689 cm^{-1} es la vibración del doble enlace del carbono de la molécula de la urea $CO(NH_2)_2$ que también está presente en este tipo de polímeros.

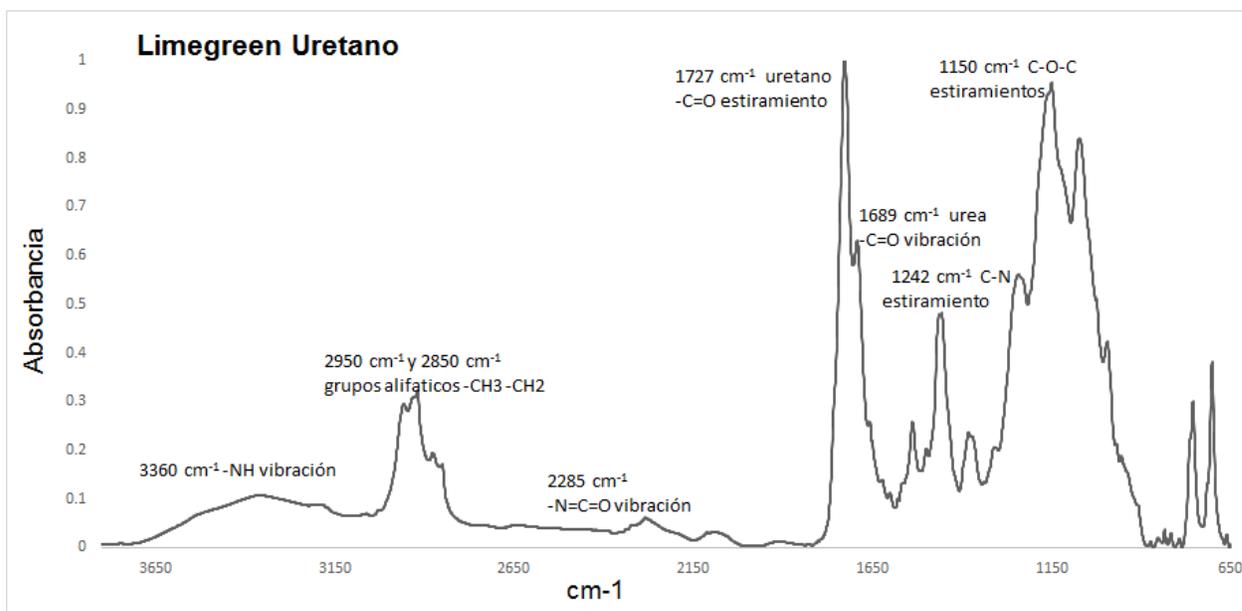


Figura 16. Espectroscopia del color poliuretano *lime green*

Se realizaron los mismo análisis para cada color de los materiales hechos a base de poliuretanos y se encontró que los tres comparten las regiones importantes de los poliuretanos. Es importante mencionar, que en la región que comprende de los 1200 cm^{-1} a los 400 cm^{-1} mostrará picos diferentes aunque se trate del mismo material, por qué esta zona se conoce como la región de huella dactilar, y es difícil lograr distinguir los picos, esta región es característica de cada recubrimiento.

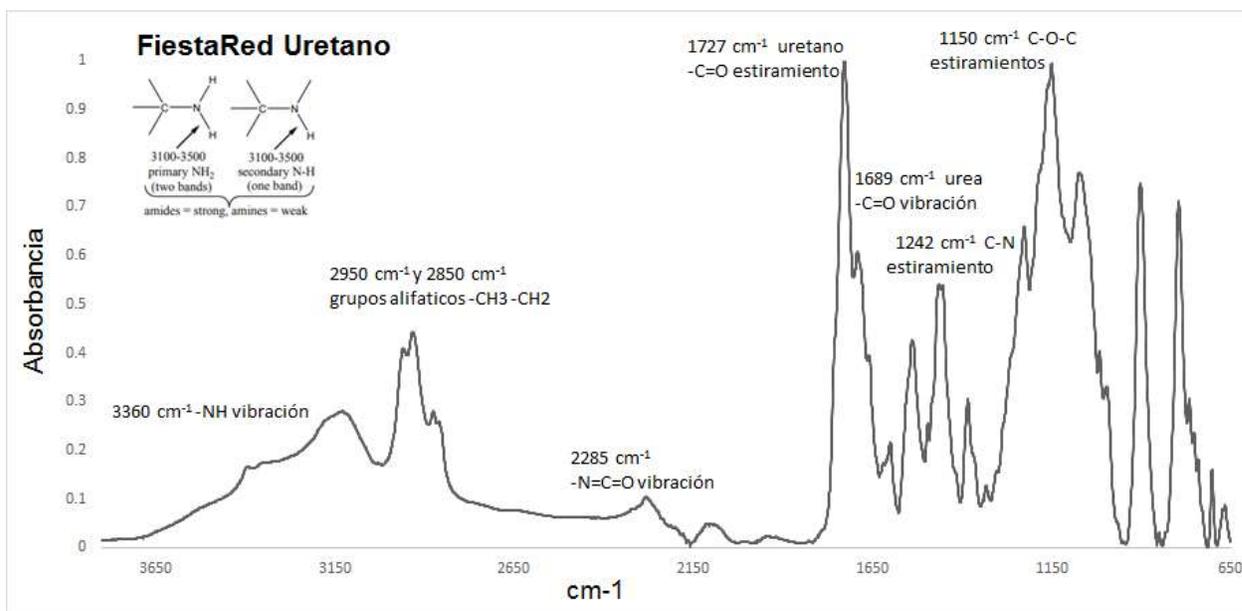


Figura 17. Espectroscopia del color poliuretano *Fiesta Red*.

Después de analizar los materiales, se generó una plantilla de identificación de materiales, esto con el fin de generar una base de datos confirmar si los recubrimientos que está recibiendo la empresa fender son compatibles entre sí. Lo que se pretende con este análisis es lograr identificar principalmente, si el recubrimiento está hecho a base de poliésteres o poliuretanos.

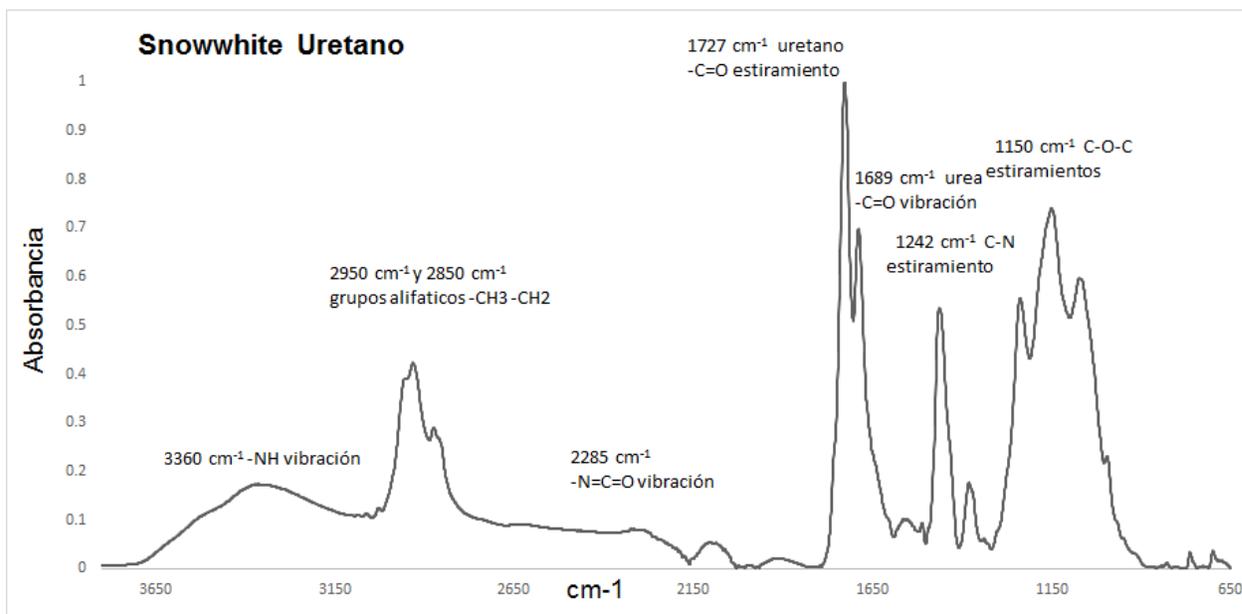


Figura 18. Espectroscopia del color poliuretano snowwhite.

4.1.2 FTIR Poliéster

En esta sección se muestran las gráficas obtenidas utilizando la técnica de FTIR en donde se midieron los tres colores fabricados a partir de poliésteres con los que se trabajaron en este estudio, *Fiesta Red*, *Lime Green* y *Snow white*. Se realizó una plantilla en donde se localizan los picos más significativos de las moléculas de los poliésteres.

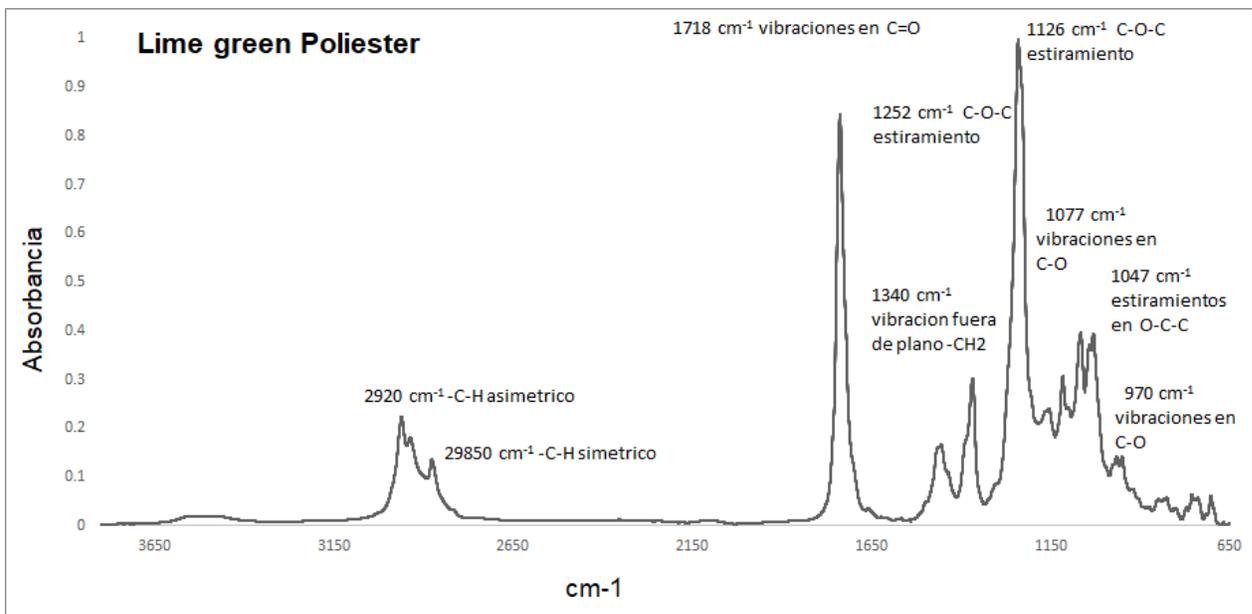


Figura 19. Espectroscopia del color poliéster *lime green*

En la figura 19, se muestra la espectroscopía generadas por el color *Lime green* de poliéster. Los dos picos más intensos, que son en la región de 1718 cm⁻¹ y 1126 cm⁻¹ corresponden a la interacción de las moléculas presentes en el éster, mostrado en la figura 2. Se puede observar que se da la vibración del carbonilo y la vibración del oxígeno del éster respectivamente. Los estiramientos en los enlaces C-O , en la región de 1077 cm⁻¹ y 970 cm⁻¹ confirmar la presencia de este enlace en la molécula del estero, el carbono alfa, está presente en la región 1047 cm⁻¹.

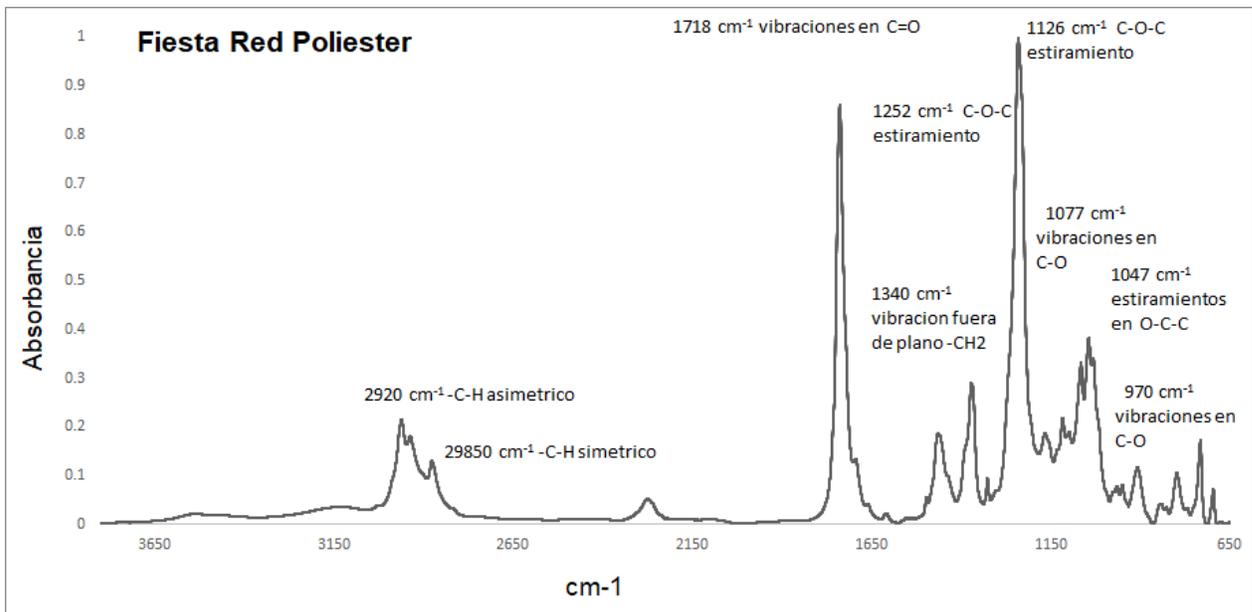


Figura 20. Espectroscopia del color poliéster *fiesta red*.

Las figuras 20 y 21, muestran los espectros medidos de los colores *fiesta red* y *snowwhite* a base de poliéster, como se se puede observar ambos presentan los picos importantes del éster mencionados anteriormente. Utilizando esta plantilla generada, se puede identificar otros recubrimientos y poder clasificarnos en poliuretanos o poliesters. Con eso se podrá realizar la compatibilidad de las diferentes capas del recubrimiento y lograr una buena adherencia.

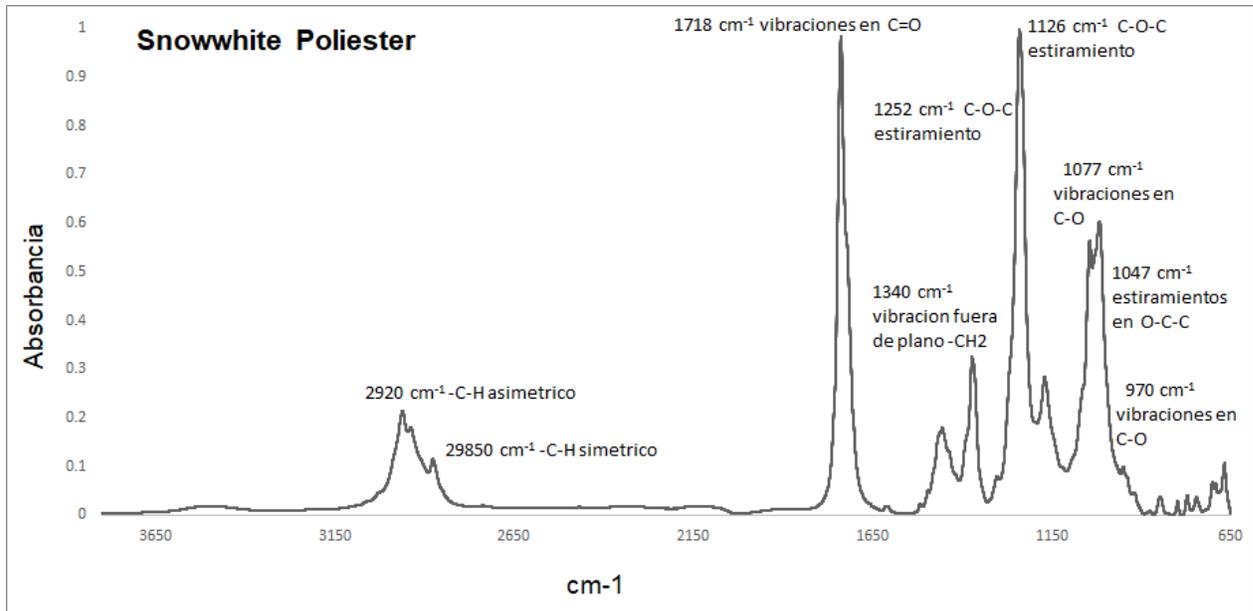


Figura 21. Espectroscopia del color poliéster *snowwhite*

4.2 Pruebas *Cross-cut* y *Pull-off* .

Se obtuvo la relación que existe entre el Método Cross-Cut y Pull-off y se evaluó todos los niveles de adherencia para correlacionar con la cantidad de fuerza necesaria para retirar el dolly de la prueba de pull-off. Se utilizó el programa Minitab generar un estudio de correlación y verificar la variación del modelo. En la figura 22, se muestra el estudio de la correlación, el cual arroja una variación de 92.8%.

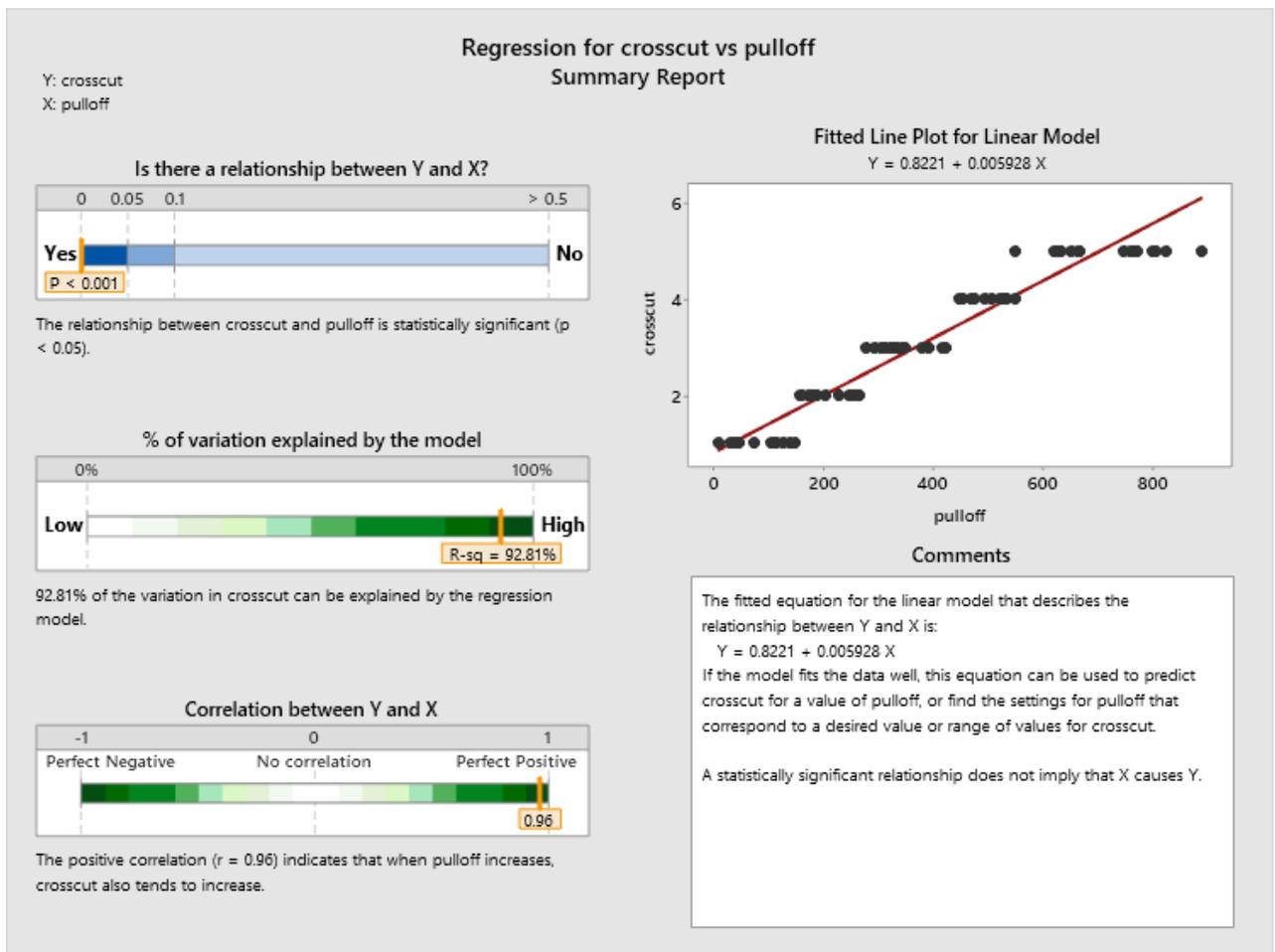


Figura 22. Resultados obtenidos de la correlación entre la prueba de cross-cut y pull-off.

En este estudio, se relacionaron los valores cualitativos generados por la prueba de *cross-cut*, que van del nivel mínimo de adherencia 1, a la adherencia máxima 5. En la tabla 1, se muestra la correlación que existe

Relación Cross-cut Pull-off	
Cross-cut (nivel)	Pull off- (psi)
5	550-900
4	549-445
3	444-266
2	265-151
1	150-0

tabla 1. Resultado de la correlación de cross-cut vs Pull-off.

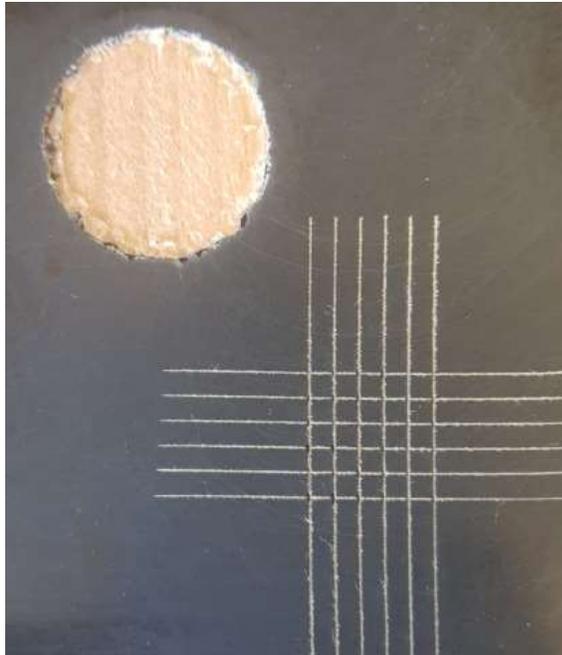


Figura 23. Prueba pull-off arriba y cross-cut abajo

Combinación			Adherencia	
Material	Color	TOPCOAT	Pull-off	Cross-cut
Poliuretano	Limegreen	Poliuretano	894	5
Poliuretano	Limegreen	Poliéster	533	5
Poliuretano	Fiesta red	Poliuretano	861	5
Poliuretano	Fiesta red	Poliéster	450	4
Poliuretano	Snow white	Poliuretano	900	5
Poliuretano	Snow white	Poliéster	590	5
Poliéster	Limegreen	Poliuretano	702	5
Poliéster	Limegreen	Poliéster	850	5
Poliéster	Fiesta red	Poliuretano	657	5
Poliéster	Fiesta red	Poliéster	852	5
Poliéster	Snow white	Poliuretano	686	5
Poliéster	Snow white	Poliéster	849	5

Tabla 2. Resultados Pruebas de adherencia en *dummies*

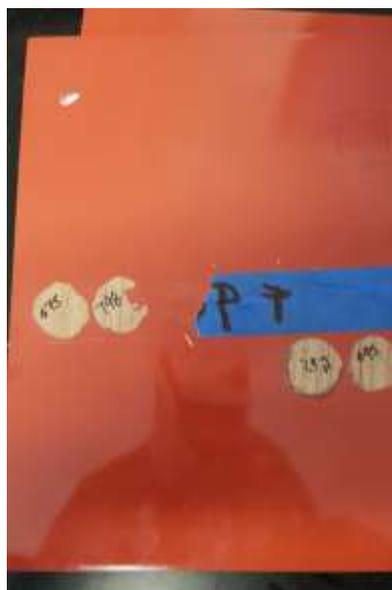


Figura 24. Dummies de madera utilizados para realizar pruebas de pinturas, tonalidad y adherencia.

4.2 Resultados TMA

Se encontraron los coeficientes de expansión de los poliésteres y los poliuretanos para verificar que no exista una diferencia que cree un estrés residual y elimine el recubrimiento.

Tipo de material	Nombre	coeficientes de expansión ($\times 10^{-6} \text{ k}^{-1}$)	Después de ciclos de temperatura (-20 °Ca 80 °C)
poliuretano	Limegreen	57.6	57.9
poliuretano	Snow white	64.5	64.8
poliuretano	Fiesta Red	68.20	68.8
poliuretano	Topcoat	73.3	73.4
Poliéster	Limegreen	112.5	114.4
Poliéster	Snow white	115.3	118.6
Poliéster	Fiesta Red	108.7	109.4
Poliéster	Topcoat	118.2	119.9
Poliéster	Undercoat	102.3	103.4

Tabla 3. Resultados del análisis termomecánico.

4.5 Comparación del método actual con el propuesto.

Antes de realizar esta investigación, no se contaba con un protocolo registrado para la validación de colores, existían pruebas que se realizaban a la pintura, que constaba principalmente de crear dummies para la verificación de la adherencia, se realizaban pruebas de frío y calor y se liberaron. En el anexo, se encuentra el protocolo de validación que se generó a partir de esta investigación. En el punto 7, se encuentran los pasos a seguir para este nuevo método.

Método anterior	Método propuesto
<p>El departamento de <i>Advanced Manufacture</i>, realiza pruebas de rendimiento que consisten en los siguientes pasos.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Medir la dureza y el grosor para cada dummy registrando estas mediciones. -Enviar las muestras para ingresar al ciclo de temperatura en donde se colocan a un horno a 85 °C durante una hora, después se deja un hora fuera del horno a temperatura ambiente, finalmente ingresa un congelador a -20 °C otra hora. -Se realizar este procedimiento en ciclos durante 20 horas -Finalmente se realiza una prueba de cross-cut y se mide la adherencia cualitativamente, si pasa la prueba, se libera el color 	<p>El método nuevo, sigue el procedimientos realizados en esta investigación para identificar las características de los materiales antes de que entren a producción.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Se realizan las mediciones en FTIR para identificar el tipo de resina que se usa en la pintura. -Una vez identificada el tipo de pintura, se selecciona el tipo de top coat que es compatible con la pintura. -Se realizan los dummies con los materiales propuesto y se introducen los materiales al TMA donde se analizan su coeficiente de expansión. -Se realiza una prueba de adherencia utilizando el método pull-off. -Si el material pasa las pruebas se libera el color.

Tabla 5. Relación del método propuesto contra el actual para observar las ventajas.

A partir de estas mejoras, se logró disminuir el tiempo de validación de los recubrimientos a 4 días, contra los 8 días. Esto se logró modificando el protocolo anterior y realizando

tareas al mismo tiempo. Puesto que es posible realizar estas pruebas de manera más controlada con métodos más confiables y rápidos

Conclusiones

Durante la realización de este trabajo se encontraron las herramientas para poder validar un recubrimiento adecuadamente y poder ser utilizado en la producción de guitarras y bajos en la empresa de Fender. Se demostró que al agregar estas nuevas herramientas al protocolo de validación podemos procesar un color en menos tiempo y con un mejor resultado. los principales hallazgos fueron, que el método anterior no era posible obtener un resultado cuantitativo de adherencia, esto generaba problemas por qué no se podía comparar la adherencia entre lotes. La disminución del tiempo y ciclo de prueba fue una gran ventaja puesto que ahora es posible liberar más colores en menor tiempo. El método actual garantiza la calidad de la pintura porque se reconocen mejor las características de los recubrimientos, creando sistemas de recubrimientos mas confiables, con mejor adherencia entre ellos, ofreciendo un mejor producto final a los clientes.

Referencias

- Amador-Hernández, J., Velázquez-Manzanares, M., Colunga-Urbina, E. M., de la Garza-Rodríguez, I. M., & Sánchez-Hernández, D. C. (2019). Análisis cromático y espectral de lacas acrílicas para retoque de pintura automotriz blanca mediante Reconocimiento de Pautas no Supervisado. *Uniciencia*, Vol. 33, p. 61. <https://doi.org/10.15359/ru.33-1.5>
- Angel, D. A. (2019). Los tiempo modernos de la productividad. *Revista Derecho Económico Internacional*. Retrieved from https://www.academia.edu/36021041/Los_Tiempos_Modernos_de_la_Productividad
- Anghelone, M., Stoytschew, V., Jembrih-Simbürger, D., & Schreiner, M. (2018). Spectroscopic methods for the identification and photostability study of red synthetic organic pigments in alkyd and acrylic paints. *Microchemical Journal*, Vol. 139, pp. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.02.029>
- Brock, T., Groteklaes, M., & Mischke, P. (2000). *European Coatings Handbook*. Vincentz Network GmbH & Co KG.
- Bruce C, M. K. (2003). Coefficient of Thermal Expansion Measurement using the TMA 4000. Retrieved from Perkin Elmer website: http://www.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/011175_01%20APP.pdf
- Brunatti, C., & Martín, A. (2015). *Introducción a la Espectroscopía de Absorción Molecular Ultravioleta, Visible e Infrarrojo Cercano*. Editorial limusa.
- Cobo, R. A. G. (n.d.). *Diccionario de instrumentos musicales* (Península, Ed.). Península.
- Crompton, T. R. (2009). *Characterization of Polymers*. Smithers Rapra Technology.
- Crompton, T. R. (2013). *Thermal Methods of Polymer Analysis*. Smithers Rapra.3
- Gardner, .A (2012) *Paint and Coating Testing Manual: 15th. Edition of the Gardner-Sward Handbook*. (2012). <https://doi.org/10.1520/mnl17-2nd-eb>

- Griffini, G., Passoni, V., Suriano, R., Levi, M., & Turri, S. (2015). Polyurethane Coatings Based on Chemically Unmodified Fractionated Lignin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(6), 1145–1154. doi:10.1021/acssuschemeng.5b00073
- La Nasa, J., Modugno, F., Aloisi, M., Lluveras-Tenorio, A., & Bonaduce, I. (2018). Development of a GC/MS method for the qualitative and quantitative analysis of mixtures of free fatty acids and metal soaps in paint samples. *Analytica Chimica Acta*, 1001, 51–58.
- Lindon, J. C., Tranter, G. E., & Holmes, J. L. (2000). *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry: I-N*.
- Laboratory, Forest Products, and Forest Products Laboratory. 1999. "Wood Handbook : Wood as an Engineering Material." <https://doi.org/10.2737/fpl-gtr-113>.
- Łukowski, Michał. 2012. "Painted Wood. What Makes the Paint Crack?" *Journal of Cultural Heritage*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.01.007>.
- Malik, A. (2005). FTIR studies on 2K polyurethane paint. ScholarBank National University of Singapore. US Repository.
- Merlatti, C., Perrin, F. X., Aragon, E., & Margailan, A. (2008). Natural and artificial weathering characteristics of stabilized acrylic–urethane paints. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 93, pp. 896–903. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.02.008>
- Peng, Xiao-Rui, and Zhan-Kuan Zhang. 2019. "Improvement of Paint Adhesion of Environmentally Friendly Paint Film on Wood Surface by Plasma Treatment." *Progress in Organic Coatings*. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.024>.
- Skoog, D. A., & Leary, J. J. (1992). *Principles of instrumental analysis*. Saunders College Publishing.
- Smith CA 2014 *Insight into the organocatalyzed synthesis of Urethanes in supercritical Carbon Dioxide*, wiley
- Stauffer, J. L. (1993). *Finishing Systems Design and Implementation: A Guide for Product*

- Parameters, Coatings, Process, and Equipment. Society of Manufacturing Engineers.
- Streitberger, H.-J., & Goldschmidt, A. (2007). BASF Handbook Basics of Coating Technology. <https://doi.org/10.1515/9783748600251>
- Rangel-Vazquez, Norma-Aurea, Sánchez-López, Carlos, & Felix, Francisco Rodríguez. (2014). Spectroscopy analyses of polyurethane/polyaniline IPN using computational simulation (Amber, MM+ and PM3 method). *Polímeros*, 24(4), 453-463. <https://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1496>
- Waring, D., Raymond, D., & Randall, T. (2001). *Make Your Own Electric Guitar and Bass*. Sterling Publishing Company, Inc.
- Warson, H. (1998). Book Review: Resins for coatings: chemistry, properties and applications. Edited by D. Stoye and W. Freitag. Hanser Publishers, Munich, 1996. pp. xvii 458, price DM248.00. ISBN 3-446-18489-9. *Polymer International*, Vol. 45, [https://doi.org/3.0.co;2-r">10.1002/\(sici\)1097-0126\(199802\)45:2<240::aid-pi926>3.0](https://doi.org/3.0.co;2-r)
- Weldon, D. G. (2009). *Failure Analysis of Paints and Coatings, Revised Edition*. <https://doi.org/10.1002/9780470744673>
- Zhan Y. (2017) Renewable High-Performance Polyurethane Bioplastics Derived from Lignin–Poly(ϵ -caprolactone) *ACS Sustainable Chem.*
- Zięba-Palus J (2017) The usefulness of infrared spectroscopy in examinations of adhesive tapes for forensic purposes. *Forensic Sci Criminol*

COLORS VALIDATION ADVANCED MANUFACTURING

1. Request of colors validation form format

The Advanced Manufacturing area is responsible of sending this format when a new validation is required.

The requesters will fill this document. Is important that this document has all request information for Advanced Manufacturing area, because all validations will be based on this document.

2. Request painting to provider

The Advanced Manufacturing area talks with the necessary provider for request the correct color and technology, this information Will be in "Color Validation Form Format", all this is by photos or samples, Wood or paint part number, this process generally is asked for by email, or sometimes the provider visits the plant.

3. Paint sample

The Advanced Manufacturing area is responsible of create this sample, asking for support for dummies cut in Mills area.

The Advanced Manufacturing technique will be the responsible of Undercoat application request in "Color Validation Form Format", then the technic will sand the dummies and also to apply color and top coat correct as dummies, neck or body, with the material correct in Color Validation Form Format.

4. Send sample

When we have the sample with the correct color is necessary to make the shipment for Product Develop Manager. The Advanced Manufacturing area must fill in a format "MEMO", this for follow the shipment, also this area is responsible of send the Tracking to Product Develop Manager.

5. Sample reception for tone approval

Product Develop Manager is the person who will receive this sample, has the responsibility to review the sample (tonality) and conclude the Adv Man dept. whether approving or not. This procedure is usually done through an email, or called Product Develop Manager.

6. Schedule regression and lab test

The department of Adv. Man. It is responsible for preparing the dummies, and verify that there are dummies with Undercoat poliester ready to be sanded and apply color. This procedure is done by means of a Gantt of activities.

7. Apply regression of dummies and performance tests.

A regression of colored hands will be made specifically for Urethanes and Poliester technologies colors. Apply 2 to 8 hands of color in increments of 2. This is done to achieve the tone approved by Product Development.

The top coat application should correspond to the specification of "Color Validation Form Format", and wait for the drying time, according to each top.

After the dummies are done, they will be sent to the paint lab to be tested.

First and IR espectro will be taken of each material present in the coating, after validating that they are compatible using the template created, adhesion test will be performed using the Pull-off test, if the force of test is greater than 550 PSI then the adherence is approved. Finally using the TMA, the Coefficient of thermal Expansi3n will be measured to ensure that there is not a significant diferente and residual stress will not occur with temperature changes.

8. Evaluate and document regression results

The department of Adv. Man is responsible for evaluating the performance tests, Fifo of the application, photos of the tests and results.

This procedure is done through the link (Advance Manufacturing (\\fmicefs)).

9. Creation of pre-elimination recipe and delivery to engineering:

After having the results of the dummies, a recipe will be created based on the results of the dummies, this recipe created by the advanced manufacturing department will be sent to the engineering department so that it can make the necessary modifications so that this recipe arrives to production.

10. Coordination of 30 bodies run:

The procedure in this stage begins with asking the planning department for help in order to cut 30 bodies of the model required for the color to be validated, this request is done by an email with a copy to the other departments involved, then the department of mills is the responsible for applying UV Filler and sanding them once the bodies have been cut, the next step is to transport these bodies to the intermediate sanding area, with the person in charge, after they have been sanded the 30 bodies pass to the paint area to be applied.

11. Realization of the application of 30 bodies:

the department of advanced manufacturing agrees with the painting facilitators to see the exact schedule in which these bodies will be applied, once we have the schedule, a responsible department will approach the painter to supervise that the painter follows correctly the recipe depending on the technology.

The performance tests are then carried out and sent to polishing.

12. Evaluation and documentation of run results of 30 bodies;

This procedure begins at the moment in which a body of the already polished 30 is taken and performance tests are carried out, all this in parallel takes pictures and is documented in an excel in the shared folder of the department of advanced manufacturing.

13. Generation of recipe for production;

After analyzing the results and being positive these, the department of the engineering area is notified that the recipe will pre-eliminate if it worked, then the engineering department is responsible for transmitting this recipe to production for future applications.

14. Board for color release;

After having the positive results of the run of 30 bodies, the department of advanced manufacturing is responsible for convening a meeting by means of a minute so that all the departments involved in the production line know and understand which the color is to be released and all the process that this requires.