



Institución Universitaria

Descripción de la deformación de películas plásticas multicapa utilizando análisis espectral.

Ángel Gabriel Díaz Maza

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ingeniería
Medellín, Colombia
2016

Descripción de la deformación de películas plásticas multicapa utilizando análisis espectral.

Ángel Gabriel Díaz Maza

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Automatización y Control Industrial.

Director (a):

PhD. Francisco E. López

Codirector (a):

PhD. Alejandro Restrepo

Línea de Investigación:
Visión Artificial y Fotónica

Grupo de Investigación:
Automática, Electrónica y ciencias de la computación

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ingeniería.
Medellín, Colombia
2016

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mi familia, en especial a mi esposa quien me acompaña en todos mis procesos incondicionalmente y quien nunca deja de creer en mí, también se lo dedico a mí hijo el cual no me permite desfallecer ya que soy su ejemplo, esperando ser para él el modelo a seguir. También se lo dedico a mis padres los cuales siempre me apoyan y quienes sacrificaron la compañía de un hijo por permitirle cumplir sus anhelos y como olvidar a mis hermanas las cuales siempre me han hecho sentir el hombre más especial del mundo y por las cuales guardo un gran cariño inigualable. De forma muy especial les dedico este trabajo a mis grandes amigos: Juan y Javier por suplir en diferentes instantes de mi vida la experiencia de tener un hermano.

Para el final escribo el agradecimiento a quien nunca podrá leerlo pero a quien espero haber hecho sentir orgulloso, a esa persona de la cual siempre recibí un consejo y por quien posiblemente emprendí el camino de ser electrónico, mi abuelo Federico Antonio Maza Arce que Dios te tenga en su gloria y que la sonrisa esa que siempre me brindaste, perdure eternamente en tu rostro, sé que existen miles de personas que han permitido forjarme y estoy seguro que nunca alcanzaría a darles las gracias a todos mencionándolos uno a uno, sin embargo Muchísimas Gracias a todos por lo importante que han sido en mi vida, Gracias le doy a Dios por guiar mi camino.

Agradecimientos

Primera mente agradezco a Dios por darme la oportunidad de crecer intelectualmente y respaldarme en todas las decisiones que tomo. También agradezco a mi director de tesis, el PhD. Francisco Eugenio López y a mi codirector el PhD. Alejandro Restrepo quienes en todo momento me motivaron y acompañaron en el desarrollo de mi investigación, sin ellos no habría sido posible el desarrollo de este trabajo. También le agradezco al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) por el esfuerzo que realiza por formar personas con capacidades investigativas, las cuales le aportan grandemente al país y nos acerca a ser más competitivos a nivel mundial. Gracias a todos los compañeros de la maestría gracias por su apoyo, solidaridad y gran sentido de compañerismo, personas como Juan, Amalia, Martha, León y todos esos compañeros con los cuales se compartió momentos de esfuerzo y dificultad para poder adquirir destrezas en el campo investigativo, en verdad muchas gracias, todos siempre me animaron y alentaron a no desfallecer frente a las dificultades.

Resumen

En la actualidad la utilización de los materiales plástico es muy amplia, estas van desde botellas, recipientes de uso doméstico, procesos industriales para empaques que contienen el producto final a comercializar, recubrimientos de paneles solares, carcasa de equipos electrónicos entre otras múltiples aplicaciones que se le da al plástico. La utilización de este tipo de materiales se debe a sus características físicas y mecánicas ya que los plásticos en general, son fáciles de moldear, conservan la calidad del producto y además algunos son parcialmente transparentes lo que permite que el usuario aprecie el producto en el caso de su utilidad como empaque.

La utilización como empaques del plástico se hace por medio de películas delgadas coextruidas con diferentes tipos de polímeros, en el caso particular de la industria de alimento las películas plásticas poseen características físico-mecánicas que garantizan la calidad del producto contenido. Es necesario monitorear los cambios físicos de la película plástica a la hora de moldearla durante la generación de los empaques para que estos puedan cumplir la función de conservar las propiedades organolépticas del producto contenido.

En la actualidad existen técnicas mecánicas para establecer características en las películas plásticas, entre ellas podemos destacar las pruebas de tensión, mediciones directas de grosor con tornillos micrométricos y los medidores electromagnéticos. En general las pruebas de tensión son mediciones globales del material y al ser heterogénea la deformación de la película plástica esta no aporta mucho al control de calidad del empaque, las otras son técnicas de contacto las cuales serían altamente repetitivas y engorrosas para poder controlar la deformación de la película plástica.

En este trabajo se propuso analizar el comportamiento del material plástico a los espectros de luz durante el proceso de deformación mecánica utilizando una máquina de tracción, se algunas analizaron fuentes de iluminación con longitudes de onda en el espectro visible e infrarrojo cercano enfatizando en el fenómeno de la transmitancia.

Se pudieron observar variaciones en el espectro de luz transmitido durante el proceso de deformación que permitan establecer relaciones entre el espectro de luz y el espesor de la película plástica. También se identificó el efecto que generan las líneas de extrusión de las películas plásticas sobre el espectro de luz transmitido y los cambios estructurales que se generan sobre el material plástico a medida que es deformado hasta el punto de volverse opaco generando cambios considerables en la transmitancia de la luz.

En general se llegó a una propuesta metodológica que permite dar respuestas puntuales a las variaciones de espesor de las películas plásticas multicapa coextruidas mediante el análisis espectral de la luz transmitida a través de las películas plásticas multicapa, identificando los efectos de las líneas de extrusión y limitando la longitud de la deformación por la reestructuración molecular del material.

Palabras clave: Transmitancia, Coextrusión, Multicapa, Polímeros.

Abstract

Nowadays, using plastic materials into the industrial process is more common than the past time. Some of applications of plastic are bottles, domestic containers, packages for industrial processes, solar panel coatings, mechanical tools, and so on. Advantages for using this kind of materials are attributed to their physical and mechanic properties, such as: capability to take specific shapes, immunity to the gasses transition, and the transparency, which allow users to appreciate the packaged product.

Although every industrial application performed with plastic materials is important, coextruded plastic films represent one of the most used into the industrial field for food packaging. They are used as raw material to produce packages with specific mechanical resistance, and strain modulus. Notwithstanding, these properties have to be evaluated into the process to warrant the package quality.

There exist several techniques that have been developed to evaluate mechanical properties in plastic films. There, tensile tests can be highlighted. Another important technique often used lies in the thickness evaluation, which are frequently developed through the direct thickness measurements, which are conventionally carried out by using contact and invasive tools. However, these measures are complex in situations where the interest region experiences irregular texture, and situations where the specimen contact is not allowed into the process.

This work has been based on the hypothetical idea that coextruded plastic films change optically when they are subjected to deformation processes. Thus, the behaviors for light transition processes are analyzed into the visible range in order to perform the evaluation using easy technologies. In addition, plastic films were analyzed, for some cases, of the transmittance evaluation.

Results show that plastic films under deformations introduce variations in the transmitted light spectrum, which allows to establish relations between the transmitted light spectrum and the plastic film thickness. We have identified the effect that extrusion lines of plastic film produce in the spectrum of transmitted light. There, the transmittance measure experiment some variations that introduce errors in the evaluation process.

As a conclusion we can say that an approach for analyzing behaviors in in plastic films subjected to deformation was developed. This proposal allows to relate the thickness variation that a coextruded plastic film experience under deformation, with the transmitted light across of it. Also, the effect produced by extrusion lines is described, introducing the strategies for performing thickness evaluation in local points.

Contenido

| | Pág. |
|---|-----------|
| Lista de figuras..... | 1 |
| Lista de tablas | 5 |
| Introducción | 6 |
| OBJETIVOS..... | 7 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 7 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 8 |
| 1. Marco Teórico y Estado Del Arte..... | 9 |
| 1.1 Marco Teórico..... | 9 |
| 1.1.1 Películas plásticas multicapa..... | 10 |
| 1.1.2 Evaluación de propiedades mecánicas en películas plásticas..... | 11 |
| 1.1.3 Análisis Espectral en películas plásticas..... | 18 |
| 1.2 Estado Del Arte..... | 25 |
| 2 Metodología Propuesta..... | 36 |
| 2.1 Acondicionamiento de la muestra..... | 38 |
| 2.1.1 Deformación mecánica..... | 40 |
| 2.1.2 Medición del espesor | 42 |
| 2.2 Adquisición de los espectros..... | 44 |
| 2.3 Medición de los espectros de luz durante la deformación de la película plástica multicapa..... | 47 |
| 2.4 Análisis de la relación entre las variaciones de espesor y el comportamiento de los espectros. | 52 |
| 3 Resultados y Análisis | 55 |
| 3.1 Deformación de la película plástica..... | 55 |
| 3.2 Comportamiento Espectral..... | 62 |
| 3.3 Resultados de Medición espectral durante la deformación de la película plástica multicapa..... | 72 |
| 3.4 Correlación de Espesor con transmitancia de luz..... | 80 |
| 4. Conclusiones y recomendaciones..... | 88 |
| Conclusiones..... | 88 |
| 5. Bibliografía | 90 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Esquema básico de una película plástica multicapa. | 10 |
| Figura 2. Prueba de rasgado aplicando esfuerzo sobre los extremos de la división de la probeta. | 12 |
| Figura 3. Evaluación de sellado en empaques de películas plásticas. | 12 |
| Figura 4. Indentación en película plástica para evaluar resistencia del material. | 13 |
| Figura 5. Test de tracción en película plástica, tomado de (Mackeen, 2012). | 13 |
| Figura 6. a) Espécimen cortado en dirección a las líneas de extrusión. b) Espécimen cortado en dirección transversal a las líneas de extrusión. | 15 |
| Figura 7. Comportamiento de la fuerza durante la deformación de una película plástica de 130 micras de espesor. | 16 |
| Figura 8. Medición de espesor en película plástica utilizando instrumentos de contacto. | 17 |
| Figura 9. Tornillo Micrométrico utilizado para medición de espesor. | 17 |
| Figura 10. Propagación del campo eléctrico de la luz. | 18 |
| Figura 11. Esquema, clasificación de la luz en función de la longitud de onda. | 19 |
| Figura 12. Reflexión y transmisión de un haz incidente. | 20 |
| Figura 13. Esquema de transmisión y reflexión de la luz cuando el haz incidente es perpendicular al medio de incidencia. | 22 |
| Figura 14. Adquisición de imagen digital, Tomado de (Moya, 2012)). | 23 |
| Figura 15. Imagen de espectro de luz obtenido desde un espectrómetro aseq. | 24 |
| Figura 16. Grafico que muestra el número de documentos publicados sobre películas plásticas multicapa 'SCOPUS'. | 25 |
| Figura 17. Líneas de estudio sobre propiedades ópticas de películas plásticas. | 27 |
| Figura 18. Configuración del instrumento para una TIR Raman. La línea punteada ilustra la trayectoria del láser de excitación. (A.O. Kivioja et al, 2012). | 28 |
| Figura 19. Diagrama esquemático del sistema de medición del espesor de película plástica utilizando un haz de hendidura de rayos-X. (Tojo, et al., 2007) | 29 |
| Figura 20. Configuración óptica adaptada a un instrumento FTIR convencional para la medición de la transmisión polarizada en diferentes ángulos de incidencia (Martinez Antón, 2002). | 30 |
| Figura 21. Arreglo óptico de la configuración experimental para variaciones graduales del Angulo de incidencia. (Ishikawa, Yamano, Asada, Iwata, & Ueda, 2004) | 31 |
| Figura 22. Procedimiento de la recuperación de fase por transformada wavelet. | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 23. Esquema de la reflexión, dispersión y efecto de la transmisión de la luz UV-Vis a través de una película de polímero multicapa con superficie rugosa debido a gránulos (Larenaa, Millán, Pérez, & Pinto , 2002)..... | 33 |
| Figura 24. (a) Cálculo de transmitancia para 3 ángulos de incidencia, (b) transmisión óptica de películas de GaN con ángulo de incidencia de 0°, obtención de puntos críticos.(Šantić, 2010)..... | 35 |
| Figura 25. Esquema de la metodología propuesta | 37 |
| Figura 26. Imagen de probeta de material plástico mostrando las líneas de extrusión del material. | 38 |
| Figura 27. Longitudes de la muestra basados en norma ASTM 882-12 | 39 |
| Figura 28. Máquina de deformación con película plástica para tensile test..... | 40 |
| Figura 29. Relación entre esfuerzo y deformación de las películas plásticas..... | 41 |
| Figura 30. Regiones para medición de espesor en deformación de películas plásticas.42 | |
| Figura 31. Espectro de intensidad lumínica de LED infrarrojo medido con Aseq. | 46 |
| Figura 32. Montaje opto-mecánico para la adquisición de espectros durante la deformación. | 47 |
| Figura 33. Máquina para prueba de tracción, imagen tomada de http://en.labthink.com/en-us/product/xlw-pc-auto-tensile-tester.html | 49 |
| Figura 34. Tornillo micrométrico utilizado para la medición de espesor en películas plásticas. | 49 |
| Figura 35. Espectrómetro Aseq instruments LR1. | 50 |
| Figura 36. Espectrómetro Yokogawa AQ6370B. | 51 |
| Figura 37. Montaje óptico para acoplamiento y direccionamiento de la luz..... | 52 |
| Figura 38. Interfaz gráfica de la tool box de matlab curve fitting | 54 |
| Figura 39. Gráfica de esfuerzo contra deformación de muestra en MD (longitudinal). ... | 55 |
| Figura 40. Gráfica de esfuerzo contra deformación de muestra en TD (transversal). | 56 |
| Figura 41. Gráficas de esfuerzo en dependencia de la dirección de corte de la muestra. | 57 |
| Figura 42. Esquema de las variaciones de espesor en diferentes puntos de medición sobre la película plástica. | 57 |
| Figura 43. Representación de la superficie de las variaciones de espesor en diferentes puntos de la muestra. | 58 |
| Figura 44. Comportamiento del espesor al deformar la película plástica en diferentes puntos del material | 59 |
| Figura 45. Medición de espesor en las regiones de interés durante la deformación en MD. | 61 |
| Figura 46. Medición de espesor en las regiones de interés durante la deformación en TD. | 61 |
| Figura 47. Resultado de las mediciones de espesor en MD y TD..... | 62 |
| Figura 48. Gráfica de medición de intensidad de luz transmitida por LED infrarrojo a través del material plástico. | 63 |
| Figura 49. Respuesta espectral de LED infrarrojo, regulado y a través de la película plástica. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 50. Resultados de la transmisión de luz del LED infrarrojo acondicionando el voltaje de alimentación de la fuente..... | 64 |
| Figura 51. Emulación del Incremento de espesor superponiendo películas plásticas. | 65 |
| Figura 52. Resultados de la prueba con múltiples capas del material plástico utilizando infrarrojo..... | 66 |
| Figura 53. Respuesta al aumento de capas de fuente de luz LED infrarrojo con longitud de onda 950nm. | 66 |
| Figura 54. Respuesta al aumento de capas de fuente de luz LED verde con longitud de onda 540nm. | 67 |
| Figura 55. Respuesta al aumento de capas de fuente de laser rojo con longitud de onda 645nm. | 68 |
| Figura 56. Variaciones de la intensidad de luz en fuente laser con longitud de onda 1500nm directamente con espectrómetro..... | 69 |
| Figura 57. Respuesta al aumento de capas de fuente de laser infrarrojo con longitud de onda 1311nm. | 69 |
| Figura 58. Respuesta de la intensidad de fuente halógena debido al incremento de las capas por la que se transmite la luz. | 70 |
| Figura 59. Espectro de fuente de luz seleccionada en el rango de 600 a 1000nm utilizando el montaje de deformación | 71 |
| Figura 60. Resultados de la máxima intensidad transmitida durante la deformación de una muestra (DM) de película plástica. | 73 |
| Figura 61. Gráfica del comportamiento de la transmitancia en relación a la deformación del material (DM)..... | 73 |
| Figura 62. Resultados de la máxima intensidad transmitida durante la deformación de una muestra (TM) de película plástica..... | 74 |
| Figura 63. Gráfica del comportamiento de la transmitancia en relación a la deformación del material (TM) | 74 |
| Figura 64. Gráfica de los incremento en la transmitancia de la luz durante la prueba.... | 75 |
| Figura 65. Efectos de las líneas de extrusión en la intensidad de la luz transmitida. | 77 |
| Figura 66. Representación del decremento del espectro que generan las líneas de extrusión..... | 77 |
| Figura 67. Gráfico de intensidad de la luz del material deformado vs no deformado | 79 |
| Figura 68. Imagen que muestra las Líneas de extrusión de la película plástica en muestras cortadas en DM y TM..... | 79 |
| Figura 69. Comportamiento de las líneas de extrusión durante la deformación de la muestra en (DM). | 80 |
| Figura 70. Comportamiento de las líneas de extrusión durante la deformación de la muestra en (TM)..... | 81 |
| Figura 71. Disminución del espesor durante la deformación de la película plástica. | 82 |
| Figura 72. Área bajo la curva de los espectros tomados durante la deformación de la película plástica en el punto donde se adquirieron los espesores. | 83 |
| Figura 73. Resultados de la relación existente entre el espesor de la película plástica y el área de la intensidad espectral durante la deformación..... | 83 |

| | |
|---|----|
| Figura 74. Relación entre espesor e intensidad transmitida cuando el espesor a disminuido aproximadamente un 40% de su espesor original. | 85 |
| Figura 75. Representación gráfica del modelo generado por la toolbox cftool a partir del espesor y espectros obtenidos durante la deformación. | 86 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Dimensiones de las muestras de películas plásticas y velocidad de deformación (ASTM 882-12)..... | 38 |
| Tabla 2. Discriminación de los vectores de datos que describen las medidas de espesor para dos tipos de muestras plásticas..... | 44 |
| Tabla 3. Fuentes de iluminación utilizadas y su longitud de onda..... | 45 |
| Tabla 4. Medidas del espesor en 10 puntos de la probeta plástica en MD y TD..... | 58 |
| Tabla 5. Fuentes analizadas para selección de la más adecuada para el experimento propuesto | 62 |
| Tabla 6. Datos de numero de medición y valor del área bajo la curva de los espectros crecientes..... | 76 |
| Tabla 7. Tabla comparativa entre el modelo de tercer orden y los resultados experimentales..... | 87 |

Introducción

En la industria, el uso de películas plásticas multicapa ha incrementado notablemente en los últimos años. Ello se debe entre otras cosas a que este tipo de materiales es traslucido, una de las características que los hace atractivo en términos de la visualización de su contenido. Por otro lado, los desarrollos que se han hecho para el mejoramiento del desempeño de estos materiales han mostrado un fuerte componente en la protección del producto frente a condiciones medioambientales. Además, sus propiedades mecánicas presentan facilidad de manejo en términos de la adaptación a tamaños, formas y texturas.

Dentro de las aplicaciones comúnmente relacionadas con películas plásticas multicapas, (Tojo, et al., 2007) las tendencias de trabajo están orientadas hacia recubrimiento de productos, empaqueo de alimentos, fabricación de paneles solares, entre otros; cabe destacar que el empaqueo de productos es una de las principales aplicaciones que en la actualidad se le da a este material. En este caso, el material es deformado para ajustarlo a condiciones de forma y tamaño, introduciendo variaciones de longitud, espesor y estructura; como fue explicado en el trabajo presentado por (Tanabe, Watanabe, Oyama, & Seo, 2010), en donde se describe la relación que existe entre la deformación y la variación estructural del material, siendo el espesor una de las variables más afectadas en el proceso. Por lo tanto es una de las variables de interés y caracterización en términos de evaluar el desempeño del material.

La falta de evaluación de las deformaciones de películas plásticas multicapa dentro de los procesos industriales orientados a la producción de empaques posibilita la generación de productos defectuosos y con ello pérdidas económicas; esto solo considerando la posibilidad de sobre-deformar el material, generando espesores que afectan las propiedades organolépticas del producto contenido y afectando su vida útil. Esto trae como consecuencia la necesidad de explorar técnicas enfocadas al seguimiento de las variaciones mecánicas y geométricas que el material sufre durante el proceso de deformación.

Frente a lo anterior, es de resaltar que trabajos como (El-Zaiat, 2013)(Martinez-Anton, 2002)(Chen, Lin, & Sheu, 1999) se han enfocado en la evaluación de propiedades mecánicas y ópticas en este tipo de materiales, donde la evaluación del espesor sigue siendo un punto de interés en la comunidad científica debido a que los resultados de las técnicas evaluadas varían en dependencia del material en estudio. En estos casos las pruebas espectrales basadas en transmisión y/o reflexión de la luz permiten obtener información de la relación del espesor y las propiedades ópticas del material.

Partiendo del interés industrial de caracterizar la respuesta de las películas plásticas multicapa frente a procesos de deformación y teniendo en cuenta la potencialidad que han presentado las técnicas basadas en transmitancia y reflectancia sobre ese tipo de contextos, en este trabajo se ha propuesto como objetivo principal describir la relación que existe entre la respuesta espectrales y las variaciones mecánicas que sufre una película plástica multicapa cuando es deformado.

La metodología propuesta para llevar a cabo el cumplimiento del objetivo de este trabajo está basada en:

- Estrategia 1. Diseño y montaje de la plataforma de deformación de películas plásticas. En este caso probetas extraídas del material bajo la norma ASTM D882-12 fueron sometidas a deformación utilizando la máquina de tracción PARAM XLW (PC) Auto tensile tester. En la máquina se realizaron 10 pruebas de ensayos de tracción por cada tipo de probeta en las 2 direcciones (DM y TM), realizando una base de datos de respuesta mecánica de deformación del material durante el proceso de deformación.
- Estrategia 2. El segundo punto importante en la metodología es la selección de la fuente de iluminación en términos de evaluar la respuesta de la transmisión en diferentes longitudes de onda que el material presenta cuando es deformado. Para este caso 8 fuentes de iluminación fueron evaluadas encontrando que 5 de ellas no tenían la potencia necesaria para excitar el sensor del espectrómetro utilizado. además durante el proceso de deformación 6 de las ocho fuentes carecían de estabilidad, finalmente la fuente seleccionada fue la Fuente de luz Energetiq Laser Driven Light Source (LDLS), la cual fue estable ya que posee un sistema de control PID y un sistema de refrigeración, también cuenta con un amplio espectro de luz desde el rango visible hasta el infrarrojo cercano lo cual permitía evaluar ampliamente la respuesta espectral del material en términos de cada una de las longitudes de onda que proporciona esta fuente de iluminación.
- Estrategia 3. Adquisición de los espectros de luz producidos por la fuente de iluminación seleccionada en la estrategia 2, para relacionar los datos adquiridos en el montaje mecánico de deformación mencionado en la estrategia 1, con las respuestas espectrales medidas utilizando la fuente de luz seleccionada en la estrategia 2, Después se correlaciona estos 2 resultados, prueba mecánica y óptica para describe los fenómenos y comportamientos del plástico espectralmente en relación al esfuerzo durante la deformación.

Como síntesis se tiene que es posible utilizar fuentes de iluminación en el espectro visible o el infrarrojo cercano que permiten identificar comportamientos espectrales que evidencian comportamientos mecánicos en la deformación de estos tipos de materiales plásticos. También se logró identificar un conjunto de fuentes de iluminación que no aportan lo suficiente en este tipo de procesos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterización de películas plásticas de múltiple capa sometidas a deformación mecánica por tracción, utilizando el análisis espectral de la luz.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterización del montaje óptico para la observación de transmitancia y reflectancia en películas plásticas deformadas y no deformadas.
2. Análisis de la transmitancia y reflectancia de películas plásticas cuando son sometidas a deformación mecánica.
3. Validación de la metodología propuesta, correlacionando los resultados obtenidos en el comportamiento mecánico con los resultados correspondientes al análisis espectral de la transmitancia y reflectancia de la película plástica durante el proceso de deformación por tracción.

1. Marco Teórico y Estado Del Arte

El análisis de la deformación de películas plásticas multicapas es un tema de interés a nivel industrial. Pues, de este proceso dependen muchas de las características en productos recubiertos con este tipo de materiales. En este orden de ideas, y teniendo en cuenta el incremento de trabajos basados en la implementación de técnicas de no contacto (técnicas de soporte óptico) donde más que evaluaciones globales se obtienen medidas de índole local, el eje temático de esta investigación está orientado a la caracterización de la deformación de este tipo de materiales, teniendo como herramienta de soporte el análisis de la respuesta espectral que exhiben las películas plásticas cuando son deformadas.

Partiendo del eje temático presentado previamente, este capítulo está organizado en dos partes. La primera de ellas presenta el conjunto de conceptos y teorías que fundamentan la metodología propuesta. Donde inicialmente se describen las características del material analizado. Luego se hace una introducción sobre las técnicas utilizadas con frecuencia para la evaluación de la respuesta mecánica que las películas plásticas presentan al ser sometidas a deformación. Siguiendo a ello, se describen algunas técnicas espectrales utilizadas usualmente para caracterizar materiales plásticos.

La segunda parte del capítulo presenta una revisión global del estado del arte en la literatura. En esta parte, la búsqueda bibliográfica es orientada a las temáticas que están asociadas a la descripción de la deformación de materiales plásticos mediante el uso de técnicas basadas en el análisis espectral. En este caso se hace una descripción secuencial de los trabajos teniendo en cuenta el tipo de fenómeno óptico utilizado para la descripción del material.

1.1 Marco Teórico

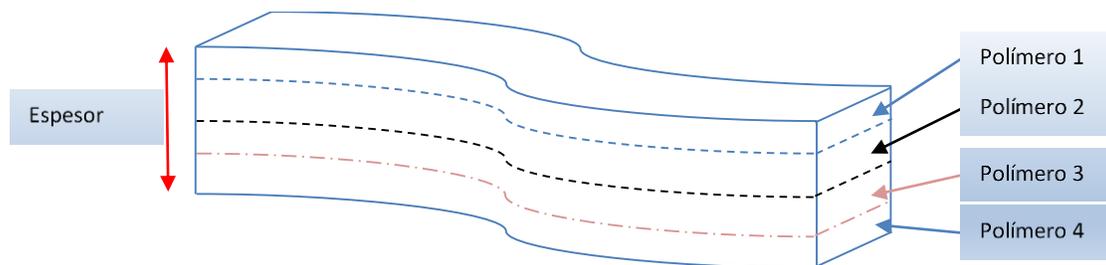
1.1.1 Películas plásticas multicapa

Para efectos industriales, una película plástica multicapa podría entenderse como un material plástico formado por la integración de múltiples capas. Donde cada una de ellas deriva de una composición química diferente, y tienen una funcionalidad diferente dentro del material (Gaston, Dupuy, Marque, Barbaroux, & Dorey, 2016). Por ejemplo: Las capas de la película plástica, que han sido generadas a partir de polímeros con EVOH como componente activo, cumplen la función de barrera en el material, es decir, estas capas

tienen como funcionalidad evitar el paso de gases a través de ellas, como se explica en (McKeen, 2014).

Una de las estructuras que integran una película plástica utilizada en la industria se presenta en la Figura 1. Esta representación data de una película con una composición de 4 capas, las cuales están generadas con diversos tipos de polímeros. En ella se puede observar que el espesor de cada capa no guarda una relación fija con sus vecinas; por lo tanto el espesor total del material no corresponde a un espesor básico multiplicado por el número de capas, sino a la sumatoria de cada uno de los espesores de manera independiente, como se presenta en (1).

Figura 1. Esquema básico de una película plástica multicapa.



$$H = \sum_{i=1}^n h_i \quad (1)$$

Donde 'H' representa el espesor total de la película, y 'h_i' es el espesor de cada una de las 'n' capas que conforman la película. Existen diversas técnicas utilizadas para la producción de las películas plásticas como insumo industrial (Procesos de coextrusión), sin embargo esta temática no será desarrollada puesto que no entra dentro de los objetivos propuestos en este trabajo, ellas son ampliadas con más detalle en (Rodríguez, 2012).

Algunas de las características que hacen de las películas plásticas un material versátil en la industria son: su capacidad de elongación, moldeo, impermeabilidad, resistencia mecánica, resistencia térmica, transparencia entre otras. Sin embargo, el hecho de utilizarlas para recubrir un producto requiere de su deformación; proceso que incluye cambios geométrico y reducciones críticas de espesor, las cuales podrían conllevar a la pérdida de la funcionalidad de alguna de las capas que integran el material (Robertson, 2014). Lo anterior hace que la caracterización de la deformación de este tipo de materiales sea un tema de interés para la comunidad científica (Pham & Lee, 2015); esto no solo es

en términos de la caracterización de los cambios de longitud y esfuerzos mecánico, sino a sus variaciones de espesor.

Dentro de las propiedades mencionadas para las películas plásticas utilizadas en este trabajo, se resalta la importancia de la transparencia; pues, con esta varía en función del proceso de deformación. El hecho que la transparencia del material se vea afectada da indicios que la intensidad de luz que puede ser transmitida a través de ella, también varía. (Mano, Lanceros Mendez, & Costa, 2001)

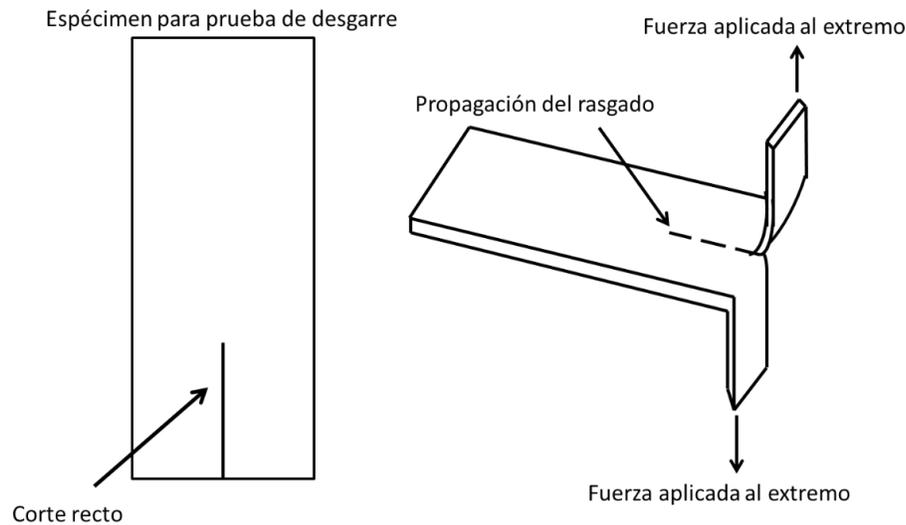
1.1.2 Evaluación de propiedades mecánicas en películas plásticas

Cuando se habla de propiedades mecánicas en películas plásticas, hay que reconocer una gran variedad de medidas que se pueden llevar a cabo en el material, donde cada una de ellas puede ser ampliada dependiendo de la aplicación en estudio. No obstante, queremos enfatizar en este segmento del documento, que las medidas de interés son aquellas relacionadas con la evaluación de la respuesta mecánica que experimentan las películas plásticas cuando están sujetas a deformación

Dentro de un contexto industrial, y haciendo énfasis en la caracterización de la respuesta mecánica a la deformación, algunas de las técnicas con más relevancia en la literatura para la evaluación de películas plásticas son, una gran variedad de pruebas que permiten definir características en una película plástica, Entre las propiedades de mayor importancia para la industria alimenticia se encuentran las propiedades mecánicas, tales como la resistencia al rasgado, resistencia al impacto, indentación, evaluación de sellado, respuesta térmica, ensayos de tracción, entre otras. (J. Quintana, 2007)

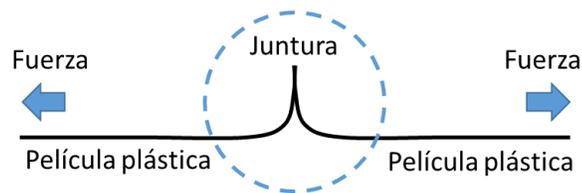
Una prueba para evaluar la respuesta mecánica al rasgado consiste en generar una probeta donde uno de los extremos tiene una ranura que lo divide simétricamente. Luego cada una de las divisiones es tensionada en direcciones opuestas, ello es con el ánimo objetivo de medir la fuerza necesaria para seguir rasgando el material a partir de la ranura inicial, como se observa en la Figura 2. Este tipo de medidas genera una gráfica de fuerza respecto al desplazamiento generado por el rasgado.

Figura 2. Prueba de rasgado aplicando esfuerzo sobre los extremos de la división de la probeta.



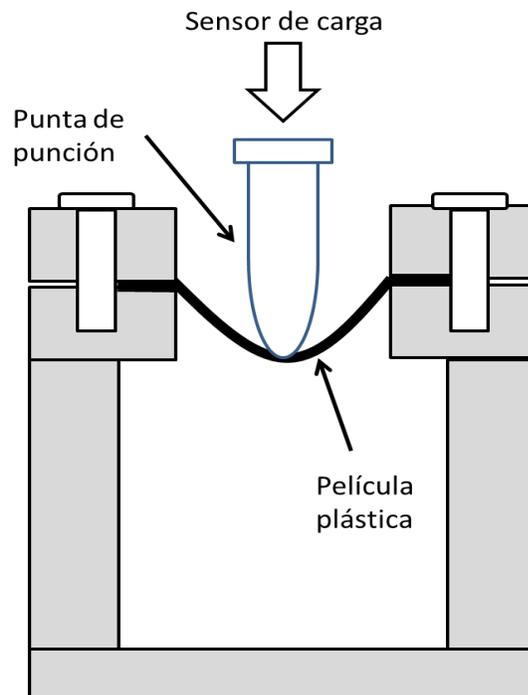
Similar al caso anterior se lleva a cabo la prueba de evaluación de sellado, sólo que la probeta generada en este caso corresponde a dos probetas iniciales pegadas por un extremo en común. Como se presenta en la Figura 3. Para este caso, la gráfica generada tiene las mismas características que el caso anterior.

Figura 3. Evaluación de sellado en empaques de películas plásticas.



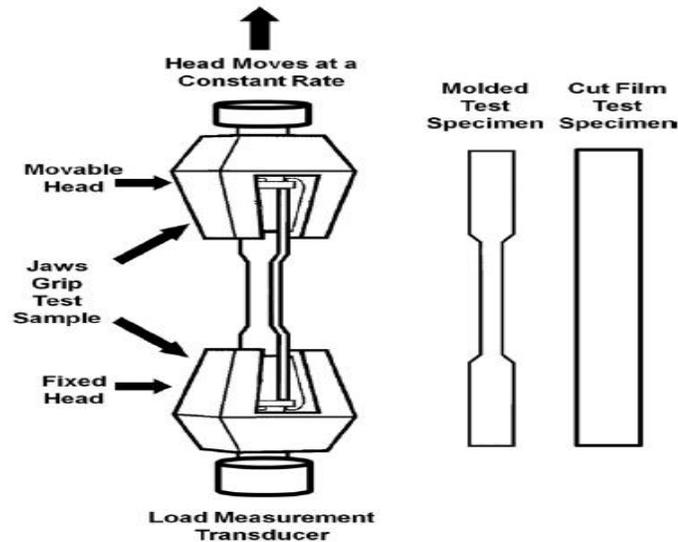
En el caso de pruebas de indentación y resistencia al impacto, una probeta del material en estudio es tensionada desde sus extremos, luego un vástago incide ortogonalmente sobre su superficie para evaluar la resistencia a la penetración exhibida por el plástico, este proceso se puede observar claramente en la Figura 4. En esta ilustración se puede observar que el elemento de punción hace contacto con la película pero su función no es penetrarla en el caso de la resistencia al impacto la punta de punción es más delgada e incide una alta velocidad sobre el material con la finalidad de penetrarla y determinar el esfuerzo que esta opone a esa acción.

Figura 4. Indentación en película plástica para evaluar resistencia del material.



Finalmente y no menos importante, las pruebas de tracción (Tensile test). Mostrado en la Figura 5. En este caso, una probeta extraída estratégicamente del material plástico es sujeta de los extremos, para ser estirada gradualmente a velocidad constante; ello es realizado midiendo el esfuerzo de la carga aplicada para lograr la deformación del material. En contextos industriales, este tipo de pruebas se lleva a cabo en máquinas universales de tracción, las cuales permiten ajustar su programación dependiendo de los parámetros requeridos en el tipo de prueba.

Figura 5. Test de tracción en película plástica, tomado de (Mackeen, 2012).



Dentro de los parámetros comunes en una prueba de tracción se encuentran las dimensiones de la probeta, el acondicionamiento del espacio de trabajo, la programación del test, entre otros. En el caso de las dimensiones de la probeta y la programación de la máquina existen normas que regulan la experimentación. Donde para los casos más comunes tenemos los siguientes estándares:

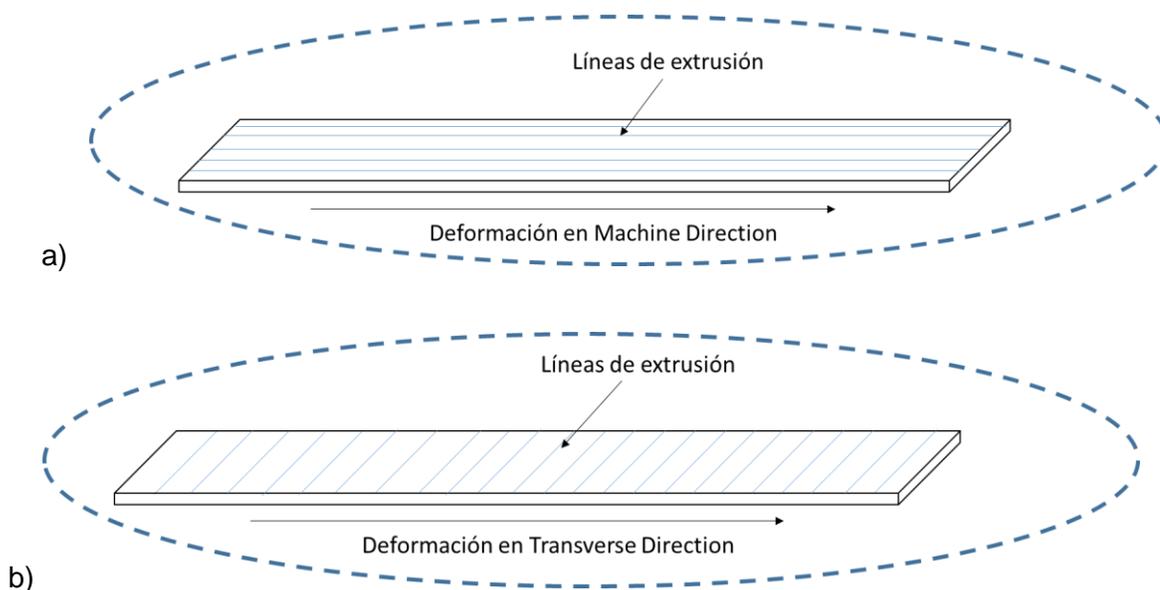
- La norma ASTM D882-12 (Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting), es aplicada para la caracterización de las propiedades mecánicas en películas plásticas delgadas.
- La norma ISO 527-3 (Plastics Determination of tensile properties Part 3: Test conditions for films and sheets), Especifica las condiciones para determinar las propiedades de tracción de láminas de plástico o láminas de menos de 1 mm de espesor.
- La norma JIS K 7127:1999 (Plastics Determination of tensile properties Part 3: Test conditions for films and sheets). Especifica las condiciones de ensayo para películas y láminas plásticas.

No obstante, para películas plásticas multicapas es necesario resaltar que la primera norma es la más comúnmente utilizada de las tres mencionadas, ya que especifica las

condiciones necesarias para estandarizar las pruebas. Estas condiciones son: distancia entre mordazas, temperatura, humedad relativa y características de la muestra a deformar y velocidad de deformación.

En cuanto a la extracción de las probetas, dos tipos de ellas suelen ser utilizadas para caracterizar un rollo completo del material. Donde cada tipo de probeta es extraída en dependencia de las líneas de extrusión del material. Para probetas tipo 1, la extracción se realiza en dirección longitudinal a las líneas de extrusión. En el caso de las probetas tipo 2, la extracción se realiza en dirección perpendicular a las líneas de extrusión del material. La tracción de las probetas tipo 1 se denomina **Machine Direction 'MD'**. En cambio, la deformación de la probeta tipo 2 recibe el nombre de **Transverse Direction 'TD'**, así como se ilustra en la Figura 6. (Mackeen, 2012) .

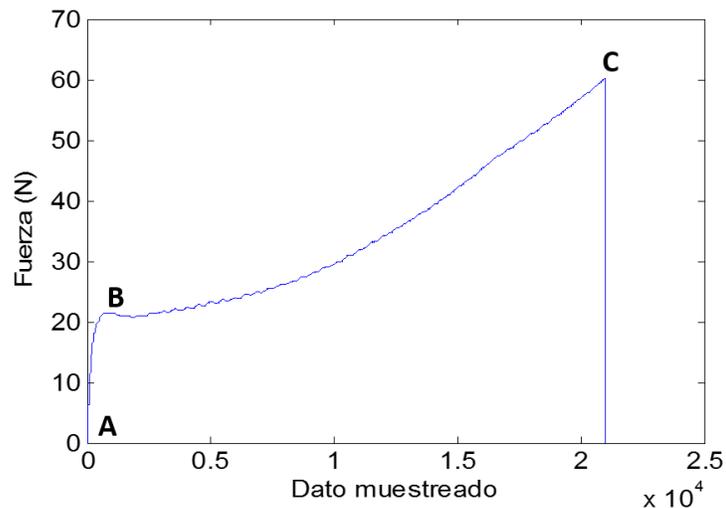
Figura 6. a) Espécimen cortado en dirección a las líneas de extrusión. b) Espécimen cortado en dirección transversal a las líneas de extrusión.



De manera generalizada, y teniendo en cuenta el trabajo de (Hocker, Hummel, Binkele, Lipp, & Schmauder, 2015), el objetivo de la prueba de tracción recae en la evaluación de la cantidad de carga mecánica necesaria para deformar un material, y dependiendo de esta medida se logra diferencia entre tipos de materiales, o se logra determinar los puntos

de fluencia y quiebre donde el material cede a la deformación. Teniendo como resultado del test, una gráfica que resume el comportamiento temporal de la fuerza necesaria en N para lograr una deformación en mm, como se ilustra en la Figura 7.

Figura 7. Comportamiento de la fuerza durante la deformación de una película plástica de 130 micras de espesor.



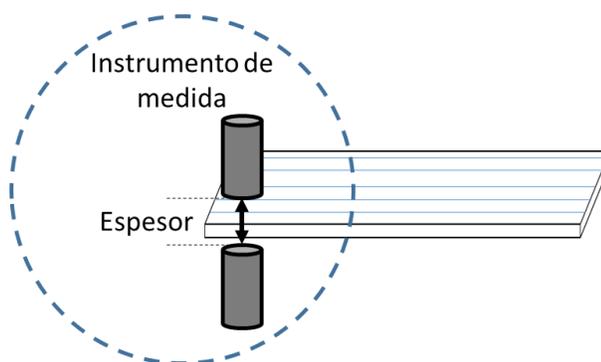
Donde el punto 'A' corresponde al punto de inicio de la deformación. Luego, el comportamiento entre el punto 'A' y el punto 'B' corresponde a la deformación elástica del material, es decir, la zona donde el material tiene las propiedades mecánicas para recuperar su geometría inicial. El punto 'B' marcado en la gráfica se denomina punto de fluencia. Este indica el momento en donde el material cede a la deformación. Del punto 'B' al punto 'C', la deformación del material se denomina plástica. En esta zona la película deformada no recupera su geometría original. Finalmente es de resaltar que el punto 'C' de la gráfica indica el momento en el que la película se fractura (Testing & Films, 2012).

Cabe resaltar, y soportándonos en la gráfica descrita anteriormente, este tipo de pruebas mecánicas, y especialmente los ensayos de tensión, sólo permiten hacer evaluaciones del comportamiento global del material, posibilitando la exploración de técnicas que permitan llevar a cabo evaluaciones locales, o que permitan correlacionar la información global obtenida, con información puntual del material.

Independiente a la evaluación de la respuesta mecánica a la deformación se encuentran las medidas de espesor. Si bien existe un gran número de equipos para la medición del espesor en películas delgadas, en su mayoría son técnicas de contacto, donde el instrumento de medida consta de dos terminales que se ajustan sobre la sección transversal del material, de esta manera la separación entre las terminales representa una

medida del espesor evaluado, como se presenta en la Figura 8. Normalmente el espesor de películas plásticas se mide en micrómetros.

Figura 8. Medición de espesor en película plástica utilizando instrumentos de contacto.



Uno de los instrumentos de medida que se utiliza a nivel de laboratorios y dentro de los contextos industriales es el tornillo micrométrico, el cual tiene una escala que permite evaluar espesores del orden de las micras hasta 2.5 centímetros, como el mostrado en la Figura 9, este tipo de instrumentos tiene un alto grado de precisión y cuenta con una rango mínimo de medición de 0.01mm.

Figura 9. Tornillo Micrométrico utilizado para medición de espesor.



1.1.3 Análisis Espectral en películas plásticas.

Antes de entrar en materia con la definición y explicación de algunas de las técnicas espectrales usadas con frecuencia para hacer evaluaciones en películas plásticas, es

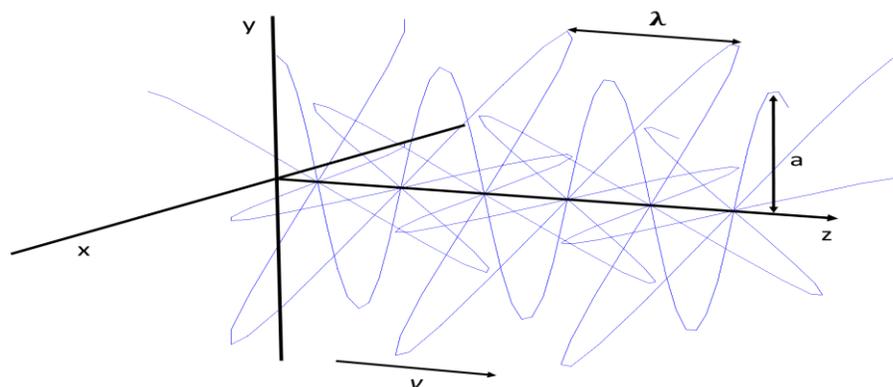
necesario citar los conceptos relacionados con la naturaleza de la luz, los cuales fundamentan el desarrollo de la temática abordada.

1.1.3.1 La luz y sus propiedades físicas.

El trabajo más relevante sobre la teoría ondulatoria lo realizó Maxwell en el año de 1873, donde afirmó que la luz era una forma de onda electromagnética de alta frecuencia. Hertz y otros investigadores demostraron que estas ondas exhibían reflexión, refracción y otros fenómenos relacionados con los comportamientos ondulatorios. Sin embargo, algunos comportamientos de la luz no se amoldaban a los modelos ondulatorios, como lo es el efecto fotoeléctrico. Es por ello que se considera que la luz tiene una naturaleza dual. Donde para ciertos casos la luz se comporta como una onda, y para otros como una partícula (Serway, 1996).

Para fines prácticos, la luz es considerada una onda electromagnética sinusoidal con vibraciones de amplitud 'a' en direcciones aleatorias y ortogonales al eje de transmisión 'z', en el que se desplaza con una velocidad 'v', como se presenta en la Figura 10. Aquí se observan las componentes de campo eléctrico (Goldstein, 2010). Es de resaltar que en la gráfica no se hace mención del campo magnético porque este se considera ortogonal al campo eléctrico.

Figura 10. Propagación del campo eléctrico de la luz.

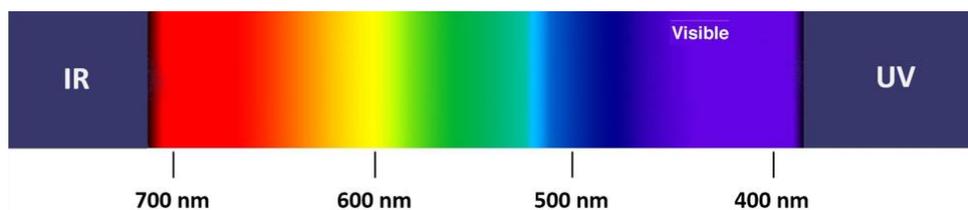


De la gráfica anterior, la luz puede ser entendida como una integración de dos componentes ortogonales, donde para una condición de propagación en un plano, la componente vertical corresponde a la oscilación del campo eléctrico y la componente horizontal corresponde a la oscilación del campo magnético. Para un formalismo matemático de la representación de la luz, por favor remitirse al capítulo 3, Teoría electromagnética, fotones y luz (HECHT, 2000).

En términos técnicos, se puede asumir que la luz emitida por fuentes de iluminación tiene dos características principales, la intensidad (Asociada a la potencia de la fuente), y la longitud de onda, respectivamente. Podría decirse que la longitud de onda está relacionada con la forma en que la percibimos, como se describe en la Figura 11. En este caso, la luz perceptible por los seres humanos, o espectro visible, está entre los 400 y 800nm. No obstante la intensidad de la luz no es una variable de la longitud de onda sino de la potencia de la fuente. Cuando se tiene alta intensidad en la fuente, podemos asimilarlo como una intensidad de luz brillante; y cuando se tiene una fuente de luz de baja intensidad, podemos asimilarlo como una luz opaca.

Figura 11. Esquema, clasificación de la luz en función de la longitud de onda.

(Tomada de <https://moaramore.com/2016/04/27/los-colores-y-la-radiacion-subliminal-a-nuestro-alrededor/>).



Cuando la longitud de onda de la fuente de iluminación se encuentra entre 10 y 380nm se dice que la luz es ultravioleta. Este tipo de iluminación no es perceptible por la vista humana, sin embargo suele ser utilizada para aplicaciones como desinfección de agentes

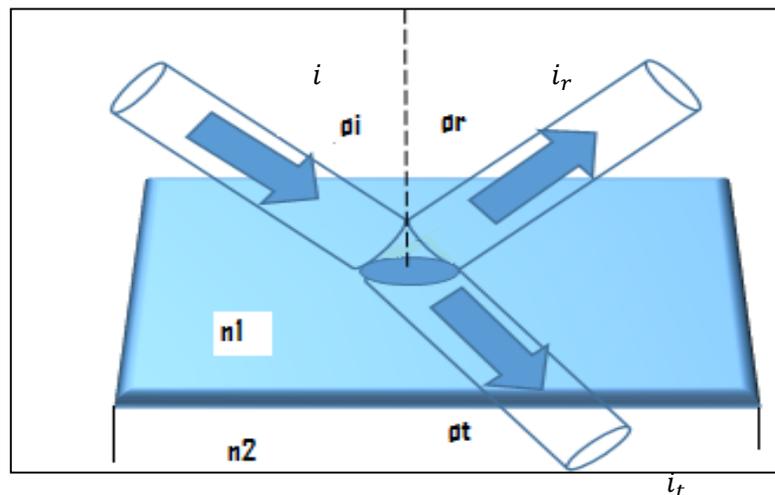
patógenos en el agua, prueba de filtros solares en lentes, fuente para la medición de la eficiencia en materiales utilizados en los paneles solares (Song, Mohseni, & Taghipour, 2016) (Boujnah et al., 2016).

En el caso de la luz con longitud de onda comprendida en el rango 780nm a 1mm, se dice que es iluminación infrarroja, entendiéndose que las que se encuentran cercanas al espectro visible se les llama infrarrojo cercano 780 a 3000nm, y son usualmente observadas con dispositivos diseñados para el espectro visible, tales como cámaras digitales y sensores termográficos.

Para sintetizar el efecto de la longitud de onda de la luz dentro de aplicaciones, puede decirse que las ventajas radican en la posibilidad de manipular radiaciones lumínicas que no son predecibles por el ojo humano, o poder caracterizar diversos tipos de elementos dependiendo de la respuesta óptica que generan para diferentes longitudes de onda (diseño de lentes). Esto quiere decir que para un mismo material, la transmisión de la luz es una función de la longitud de onda.

Aprovechando que la luz es de carácter ondulatorio, es de precisar que algunos de los fenómenos comúnmente estudiados son la transmisión y reflexión. Estos fenómenos corresponden a los cambios que el haz de luz experimenta cuando es irradiado sobre un medio diferente a su medio de propagación inicial. En estos casos el rayo incidente es descompuesto en un porcentaje transmitido y en otro porcentaje reflejado, como se observa en la Figura 12.

Figura 12. Reflexión y transmisión de un haz incidente.



Como fue observado, el rayo de luz cambia al incidir sobre el medio n_1 lo que produce el efecto de transmisión y reflexión, donde el porcentaje de luz reflejada y transmitida depende de las propiedades ópticas del medio, como se expresa en (2). Para las películas plásticas multicapas, las propiedades ópticas son una relación entre las propiedades de cada capa y el espesor de cada una de ellas.

$$i \equiv i_t + i_r \quad (2)$$

Donde ' i ' representa la intensidad de luz incidente, ' i_t ' e ' i_r ' representan la intensidad de luz transmitida y reflejada, respectivamente. La literatura reporta que la respuesta óptica de los materiales, o de los medios no sólo varía con las características de los mismos, sino que son una función de la longitud de onda (Fase, 1982). En este trabajo se hace énfasis en la componente de luz transmitida.

Dentro de los trabajos en óptica, una técnica para la caracterización de luz transmitida en materiales se denomina transmitancia. Esta puede ser definida como la relación que existe entre la intensidad de la luz incidente y la intensidad de la luz transmitida y está dada por (3).

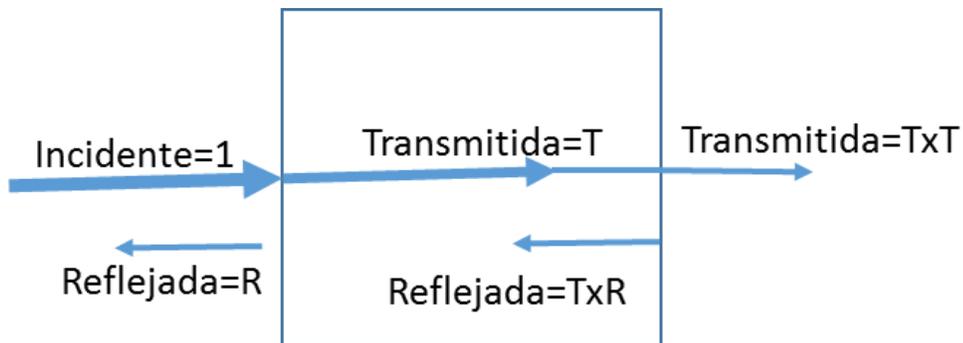
$$T = \frac{i_t \cos \theta_t}{i \cos \theta} \quad (3)$$

Donde ' T ' representa la transmitancia de la luz, ' θ ' representa el ángulo de incidencia, ' θ_t ' representa el ángulo del haz transmitido. De manera similar, la reflectancia se define como la relación entre la intensidad de la luz incidente y la intensidad de la luz transmitida, como se muestra en (4).

$$R = \frac{i_r \cos \theta_r}{i \cos \theta} \quad (4)$$

Donde ' R ' representa el porcentaje de luz reflejada, ' θ_r ' representa el ángulo del haz transmitido (HECHT, 2000). En la práctica, las pruebas de transmitancia se basan normalmente en la incidencia de un rayo de luz normal a la superficie del medio, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Esquema de transmisión y reflexión de la luz cuando el haz incidente es perpendicular al medio de incidencia.



En donde, los ángulos de incidencia, transmisión y reflexión son asumidos como cero grados con respecto al eje de transmisión. De este modo, la transmitancia puede ser expresada a través de (5), y la reflectancia es expresada a través de (6). Finalmente (7) es la expresión que relaciona los dos fenómenos mencionados. Esta indica que al no considerar pérdidas en el experimento, el porcentaje de luz transmitida en conjunto con la luz reflejada equivale al 100% de la luz incidente.

$$T = \frac{i_t}{i} \quad (5)$$

$$R = \frac{i_r}{i} \quad (6)$$

$$1 \equiv T + R \quad (7)$$

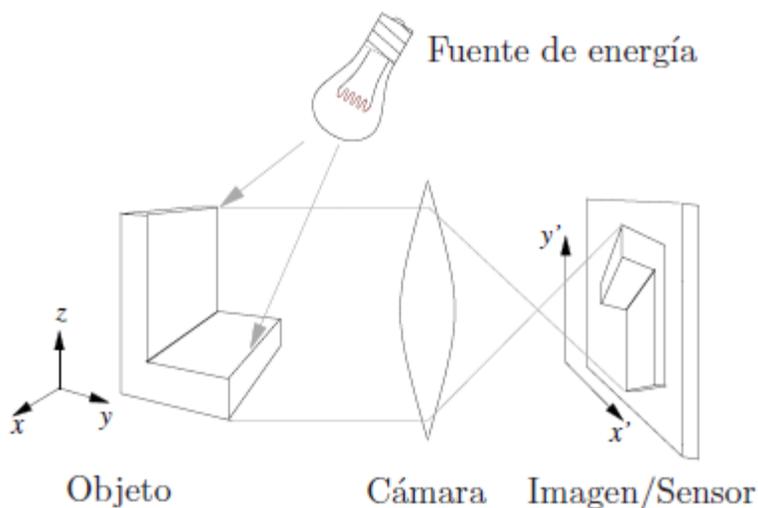
Cabe mencionar que a partir de estos fenómenos ópticos se desprenden otros conjuntos de técnicas, tales como: espectroscopia (A.R. Astvatsurov, 1999), interferometría (Nigel Marx, 2016), FTIR (Jing Li, 2014), entre otras. Todo ello es con el objetivo evaluar la concentración en sustancias o definir caracterizar las propiedades ópticas de un medio de transmisión.

Si bien el conjunto de técnicas ópticas desarrolladas recientemente aportan amplia información del medio de transmisión, la sola medida de la intensidad transmitida también alberga información de ese tipo. Información que dependiendo de la aplicación y el contexto industrial podría ser explorada como técnica de medición.

Medición intensidad de luz trasmitida

Existe un conjunto de dispositivos que permiten la medición de la intensidad de la luz que viaja a través de un medio determinado. Como un primer caso se tienen las cámaras fotográficas. Estas están compuestas por un sensor que se excita dependiendo de la cantidad de luz incidente como se muestra en la Figura 14. En estos casos la respuesta de la cámara depende de la sensibilidad del sensor y de las condiciones del medio.

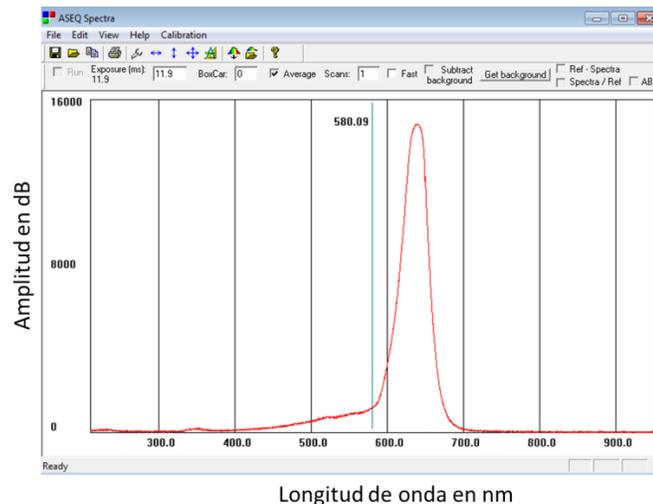
Figura 14. Adquisición de imagen digital, Tomado de (Moya, 2012)).



Aunque los sistemas basados en cámaras digitales para medir la intensidad de luz suelen ser simples, la dificultad de la discriminación de la respuesta óptica del material en cada una de las longitudes de onda, hacen de su uso un proceso complejo.

Uno de los dispositivos versátiles para medir la intensidad de la luz en dependencia de la longitud de onda recibe el nombre de espectrómetro. Estos dispositivos generan respuestas eléctricas en dependencia de la intensidad de luz percibida por un sensor óptico, el cual responde de manera independiente a un amplio rango de longitudes de onda. Normalmente un espectrómetro expresa la intensidad de la luz en decibeles (db), y se representa gráficamente en función de la longitud de onda, como se presenta en la Figura 15. Allí podemos observar que el eje vertical corresponde a la amplitud de la intensidad percibida y el eje horizontal es cada una de las longitudes de onda evaluadas.

Figura 15. Imagen de espectro de luz obtenido desde un espectrómetro aseq.



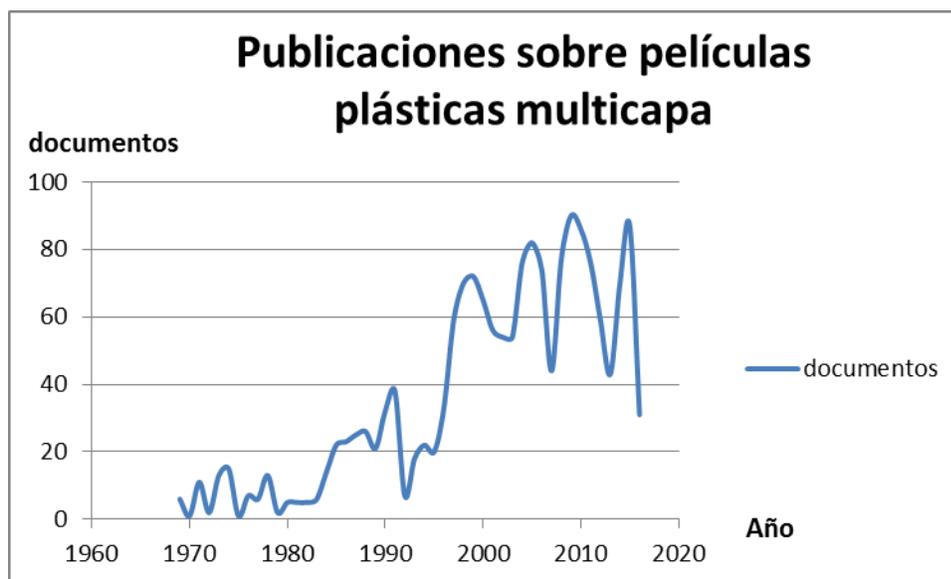
En casos donde una misma fuente de iluminación es utilizada para irradiar diferentes elementos, la intensidad de la respuesta espectral presenta variaciones de amplitud, las cuales hablan de las propiedades que caracterizan a cada uno de los elementos evaluados. Esta situación es análoga a observar con una misma fuente de iluminación, un mismo material pero que varía mecánicamente en el tiempo. En este caso la variación de la respuesta espectral se asocia a las variaciones del material. Esto podría ser explorado para describir deformaciones geométricas en materiales.

1.2 Estado Del Arte

En la industria, el uso de películas plásticas ha incrementado notablemente en los últimos años. Estas han sido utilizadas en múltiples aplicaciones como empaques de alimentos recubrimiento de celdas solares, protección de superficies, películas para uso agrícola y de invernadero entre otras aplicaciones, como se enuncia en los trabajos realizados por (Tojo et al., 2007), (Tanabe et al., 2010).

Con la introducción de los materiales poliméricos a la industria, los estudios relacionados con películas plásticas han incrementado notablemente en los últimos 20 años, como se observa en la Figura 16. Allí, aunque se observan algunas fluctuaciones, se observa un crecimiento marcado desde los años 90's. Esto indica que existe un gran interés, por parte de la comunidad científica sobre el estudio del comportamiento de estos materiales en diferentes tipos de aplicaciones. En los primeros 5 meses del año 2016 se reportaron más trabajos sobre películas plásticas en la literatura, que los reportados anualmente hace 20 años.

Figura 16. Grafico que muestra el número de documentos publicados sobre películas plásticas multicapa 'SCOPUS'.



La relevancia de las películas plásticas se debe a que este tipo de materiales son traslucidos, característica que los hace atractivos en términos de la visualización de su contenido. Resistentes, fáciles de moldear, protectores del material que contienen en dependencia de los elementos utilizados para la fabricación de la película plástica. Además, sus propiedades mecánicas presentan facilidad de manejo en términos de la adaptación a tamaños, formas y texturas (Testing & Films, 2012).

En cuanto a los polímeros que componen una película plástica, en la cotidianidad observamos que una de las principales aplicaciones películas plásticas multicapa es el empaque al vacío de alimentos, Las películas multicapa de polímero se generan a partir de la combinación de diferentes polímeros, aprovechando las propiedades de cada uno de los materiales que la componen, estos pueden ser: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliamida (PA), copolímero de Vinil Acetato-Etileno (EVA), Etilen-Vinil-Alcohol (EVOH) y otros; La finalidad de unir diferentes polímeros es obtener una película plástica con características que además de dar una buena presentación al producto, permita protegerlo.

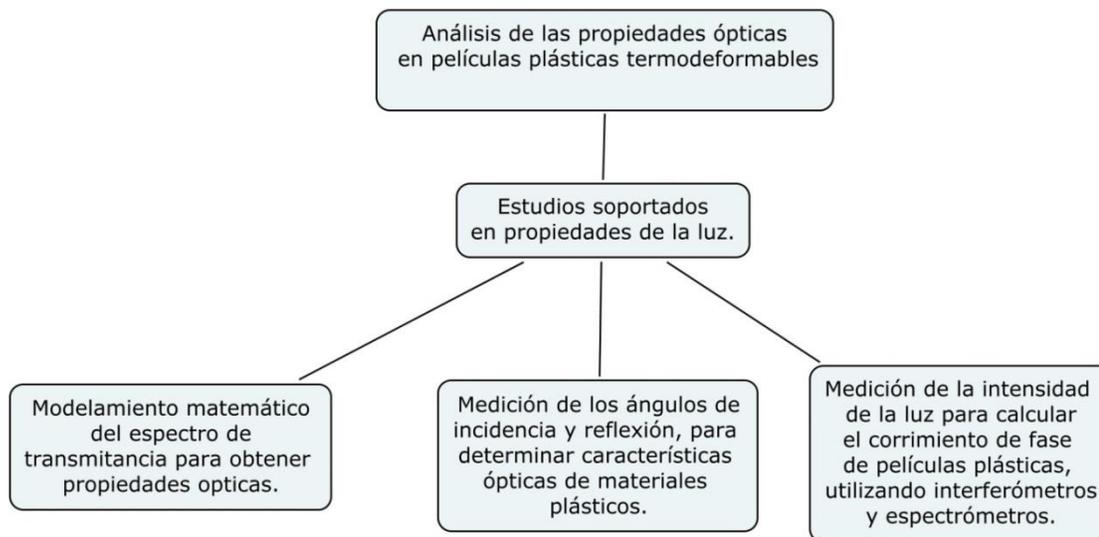
En algunos alimentos las láminas del material deben ser de alta barrera para bloquear los gases del medio como el oxígeno que puede producir (oxidación y decoloración) o impermeabilizante frente a la humedad del medio (vapore de agua); se busca reducir la disponibilidad de gases y humedad para evitar el crecimiento bacteriano y la pérdida de propiedades organolépticas del producto contenido, es decir generar condiciones adversas que inhiban el crecimiento de la flora microbiana alterante garantizando la calidad del producto. (McKeen, 2014), (Rushton, 2003).

En procesos de empaçado o recubrimiento de alimentos, en algunos casos se hace necesario ajustar las películas plásticas a condiciones de forma y tamaño, introduciendo variaciones de longitud, espesor y estructura; como fue explicado en el trabajo presentado por (Tanabe, Watanabe, Oyama, & Seo, 2010), en donde se describe la relación que existe entre la deformación y la variación estructural del material, siendo el espesor una de las variables más afectadas en el proceso. Por lo tanto es una de las variables de interés y caracterización en términos de evaluar el desempeño del material.

En la actualidad una de las herramientas utilizadas para describir características en un película material plástico son las pruebas mecánicas, estas pruebas nos entregan resultados como ductilidad y relación entre esfuerzo y deformación las cuales describen de forma general el material (Groover, 2007),(Testing & Films, 2012), En busca de poder describir de forma puntual las característica en la película plástica durante el proceso de deformación se buscan alternativas que permitan medir el espesor utilizando técnicas de no contacto, que no destruyan el material y que se pueda evaluar en cualquier instante durante la deformación de las películas plásticas.

En busca de técnicas que puedan dar solución el problema planteado, se encontró en la literatura que han realizado estudios de las propiedades físicas de la luz cuando incide sobre un material, en particular se ha mostrado gran interés en los materiales plásticos, se han realizado análisis de las variaciones de los espectros luminosos cuando inciden sobre películas de plástico tanto en el proceso de reflectancia como en transmitancia, las líneas de estudios de las técnicas ópticas aplicadas se resumieron en el esquema expuesto en la Figura 17.

Figura 17. Líneas de estudio sobre propiedades ópticas de películas plásticas.



A continuación se muestran los resultados obtenidos en algunas investigaciones, concernientes a la obtención de características en materiales transparentes, estas técnicas se utilizaron para determinar propiedades físicas en materiales y películas plásticas utilizando análisis espectral, de estas técnicas de análisis espectral se encontró que determinaban lo siguiente:

- Índices de refracción.
- Medición de espesor.

En cuanto a la determinación de los índices de refracción, en el 2012 se propuso determinar el índice de refracción complejo en vidrios, utilizando transmitancia y reflectancia medidas desde un espectrómetro. Cabe destacar que para determinar el índice de refracción en el modelo utilizado en este trabajo es necesario conocer el espesor de la película plástica previamente (El-Zaiat, 2012).

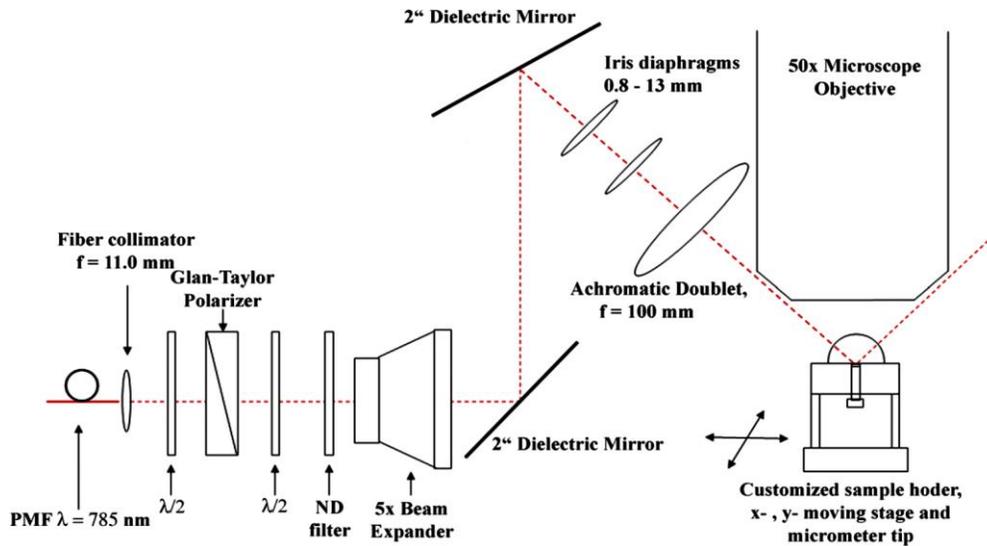
En este mismo año Jan Cisowski, propuso un método para el análisis del espectro óptico de películas delgadas exhibiendo las franjas de interferencia. En este trabajo se demostró cómo determinar fácilmente los números correctos de orden de interferencia sin el conocimiento del espesor de la película. Estos procedimientos sirven como una herramienta para la determinación de un modelo – de dispersión normal libre, para el coeficiente de refracción, siempre que el espesor de la película sea conocido a partir de una medición independiente (Cisowski, Jarzabek, Jurusik, & Domanski, 2012).

En estos artículos pudimos observar la necesidad de conocer el espesor de los materiales para poder obtener el valor de las propiedades ópticas en particular el índice de refracción.

En la bibliografía también se encuentran reportados trabajos que permiten determinar el espesor de películas o materiales pasticos a partir de análisis espectral, entre estos destacamos los siguientes:

Antti O. Kivioja planteó un método utilizando la Reflexión Total Interna (TIR) de Raman “Espectroscopia” para determinar el espesor de películas delgadas de poliestireno sobre un sustrato de polipropileno. Las relaciones de intensidad entre poliestireno y polipropileno se definieron a partir de los espectros y espesores de la película, el montaje espectral realizado se muestra en la Figura 18, en esta se puede observar las características del montaje óptica para la descomposición y adecuación necesarios para determinar la TIR del material examinado.

Figura 18. Configuración del instrumento para una TIR Raman. La línea punteada ilustra la trayectoria del láser de excitación. (A.O. Kivioja et al, 2012).



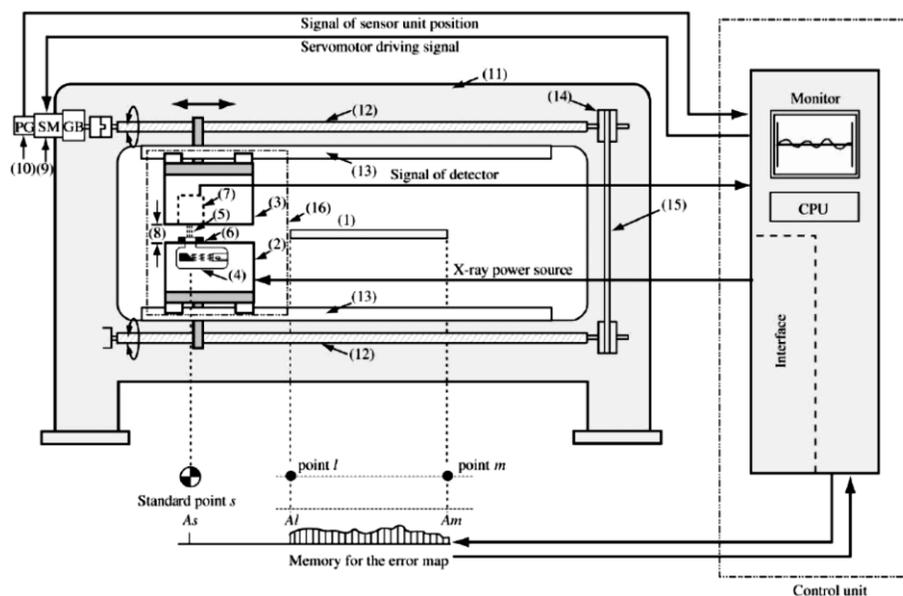
El método cuantitativo fue validado mediante la aplicación del mismo principio de Reflexión Total Atenuada por infrarrojos (ATRIR) Espectroscopia y comparando los resultados por elipsometría.

Este método revela el espesor de la película de forma cuantitativa, es aplicable para películas delgadas sobre sustratos blandos con índices de refracción similares. Sin

embargo era necesario conocer el índice de refracción del material (A.O. Kivioja et al., 2012).

Otra técnica para determinación del espesor fue la propuesta por Fumio Tojo, Esta técnica se basa en la emisión de un haz de hendiduras de rayos x como se muestra en la Figura 19, En este caso la fuente de rayos x emite radiación a través del material y se obtiene la intensidad resultante transmitida sobre la superficie del material, en dependencia de las variaciones de la intensidad se determina el espesor sobre el punto analizado.

Figura 19. Diagrama esquemático del sistema de medición del espesor de película plástica utilizando un haz de hendidura de rayos-X. (Tojo, et al., 2007)



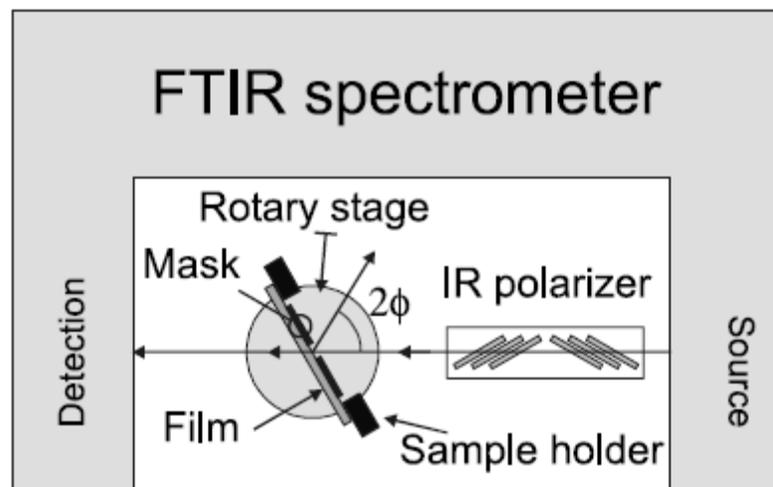
Para este caso se determinó el coeficiente de absorción de la película previamente y utilizando (8) en donde ' I e I_0 ' son la intensidad de la luz total e intensidad de luz a través del material respectivamente, ' μ ' es el coeficiente de absorción de la luz del material analizado y ' t ' corresponde el espesor del material, se logró obtener el espesor (Tojo, et al., 2007).

$$I = I_0 \exp(-\mu t) \quad (8)$$

Continuando con el análisis de los trabajos realizados en 2002 J.C. Martínez propuso un método para obtener el índice de refracción y el espesor para materiales como el PET que han sido sometidos a estiramiento, mediante el análisis espectral de infrarrojos cuando el material presenta un nivel bajo de absorción, para esto miden el espectro de transmitancia

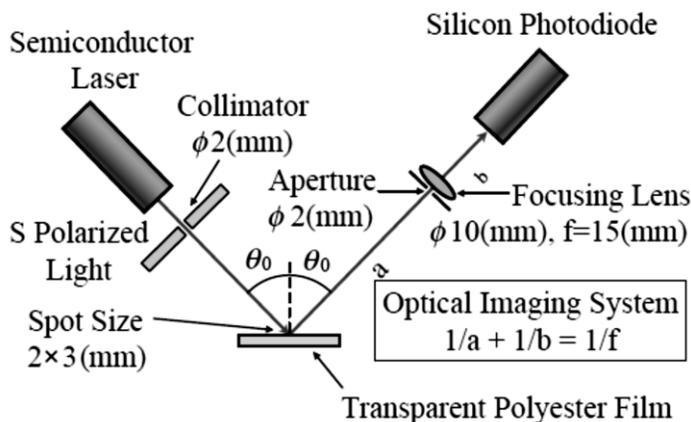
con diferentes ángulos de incidencia como se muestra en la Figura 20, se busca medir variaciones de ángulo, buscando que estos ángulos estén cerca del ángulo de Brewster para evitar absorción (interferencias) y también midiendo la intensidad de luz transmitida, para obtener constantes físicas del material como el índice de refracción el cual varía cuando el material es deformado (Martínez Antón, 2002).

Figura 20. Configuración óptica adaptada a un instrumento FTIR convencional para la medición de la transmisión polarizada en diferentes ángulos de incidencia (Martínez Antón, 2002).



Kashuhiko Ishikawa, también propone una técnica para medir el espesor de películas transparentes de polímero variando los ángulos de incidencia de la fuente de luz coherente (laser) y la variación de la intensidad de luz reflejada, a partir de esto se utilizan sistemas de ecuaciones para definir el espesor del material, con un porcentaje bajo en el error de la medición. El rango de medición del espesor va entre λ y 100λ , El montaje es sencillo, se muestra en la Figura 21, aquí podemos observar cómo varían los ángulos de incidencia para medir la intensidad de la luz reflejada a través de un fotodiodo de silicio el cual permite trabajar longitudes de onda entre 190 y 1100nm. El porcentaje de error en la medición es bajo, de aproximadamente un dos por ciento.

Figura 21. Arreglo óptico de la configuración experimental para variaciones graduales del Angulo de incidencia. (Ishikawa, Yamano, Asada, Iwata, & Ueda, 2004)



Este método permite medir el espesor de películas plásticas en tiempo real aun si no se conoce el índice de refracción de la película e incluso este método permite determinar el índice de refracción, se utiliza para la medición varios ángulos de incidencia.

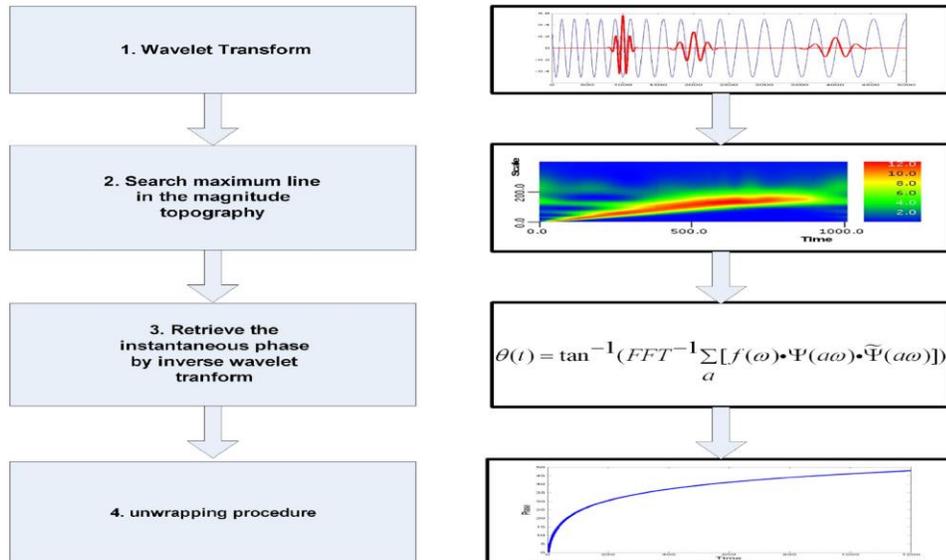
Uno de los problemas con este método es que el tiempo para medir el espesor es muy largo de aproximadamente 2 minutos por punto de la muestra (Ishikawa, Yamano, Asada, Iwata, & Ueda, 2004), esto lo limita para el control de la deformación en películas plásticas.

Otro método propuesto, consiste en recuperar la fase mediante el interferograma de barrido de longitud de onda por transformada wavelet (Hwang, Yoon, Kim, Kim, & Pahk, 2008).

Este método mostrado en la Figura 22, este consiste en genera un término de fase no lineal producido por los cambios de fase, generado por las películas delgadas transparentes que puede ser reconstruido con errores de fase muy pequeños, con un valor estimado en la simulación de $0,5 \text{ rad}^2$.

Figura 22. Procedimiento de la recuperación de fase por transformada wavelet.

(Hwang, Yoon, Kim, Kim, & Pahk, 2008)

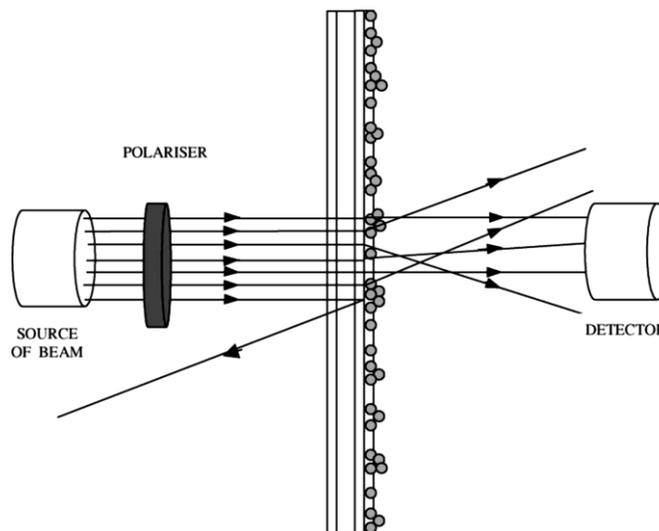


La confiabilidad para recuperar la fase puede garantizar una alta precisión de la medición del espesor y el perfil de rugosidad de la película plástica. En este trabajo el sistema propuesto puede medir el espesor y el perfil de rugosidad simultáneamente utilizando un filtro acústico-óptico sintonizable, para la película con patrón de estructura SiO_2 se pudo medir el espesor con un rango de error del 10% y la rugosidad en la superficie con un error del 1% (Hwang, Yoon, Kim, Kim, & Pahk, 2008)

Como último se realizó un análisis de artículos que trabajan diferentes propiedades ópticas de materiales plásticos.

Alica Larena estudio los efectos de las superficies rugosas y de la interferencia espectral producida por las múltiples capas paralelas de polímeros en la transmitancia como se muestra en la Figura 23. Para la obtención del espesor utilizaron un medidor micrométrico MITUTOYO y un polarizador lineal para la fuente de luz, ya que sin él se obtienen unas franjas de interferencia moduladas lo que dificulta el análisis del espectro.

Figura 23. Esquema de la reflexión, dispersión y efecto de la transmisión de la luz UV-Vis a través de una película de polímero multicapa con superficie rugosa debido a gránulos (Larena, Millán, Pérez, & Pinto, 2002).



En este trabajo lograron determinar 2 tipos de interferencia una relacionada con los revestimientos de la película y las otras con el espesor de la película plástica. (Larena, Millán, Pérez, & Pinto, 2002).

En 2003 P.T. Tsilingiris realizó una investigación la cual presenta el cálculo de la transmitancia total de infrarrojos en películas de Tedlar, basado en las medidas de transmitancia espectral de películas comerciales Tedlar para una longitud de onda entre 2.5-42.5 micras y para una amplia gama de temperaturas fuente radiante entre 20 a 500 °C. Los resultados obtenidos, derivan de un espesor de película específico y para una estrecha gama de fuente radiante (Tsilingiris, 2003)

En esta misma época R. Cárdenas planteó un método para determinar las constantes ópticas de películas delgadas que presentan bandas de absorción. El método permite calcular muestras que poseen bandas de absorción moderada. Durante el cálculo se obtiene inicialmente el espesor de la muestra a partir de la posición y número de máximos y mínimos en el espectro, luego es usado el modelo del oscilador simple de Wemple Didomenico (W-D) para calcular el índice de refracción en toda la región del espectro. Finalmente se calcula el coeficiente de absorción. Se presentan resultados obtenidos en una película delgada de MoO₃ que presenta una banda ancha de absorción en 780 nm aproximadamente. (Cárdenas, Alfonso, & Torres, 2003).

D. Davazoglou (1998), propuso una técnica para obtener el espesor y el índice de refracción complejo de películas orgánicas utilizadas en aplicaciones micro litográficas y de micro mecanizado mediante la aplicación del modelo de Forouhi-Bloomer.

Las Ecuaciones de Forouhi-Bloomer:

$$k(E) = \sum_{i=1}^q \frac{A_i(E-E_g)^2}{E^2 - B_iE + C_i} \quad (9)$$

$$n(E) = n(\infty) + \sum_i^q \frac{B_{oi}E + C_{oi}}{E^2 - B_iE + C_i} \quad (10)$$

En (9) y (10):

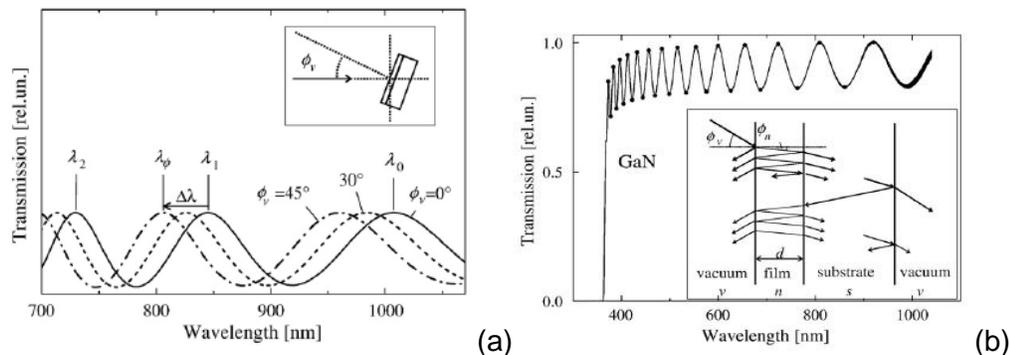
E representa la energía de los fotones en relación con la longitud de onda de la luz. Para $E = hc/\lambda$, donde h es la constante de Planck's y c es la velocidad de la luz en el vacío. E_g = banda de energía. A, B, y C no son solo parámetros de ajuste, sino que están relacionadas con la estructura electrónica del material. Las cantidades B_o y C_o no son parámetros independientes, sino que dependen de A, B, C, y E_g . La ecuación (10) para 'n(E)' índice de refracción, esta derivada de (9) para 'k(E)' a través de la relación de dispersión de Kramers-Kronig.

El material utilizado en este trabajo fueron películas con diversas composiciones y se tomaron sus espectros de transmitancia, a partir de estos se realizó la simulación de la dispersión óptica de estas películas con la ayuda del modelo de (F-B) se ajustaron utilizando técnicas experimentales de análisis de regresión. Los ajustes fueron muy importantes ya que permitieron determinar el índice de refracción real e imaginario y el espesor de las películas (Davazoglou, Vasilopoulou, & Argitis, 1998).

En 2010 B. Santic plantea un método para medir índice de refracción y espesor de forma simultánea en películas delgadas de GaN, basado en el cambio de rotación del patrón de interferencia generado por la variación de los ángulos de incidencia en la Figura 24 se muestran las respuestas a las variaciones de los ángulos de incidencia y los máximos y mínimos de la transmitancia en función de la longitud de onda.

En este caso Utilizaron una combinación de varios procedimientos, el índice de refracción se determina a partir del desplazamiento de fase de forma directa utilizando la ley de Snell.

Figura 24. (a) Cálculo de transmitancia para 3 ángulos de incidencia, (b) transmisión óptica de películas de GaN con ángulo de incidencia de 0° , obtención de puntos críticos. (Šantić, 2010)



Para la determinación del espesor de la película de GaN utilizaron el índice de refracción y el orden de los extremos, máximos y mínimos transmitidos (Šantić, 2010).

En 2011 se publicó un estudio en el cual se realizó una caracterización de películas plásticas delgadas de ZrO_2 las cuales fueron depositadas sobre discos de silicio y sustrato de vidrio. El espesor e índice de refracción de estas películas han sido estudiados mediante el uso de espectroscopia y métodos espectrofotométricos. Los resultados obtenidos por estos métodos se compararon con los resultados obtenidos utilizando microscopía de campo de barrido de emisión.

Esta comparación sugiere que la elipsometría espectroscópica es un excelente método para deducir las propiedades ópticas de estas películas (Yusoh, Horprathum, Eiamchai, Chanyawadee, & Aiempnakit, 2011).

Al momento se encuentran reportados en las fuentes bibliográficas trabajos orientados a la caracterización de las películas plásticas utilizando análisis espectral de la luz cuando el espesor e índices de refracción son constantes, no son considerados los casos donde la forma de las películas presenten variaciones, durante el proceso de medición espectral como lo es el caso del proceso de deformación de películas plásticas por tracción, sin embargo se puede observar que existen modelos que permiten utilizar variaciones en intensidad de la luz transmitida o reflejada para describir características del material como índice de refracción y espesor. Esto se puede hacer puntual es decir en cualquier parte de la superficie del material analizado, lo que permitiría dar respuesta a las variaciones de espesor presentes en algunas aplicaciones de termo-formado para el diseño de empaques las cuales son necesarias para garantizar la calidad del producto.

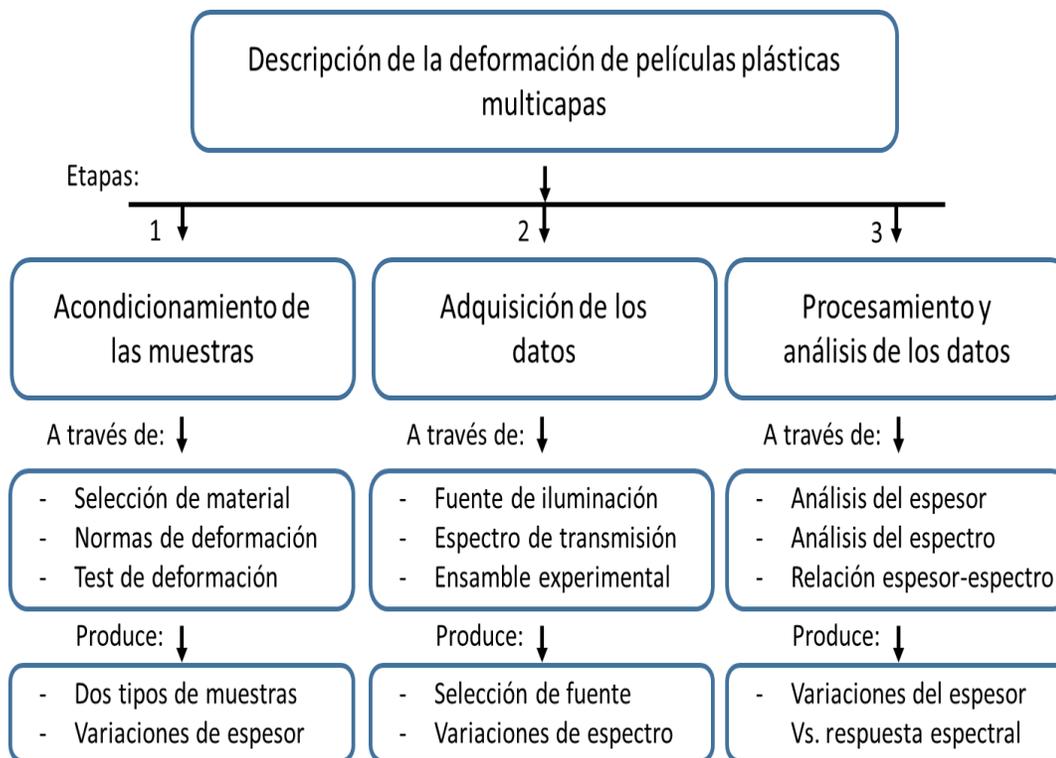
Observando las características del proceso a trabajar se plantea utilizar las variaciones de intensidad de luz transmitida a través de la película plástica multicapa para describir el comportamiento de esta durante la deformación.

2. Metodología Propuesta

La descripción de la deformación de películas plásticas multicapas es propuesta en este trabajo desde tres etapas generales, las cuales resumen cada uno de los subprocesos

realizados. La primera etapa de la metodología consiste en el acondicionamiento de las muestras. La segunda etapa se basa en la adquisición de los datos. Y la tercera, corresponde con el análisis y procesamiento de los datos adquiridos a través de las dos etapas previas, como se muestra en la Figura 25.

Figura 25. Esquema de la metodología propuesta



Como fue presentado en la figura anterior, la primera etapa de la metodología se basa en la descripción del tipo de película plástica a utilizar, la adecuación de las muestras a partir de las normas técnicas que estandarizan el estudio de la deformación de este tipo de materiales; adicionalmente esta etapa contiene la puesta en marcha de las pruebas de tracción mecánica de del material en estudio en esta etapa se obtuvieron dos tipos de muestra con diferentes características con respecto a las líneas de extrusión y variaciones de espesor en las muestras durante el proceso de deformación.

La segunda etapa contempla la adquisición de los datos, los cuales en este trabajo corresponden con la medición del espectro de transmisión a través de una película plástica sometida a deformación. Ello teniendo en cuenta las características de la fuente de iluminación, los equipos para la medición del espectro y el ensamble de los mismos en la prueba de tracción. Como resultado de esta etapa se espera la selección de un tipo de

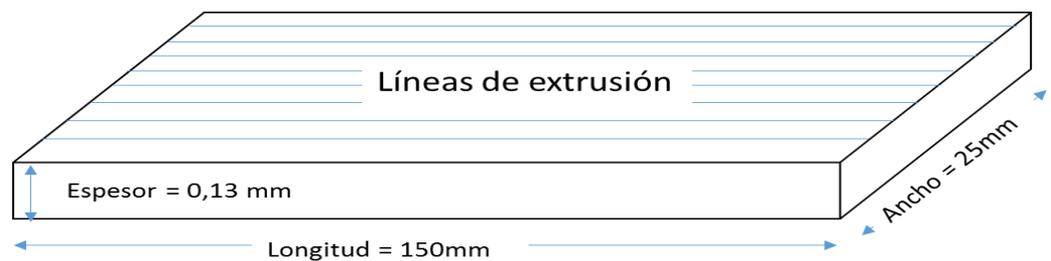
fuente y una colección de datos espectrales correspondientes a las variaciones del material durante la deformación.

La tercera propone el análisis de los resultados a través de la descripción de los cambios de espesor durante la deformación, la descripción de los cambios de espectro durante la deformación y la relación que existe entre los cambios de espesor y los cambios de espectros. Aunque cada uno de las etapas de la metodología se describió de forma general, en las subsecuentes secciones se amplía cada uno de los detalles que subyacen en ellas.

2.1 Acondicionamiento de la muestra

Las muestras a deformar corresponden a piezas extraídas de una película plástica multicapa, la cual tiene una composición interna basada en la superposición de 6 capas internas. Estas capas son producidas a partir de 3 tipos de polímeros, donde su proceso de producción introduce unas líneas internas con textura que se conocen como líneas de extrusión, así como se presenta a manera de esquema en la Figura 26.

Figura 26. Imagen de probeta de material plástico mostrando las líneas de extrusión del material.



Como se mostró en la figura anterior las dimensiones de las muestras utilizadas son 130 micrómetros de espesor, 25 milímetros de ancho y 150 milímetros de largo; estas medidas fueron establecidas según el estándar ASTM 882-12, el cual establece los parámetros para ensayos a tracción de películas plásticas. Con las dimensiones de las muestras el estándar seleccionado también recomienda la velocidad en la cual se debe realizar la deformación del material. A manera de resumen la Tabla 1 presenta las dimensiones de las muestras generadas y de la velocidad establecida para la deformación.

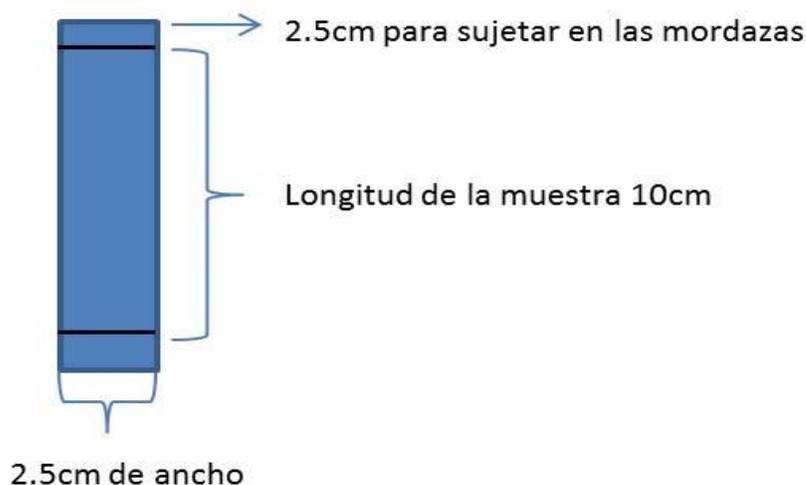
Tabla 1. Dimensiones de las muestras de películas plásticas y velocidad de deformación (ASTM 882-12).

Dimensiones de las muestras de películas plásticas y velocidad de deformación (ASTM 882-12).

| Parámetro | Valor |
|-----------------------|-----------------------------|
| Longitud | 150mm (incluyendo mordazas) |
| Ancho | 25mm |
| Espesor | 0.13mm |
| Velocidad deformación | 500mm/min |

Dado que la sujeción de la película plástica abarca 25mm de longitud por cada extremo de la muestra, la longitud disponible para la deformación es de 100 milímetros, como se puede apreciar en la Figura 27.

Figura 27. Longitudes de la muestra basados en norma ASTM 882-12



Atendiendo a la presencia de las líneas de extrusión dentro de la película plástica, en este trabajo se contemplan dos tipos de deformaciones según norma ASTM 882-12. La primera deformación se refiere a la tracción de muestras extraídas en la dirección de las líneas de extrusión del material, la cual es conocida en la literatura como deformación en dirección máquina (MD - Machine direction). El segundo tipo de deformación corresponde la tracción de muestras extraídas en dirección perpendicular a las líneas de extrusión de la película, y es conocida en la literatura como dirección transversal (TD - Transverse direction).

Una vez acondicionadas las muestras, se procede al ensamble del montaje para llevar a cabo la tracción de cada una de ellas. El siguiente apartado presenta con detalles el montaje experimental utilizado para deformar las películas plásticas.

2.1.1 Deformación mecánica

El proceso de deformación mecánica en las películas plásticas se llevó a cabo en una máquina de tracción PARAM XLW(PC) Auto tensile tester. Para ello la máquina fue configurada a una velocidad de 500mm/min. Los elementos mecánicos con los que la máquina sujeta la película plástica (mordazas) fueron acondicionados experimentalmente para evitar el deslizamiento de la muestra durante el proceso de tracción. Esta acción fue desarrollada adicionando una membrana elástica sobre la superficie de sujeción de la mordaza.

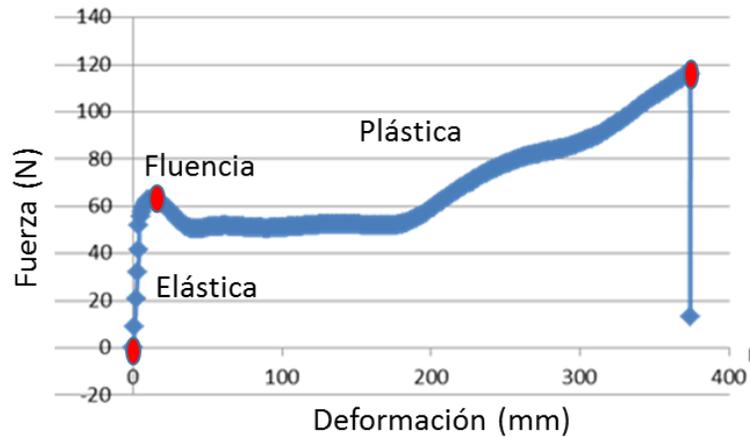
Es de resaltar que la distancia requerida entre mordazas por la norma, para este tipo de máquinas se debe realizar de forma manual midiendo con una regla la separación entre ellas, como se ilustra en la Figura 28.

Figura 28. Máquina de deformación con película plástica para tensile test.



El parámetro común que la máquina de tracción utiliza para describir la deformación de una muestra es la curva de esfuerzos-deformación. Sin embargo el comportamiento temporal de la fuerza durante la tracción también suele ser utilizado. Para el tipo de película plástica multicapa utilizada en este trabajo la curva que representa el esfuerzo en función de la deformación, es presentada en la Figura 29.

Figura 29. Relación entre esfuerzo y deformación de las películas plásticas



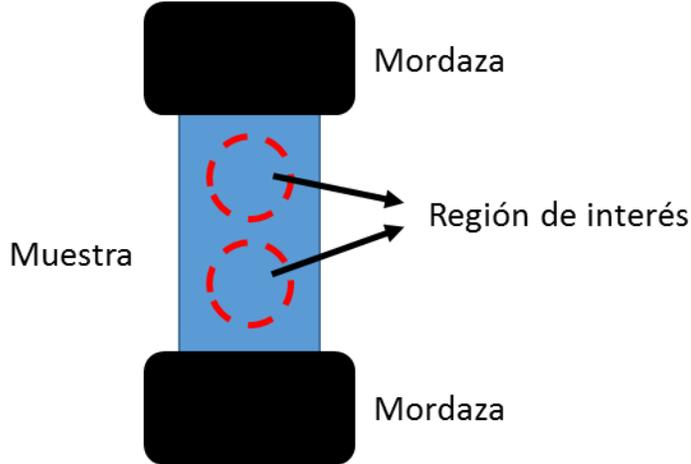
Como se observó en la figura anterior, la curva experimenta diferentes dinámicas durante el proceso de deformación. Inicialmente el incremento del esfuerzo es lineal lo cual corresponde a la etapa elástica de la deformación y subsecuente a ella se observa la fluencia de la deformación evidenciando la etapa plástica del proceso.

Si bien el comportamiento de la fuerza caracteriza la deformación de las películas plásticas, en este trabajo se hace énfasis en las variaciones del espesor que las muestras experimentan durante el proceso de deformación; proceso que se expande en el siguiente apartado.

2.1.2 Medición del espesor

De trabajos previos (Briñez, 2013) se tiene que las películas plásticas varían de espesor durante la deformación, y que estas variaciones no son homogéneas sobre la superficie del material. Partiendo de ello, este trabajo propone la medición del espesor durante el proceso de deformación, lo cual es llevado a cabo de manera independiente al sensor automático del ensayo de tracción, y es realizado en dos regiones seleccionadas sobre la superficie de la probeta, como se presenta en la siguiente Figura 30.

Figura 30. Regiones para medición de espesor en deformación de películas plásticas.



En cada región de interés, el espesor fue medido utilizando un tornillo micrométrico donde la resolución de la escala permitía medir 5 micras de este modo para tener una aproximación a la medida en toda la región se realizaban 3 medidas aleatorias y se promediaban entre sí como lo indica la ecuación 11.

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (11)$$

Donde ' \bar{h} ' representa al promedio de los espesores medidos en cada una de las regiones, ' h_i ' de cada uno de los espesores medidos internamente. Los sub-índices de la sumatoria corresponde al número de mediciones, empezando en '1' y terminando en 'n=3' para nuestro caso.

Dado a que la medida del espesor se realiza temporalmente durante la deformación de la película plástica, el espesor promedio puede ser denotado en términos de una función temporal, la cual es almacenada en un vector de datos como lo describe la ecuación 12.

$$H(t) = [\bar{h}_1, \bar{h}_2, \dots, \bar{h}_T] \quad (12)$$

Donde ' $H(t)$ ' representa al vector de datos que almacena las medidas temporales del espesor en cada una de las regiones de interés. Los elementos del vector son cada uno de los espesores promedios evaluados en cada región para un tiempo específico 't'; el cual se evalúa desde 1 hasta 'T' que en nuestro caso es de 10 tiempos (T=10).

En vista que la medida se hizo para dos tipos de regiones y para dos clases de deformaciones, en este trabajo se generan seis vectores de datos del comportamiento del espesor, como se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Discriminación de los vectores de datos que describen las medidas de espesor para dos tipos de muestras plásticas

| Vector | Descripción | Dimensiones |
|------------|---------------------------------------|-------------|
| $H_L(t)_1$ | Espesores en región 1 Longitudinal | 1x10 |
| $H_L(t)_2$ | Espesores en región 2 Longitudinal | 1x10 |
| $H_T(t)_1$ | Espesores en región 1 Transversal | 1x10 |
| $H_T(t)_2$ | Espesores en región 2 Transversal | 1x10 |

2.2 Adquisición de los espectros

De manera general esta sección del trabajo tiene su fundamento experimental en el hecho de que una muestra de película plástica, con un espesor conocido, es irradiada con una fuente de iluminación con longitud de onda conocida. De este modo nuestro objetivo propende por la identificación de relaciones existentes entre la luz que se transmite por el material y su espesor.

Antes de entrar en contexto con la medición de la respuesta espectral que un material plástico exhibe durante la transmisión de un rayo de luz, es importante resaltar el proceso de evaluación de la fuente de iluminación utilizada en este trabajo. Donde, para tener una mayor certeza de los resultados, una bandeja de opciones fueron exploradas. En este caso 8 equipos emisores de luz en el rango visible, y parte del infrarrojo cercano fueron considerados.

Dentro de las características relevantes de cada equipo de iluminación se resaltan las siguientes: Luz monocromática, laser con longitud de onda perteneciente al espectro visible, fuentes controladas que permiten la emisividad en un amplio espectro de iluminación, y laser con longitud de onda perteneciente al infrarrojo cercano.

La selección de la fuente de iluminación estuvo supeditada por los parámetros sugeridos en (van Nijnatten, 2009)(Salzberg et al., 2005)., los cuales exigen como requisito que la potencia emitida sea alta y estable en el tiempo de uso. También se requirió que el espectro

de luz transmitido sea amplio en términos de la longitud de onda, y que la longitud de onda utilizada sea susceptible a variaciones dependiendo del espesor del material evaluado. Para una primera aproximación a la evaluación de las fuentes de iluminación como una herramienta que posibilite la caracterización de la deformación de las películas plásticas, se propuso el siguiente ejercicio. Se diseñó una probeta artificial superponiendo múltiples capas con el fin de incrementar el espesor de la película plástica de tal forma que se evidenciara el efecto de la variación en espesor, evaluando la transmisión de la luz. La Tabla 3 resume el listado de fuentes de iluminación analizadas en este trabajo.

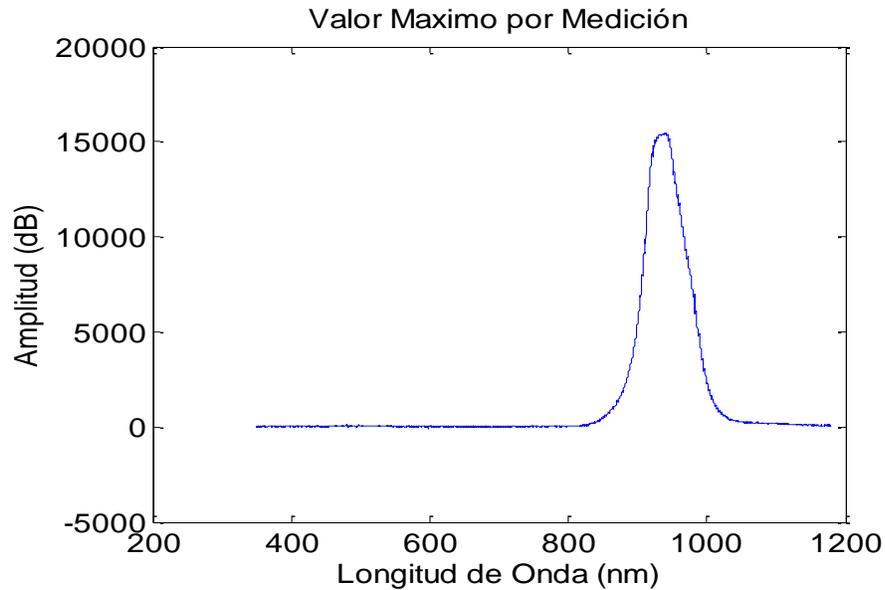
Tabla 3. Fuentes de iluminación utilizadas y su longitud de onda.

| Fuente | Longitud de onda |
|--|------------------|
| LED infrarrojos | 835,5nm y 950nm |
| LED luz normal verde | 540nm |
| Laser | 645nm |
| Fuentes de luz Ocean Optics Halogen light source HL-2000 | 400-1000 nm |
| Laser Infrarrojo | 1300 y 1500nm |
| Fuente de luz Energetiq Laser Driven Light Source (LDLS) | 200-1000nm |

La medición de la intensidad de luz transmitida a través de la película plástica fue llevada a cabo mediante la medición de su respuesta espectral, es decir, con un espectrómetro se mide la intensidad luz que emerge de la película plástica.

Normalmente un espectrómetro es utilizado para medir la intensidad de luz en función de la longitud de onda, donde se puede discernir el aporte que cada componente de longitud de onda hace sobre la señal transmitida. En términos experimentales, un espectrómetro es utilizado para obtener los datos que alimenta la gráfica de intensidad en función de la longitud de onda. Donde el eje vertical de la gráfica es la intensidad, y se mide en 'dB'. Así mismo el eje horizontal de la gráfica es la longitud de onda, y se mide en 'nm', como se presenta en la Figura 31.

Figura 31. Espectro de intensidad lumínica de LED infrarrojo medido con Aseq.



Si asumimos que 'i' es la intensidad capturada por el espectrómetro para cada longitud de onda, la variación temporal del espesor de la película plástica hace a que el espectro se represente de manera temporal como:

$$I(t) = [i_1, i_2, \dots, i_T] \quad (13)$$

Donde, 'I(t)' representa el vector de datos que contiene la medida de la intensidad de luz transmitida por cada valor de deformación. En este caso $T=10$. Es de resaltar que cada punto de medición del espesor corresponde a un punto de parada en la máquina de deformación. Se repitieron las medidas de espectro para cada probeta, y para cada región de interés contenida en ella.

A continuación se describen con más detalle cada uno de los pasos que dan lugar a la medición de los espectros de luz transmitida por una película plástica cuando es sometida a deformación.

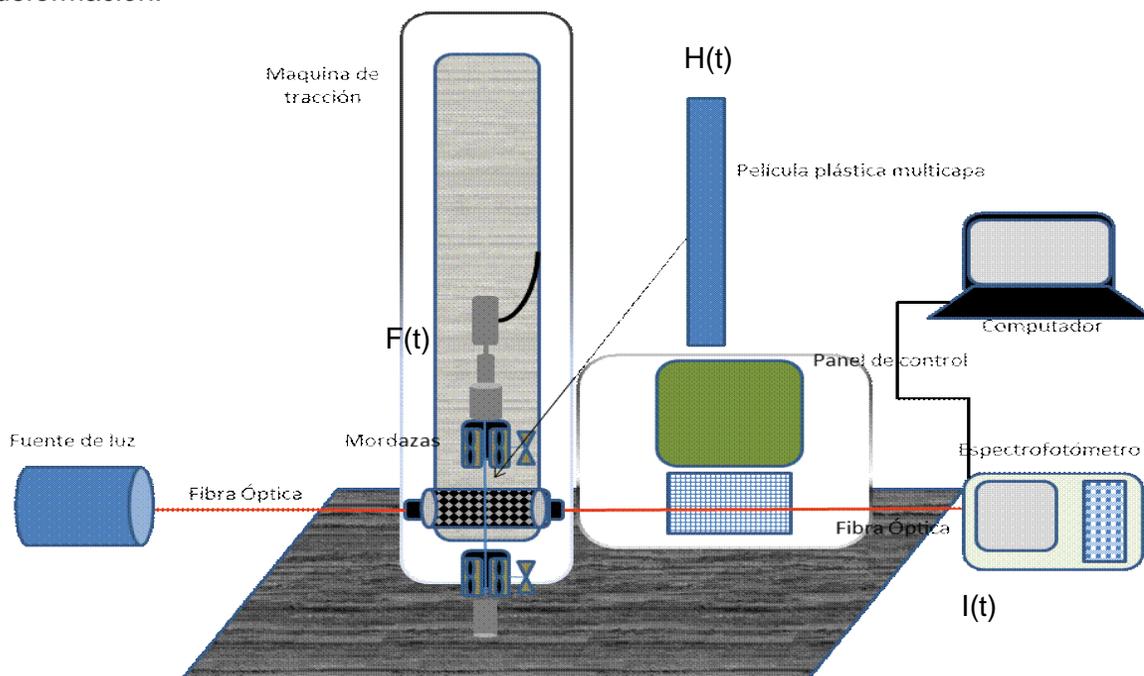
2.3 Medición de los espectros de luz durante la deformación de la película plástica multicapa

Para la medición de la luz transmitida por la película plástica se describen tres etapas: Montaje para la captura de los espectros durante la deformación, selección de la fuente de iluminación y análisis de los resultados obtenidos.

2.3.1 Montaje para captura de espectros

El montaje para la captura de espectros se basa en la iluminación de la cara posterior de una probeta extraída de película plástica, y sujeta por los extremos a una máquina de tracción. En la parte frontal se mide la intensidad de luz que emerge de la probeta mientras es deformada en la máquina, como se ilustra en Figura 32.

Figura 32. Montaje opto-mecánico para la adquisición de espectros durante la deformación.



Este montaje permite deformar la película plástica y adquirir los espectros de luz transmitida a través de ella. En este caso, inicialmente se calibra el espectro de la fuente de iluminación, y luego se mide el espectro de luz transmitido en las regiones de interés de la película plástica. Como pudo ser visto en la gráfica anterior, la fuente de iluminación tiene una alineación directa con el espectrómetro, cumpliendo con la restricciones de (5).

Los componentes que fueron mostrados esquematizados en la figura anterior corresponden a un conjunto de elementos y dispositivos pertenecientes al laboratorio de fibras ópticas del ITM. A continuación se listan los equipos utilizados para el desarrollo de este trabajo.

- **Fuente de iluminación:** Para la selección de la fuente de luz se realizaron pruebas en 8 fuentes en el rango de la luz visible y parte del infrarrojo cercano, utilizando luz monocromática, laser en el visible, fuentes con un amplio espectro, laser en el infrarrojo cercano; para la selección de la fuente de iluminación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros (Salzberg et al., 2005),(van Nijnatten, 2009):

- Potencia emitida alta.
- Estable en el tiempo de uso.
- El espectro de luz transmitido amplio rango en función de la longitud de onda y continuo.
- Material tenga la capacidad de atenuar la intensidad de la luz en las longitudes de onda que proporciona la fuente seleccionada.

Si bien en el trabajo se contemplaron múltiples fuentes de iluminación, el desarrollo experimental como una integración de todos los componentes fue llevado a cabo utilizando una Fuente de luz Energetiq Laser Driven Light Source (LDLS). Dentro de las ventajas que esta fuente presenta están la potencia de transmisión, alto espectro de emisión, estabilidad en la iluminación (PID controlador de estabilidad).

- **Deformación de la película plástica:** la deformación de las probetas fue llevada a cabo utilizando una máquina de tracción PARAM XLW (PC) Auto tensile tester. La cual fue configurada para desarrollar el test según la norma ASTM D882. En este caso la velocidad de tracción es 500mm/min. La Figura 33, muestra una imagen de la máquina utilizada.

Figura 33. Máquina para prueba de tracción, imagen tomada de <http://en.labthink.com/en-us/product/xlw-pc-auto-tensile-tester.html>



- Medición del espesor de la película plástica sujeta a deformación: aunque en un ensayo de tracción la medición del espesor data de un experimento dinámico, en este trabajo el proceso de deformación fue hecho a tramos, y con ello la medida del espesor; garantizando que cada espesor medido correspondiera a un estado más avanzado de deformación. En este caso se utilizó el tornillo micrométrico de marca Somet con un rango de medición de 0 a 25mm, como se ilustra en la Figura 34.

Figura 34. Tornillo micrométrico utilizado para la medición de espesor en películas plásticas.



- **Espectrómetro:** Si bien el trabajo el diseño del montaje experimental requiere del uso de un solo espectrómetro, en este trabajo se utilizaron dos tipos de ellos con el ánimo de seleccionar el que mejor respuesta diera en relación a los objetivos propuestos.

El primer espectrómetro evaluado fue uno de marca Aseq instruments LR1, el cual tiene un rango de operación entre 300 y 1100 nm de longitud de onda, lo cual indica que la medición responde al espectro visible de la luz. Dentro de las bondades de este tipo de tecnologías se encuentra la facilidad de conexión, respuesta rápida en la medición, repetitividad del experimento, exportación de los datos medidos, entre otras. No obstante, estos equipos también tienen desventajas. Entre ellas está la calibración debido a la aproximación matemática de la señal que se mida. La Figura 35, muestra una imagen del equipo mencionado.

Figura 35. Espectrómetro Aseq instruments LR1.



El segundo espectrómetro considerado en este trabajo es el yokogawa AQ6370B, el cual tiene un ancho espectral más amplio que el anterior, siendo este de 300 a 1200nm en longitudes de onda. La Figura 36 muestra una imagen del equipo mencionado.

Figura 36. Espectrómetro Yokogawa AQ6370B.

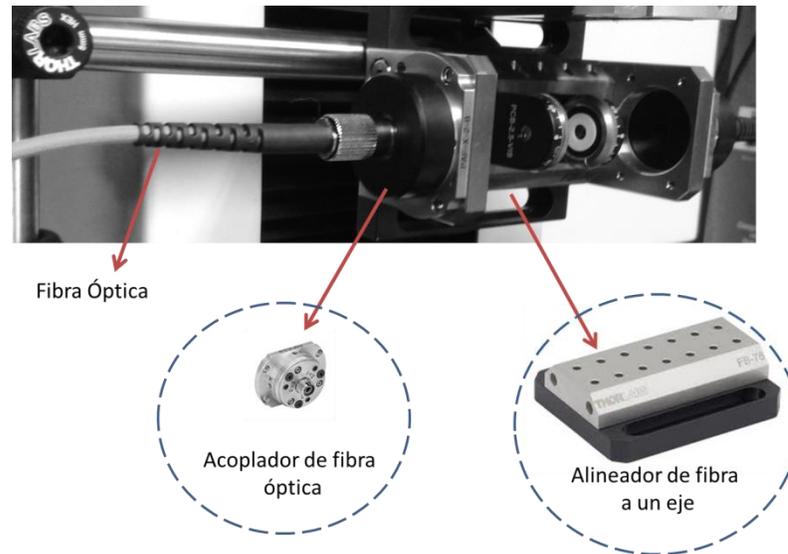


- **Accesorios de acople:** Aunque hay muchas partes del montaje experimental que no son susceptibles de atención, ellas gozan de importancia en el momento de hacer las pruebas. Se utilizó fibra óptica y acoplador de fibra óptica para garantizar una buena medición, distancia entre fibra de emisión y recepción de intensidad de la luz y permitiendo también tolerancia a algunos movimientos.

Entre los elementos desapercibidos en el experimento tenemos el portador de fibra PAF-X-2-B - FiberPort, acoplador de fibra FC/PC & FC/APC, se utilizaron las $f=2.0$ mm, 600 - 1050 nm, 0.43 mm. También encontramos el FB-76 - Single-Axis FiberBench, $L = 76$ mm, 7 Positions. Y finalmente tenemos la fibra óptica THORLABS FT0 3:8 MM, como se muestran en las Figura 37.

Figura 37. Montaje óptico para acoplamiento y direccionamiento de la luz.

(Imagen de acoplador y alineador de fibra de https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3092)



2.4 Análisis de la relación entre las variaciones de espesor y el comportamiento de los espectros.

Antes de hablar de la estrategia para relacionar el comportamiento mecánico de la película plástica, con su comportamiento óptico, es imperativo aclarar que cada medida espectral corresponde a una colección de intensidades asociadas a las longitudes de onda contempladas por el equipo. De este modo, y con el ánimo de representar las intensidades de las longitudes de onda a través de un solo valor, la respuesta espectral fue transformada de la siguiente manera:

- Sumatoria de las intensidades: En este caso la transformación se basa en el cálculo de la sumatoria de las intensidades medidas para cada longitud de onda, como se presenta en (14).

$$I = \int_{\lambda=200}^{\lambda=1100} i(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

- Máxima intensidad transmitida: Aquí se selecciona la longitud de onda con máxima intensidad transmitida, y luego sobre ella se analiza el efecto de la deformación del material plástico, como se presenta en (15). Donde la longitud de onda se evalúa entre 600 y 1000 nm.

$$I = \max(i_\lambda) \quad (15)$$

Con el acondicionamiento de los datos, el análisis de resultados parte del hecho que las medidas mecánicas realizadas durante la deformación de la película plástica están en sincronía con cada valor de intensidad que representa la medida de los espectros. Bajo esta consideración, las variaciones de espesor medidas durante la deformación de la película plástica son correlacionadas con las variaciones de intensidad obtenidas a partir del comportamiento espectral.

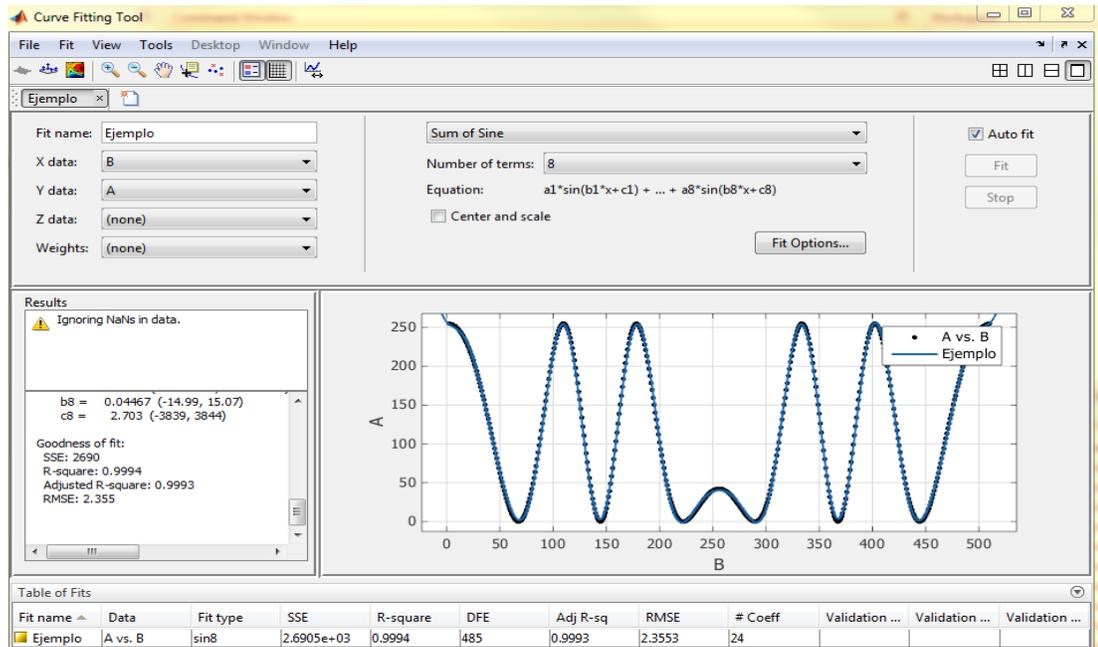
Una primera técnica para asociar el comportamiento de estos dos fenómenos, mecánico y óptico, respectivamente, fue propuesta mediante el análisis del coeficiente de correlación lineal 'r' (BRIÑEZ DE LEON, RESTREPO MARTÍNEZ, & LÓPEZ GIRALDO, 2012). El cuál evalúa la dependencia lineal entre dos variables, como indica (16).

$$r = \frac{\sum_t(I(t)-\bar{I})(H(t)-\bar{H})}{\sqrt{(\sum_t(I(t)-\bar{I})^2)(\sum_t(H(t)-\bar{H})^2)}} \quad (16)$$

Donde $I(t)$ y $H(t)$ son los vectores de las variables a comparar, \bar{I} y \bar{H} son las medias de los vectores y r es el valor de la correlación lineal. El coeficiente de correlación se evalúa entre $[0$ y $\pm 1]$, donde 0 indica que las variables no están correlacionadas, y ± 1 indica la mejor correlación directa e inversa, respectivamente.

Una segunda estrategia para el análisis de las relaciones entre las variables fue basada en el ajuste de curvas. En este caso se parte del hecho que el vector de datos de las variaciones de espesor es una función del vector de los datos espectrales. Y utilizando el toolbox de ajuste de curvas implementado en Matlab se encuentran los coeficientes del modelo que relaciona las dos variables. Así mismo se evalúa el error de ajuste del modelo. La Figura 38, presenta una imagen del toolbox en mención.

Figura 38. Interfaz gráfica de la toolbox de matlab curve fitting



En nuestro caso, la variable 'X' que se introduce en el toolbox debe ser el vector de espectros 'I', y en la variable 'Y' se introduce el vector de espesores 'H'. Ello con el objetivo de obtener un modelo que a partir de un espectro sea capaz de estimar un valor de espesor aproximado.

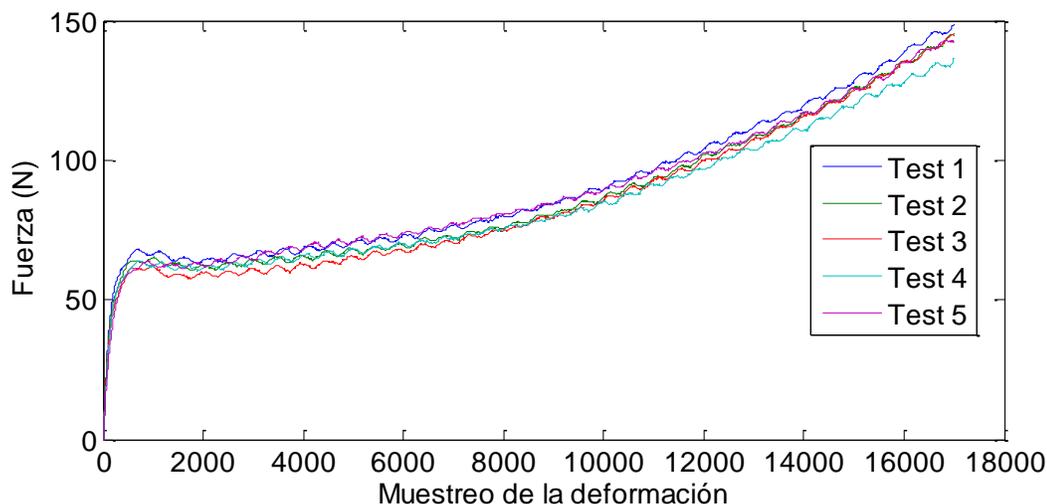
3 Resultados y Análisis

En este capítulo los resultados serán presentados siguiendo el orden de experimentos presentado en la metodología. Subsecuentemente se presentará una discusión alrededor de ellos. Y finalmente se presentará a manera de resumen la metodología resultante del trabajo.

3.1 Deformación de la película plástica

Teniendo en cuenta que dos tipos de probetas fueron extraídas del material plástico, y que esto conllevó a dos tipos de ensayos (MD y TD), las diferencias de la respuesta mecánica a la deformación son analizadas a través de las gráficas del comportamiento de la fuerza, generadas por la máquina de tracción. La Figura 39 muestra el comportamiento de la película plástica (5 ensayos) cuando es deformada en MD. Allí la rotura del material se dio sobre el 350% de la longitud inicial de la probeta. Esta elongación fue alcanzada con una fuerza aproximada de 139 N. Es importante resaltar que para este tipo de materiales, el comportamiento mecánico pasa de elástico a plástico cuando se ha deformado sobre el 150% de su longitud inicial.

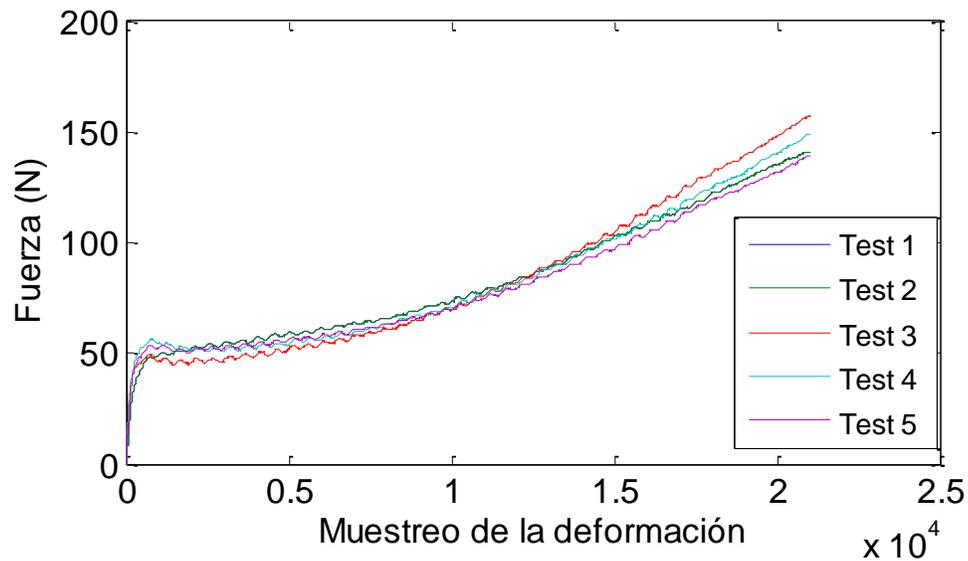
Figura 39. Gráfica de esfuerzo contra deformación de muestra en MD (longitudinal).



En el caso de las probetas deformadas en TD, la Figura 40, muestra la respuesta mecánica a la tracción que ejerce este tipo de materiales deformados en dirección ortogonal a sus líneas de extrusión. Aquí, la rotura del material se dio después de que la elongación alcanzara el 380% de la longitud inicial de probeta. En este caso la fuerza registrada fue

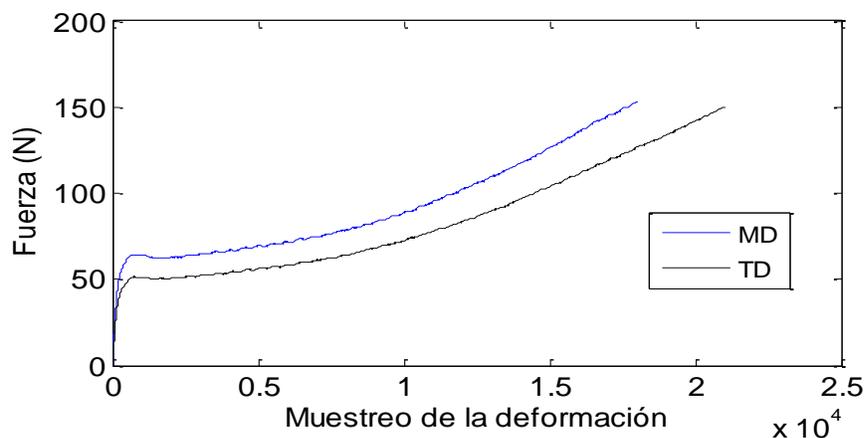
de 145 N. El paso del comportamiento elástico a comportamiento plástico sucedió después del 180% de deformación, con respecto a la longitud inicial de la probeta.

Figura 40. Gráfica de esfuerzo contra deformación de muestra en TD (transversal).



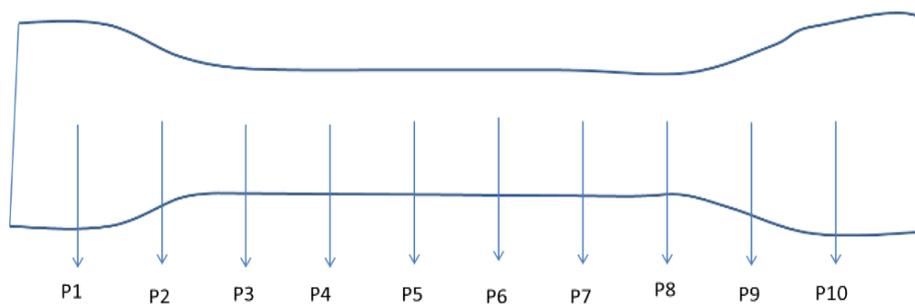
La comparación de los resultados descritos previamente para la deformación en MD y TD, es presentada utilizando el promedio de los 5 ensayos en la Figura 41. Allí, la superposición de las gráficas deja ver claramente la diferencia en respuesta mecánica que el material plástico exhibe si es deformado desde dos direcciones diferentes. En este caso, se observa mayor sensibilidad a la deformación cuando la película es deformada en TD. Inclusive, la rotura del material se logra con menor fuerza para esta dirección, pero la elongación es mayor en esta dirección. Este resultado coincide con las descripciones presentadas en (Testing & Films, 2012).

Figura 41. Gráficas de esfuerzo en dependencia de la dirección de corte de la muestra.



Una vez analizada la respuesta a la deformación, el siguiente resultado habla del comportamiento del espesor sobre la superficie de la probeta. En este caso, los 10 puntos medidos sobre la superficie de la probeta dan cuenta de la no homogeneidad de la deformación del material. La Figura 42. Esquematiza los puntos de medición de los espesores.

Figura 42. Esquema de las variaciones de espesor en diferentes puntos de medición sobre la película plástica.



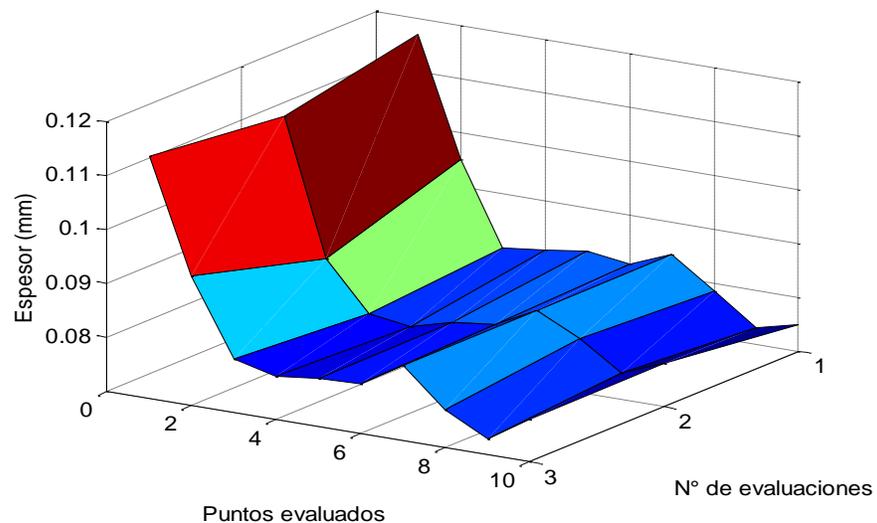
Los espesores medidos con el tornillo micrométrico siguiendo los puntos marcados en la figura anterior son presentados en la Tabla 4 para MD. Es de resaltar que por cada posición se hicieron tres medidas de espesor. Y ello fue realizado para la deformación de los dos tipos de probetas, como se presenta en la Tabla 4 para TD, en la Figura 43 se observa el comportamiento del espesor en varios puntos de la muestra en las 2 direcciones de deformación.

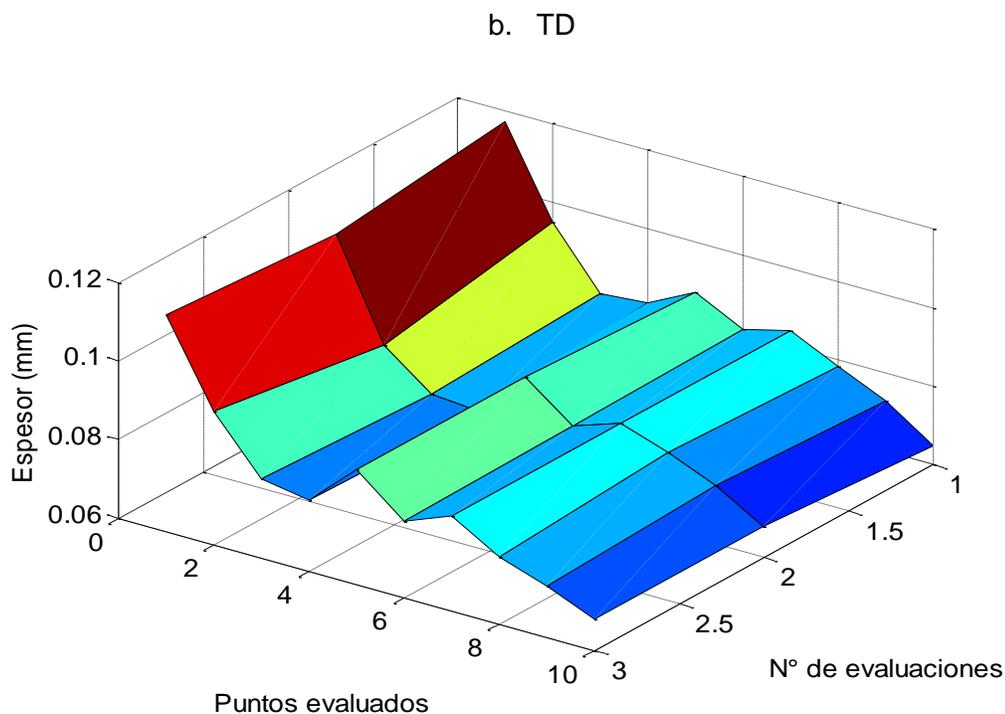
Tabla 4. Medidas del espesor en 10 puntos de la probeta plástica en MD y TD.

| Punto de medición | MD | | | TD | | |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Espesor en mm |
| p1 | 0.117 | 0.112 | 0.115 | 0.115 | 0.112 | 0.115 |
| p2 | 0.095 | 0.087 | 0.094 | 0.098 | 0.087 | 0.094 |
| p3 | 0.08 | 0.078 | 0.08 | 0.082 | 0.078 | 0.080 |
| p4 | 0.081 | 0.077 | 0.078 | 0.081 | 0.077 | 0.078 |
| p5 | 0.082 | 0.079 | 0.079 | 0.087 | 0.089 | 0.089 |
| p6 | 0.081 | 0.08 | 0.0793 | 0.083 | 0.080 | 0.079 |
| p7 | 0.082 | 0.085 | 0.084 | 0.083 | 0.084 | 0.083 |
| p8 | 0.0785 | 0.08 | 0.077 | 0.078 | 0.080 | 0.077 |
| p9 | 0.073 | 0.075 | 0.073 | 0.073 | 0.075 | 0.073 |
| p10 | 0.075 | 0.078 | 0.078 | 0.065 | 0.068 | 0.068 |

Figura 43. Representación de la superficie de las variaciones de espesor en diferentes puntos de la muestra.

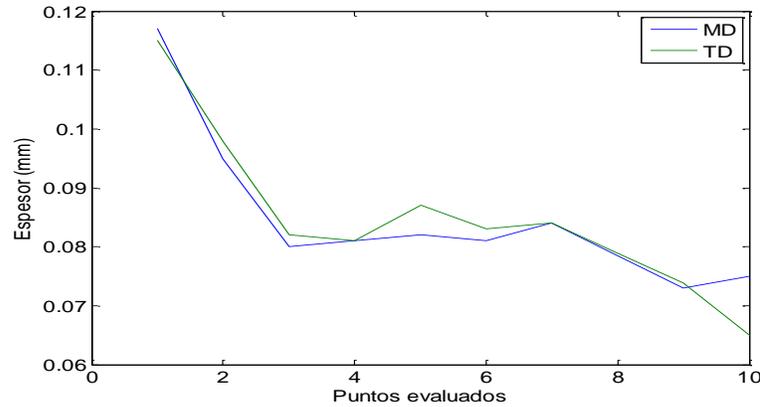
a. MD





La comparación gráfica de la medida del espesor en los dos tipos de probetas muestra la irregularidad del proceso de deformación, como se presenta en la Figura 44 en este caso el material se deforma de manera no uniforme sobre su superficie. Adicionalmente, la gráfica muestra que la deformación en MD tiende a ser más suave que la deformación lograda en TD. En algunos puntos de medidos las variaciones de espesor suelen ser muy pequeñas que podría entenderse como si las probetas tuvieran el mismo comportamiento.

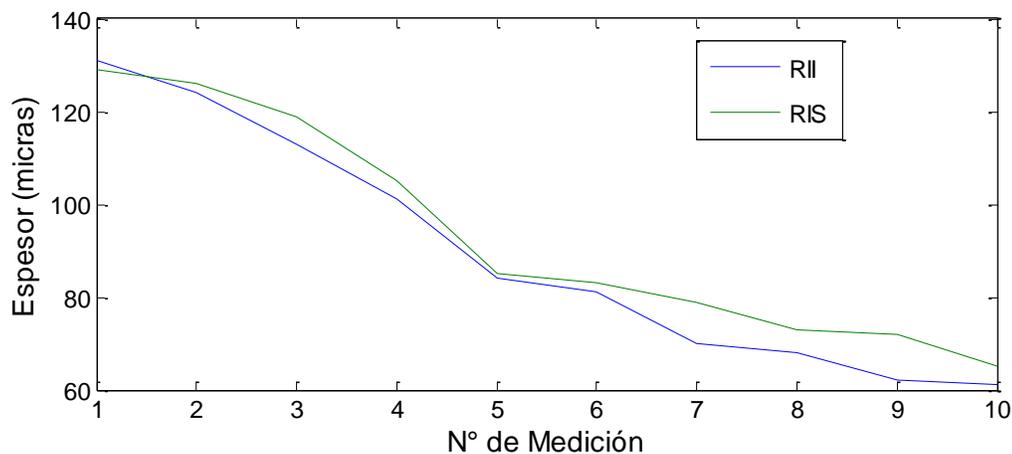
Figura 44. Comportamiento del espesor al deformar la película plástica en diferentes puntos del material



A manera general, los resultados previos indican que no es posible atribuir el comportamiento de la respuesta mecánica a la deformación, a un punto en específico del material; pues este tipo de pruebas sólo hablan del comportamiento global del fenómeno, y tendrían que explorarse técnicas de análisis locales para correlacionar este tipo de resultados.

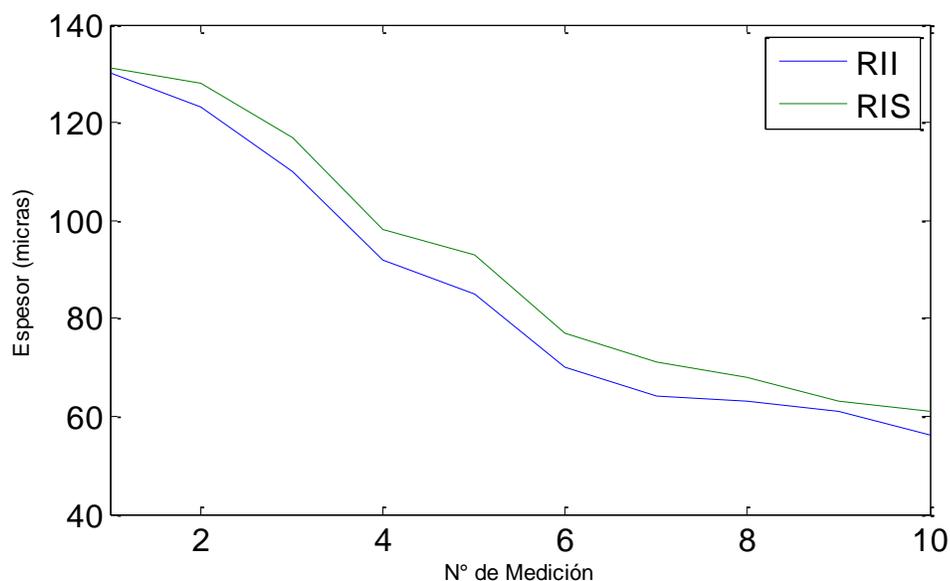
En cuanto al análisis del comportamiento temporal del espesor, las dos regiones de interés seleccionadas en cada tipo de probetas mostraron que el material se adelgaza durante la deformación. La Figura 45 muestra el comportamiento del espesor para cada una de las regiones de interés consideradas en la probeta MD. Allí, la región de interés superior alcanzó menos deformación que la región inferior. Donde se alcanzó un espesor mínimo de 0.064 mm.

Figura 45. Medición de espesor en las regiones de interés durante la deformación en MD.



En el caso de la probeta deformada en TD, La Figura 46. Muestra el comportamiento del espesor para cada una de las regiones de interés consideradas en la probeta. En este caso, la región de interés superior alcanzó menos deformación que la región inferior. Donde se alcanzó un espesor mínimo.

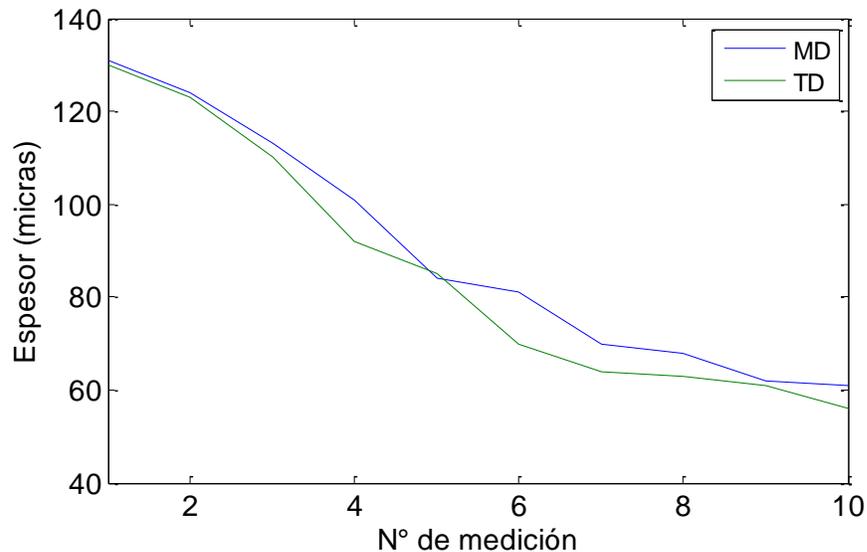
Figura 46. Medición de espesor en las regiones de interés durante la deformación en TD.



La comparación del comportamiento temporal del espesor para los dos tipos de probetas es presentada en la Figura 47. Donde a simple vista se observa que la deformación en MD resiste menos adelgazamiento que la deformación en TD, resultado que coincide con la

cantidad de elongación de las probetas y con el resultado de la prueba de tensión donde la película exhibe mayor deformación en TD antes de llegar al punto de rotura.

Figura 47. Resultado de las mediciones de espesor en MD y TD



3.2 Comportamiento espectral

3.2.1 Selección de la fuente de iluminación

Para la caracterización del montaje óptico primero se analizó las variaciones de diferentes fuentes de luz por medio del material plástico. Las fuentes utilizadas fueron:

Tabla 5. Fuentes analizadas para selección de la más adecuada para el experimento propuesto

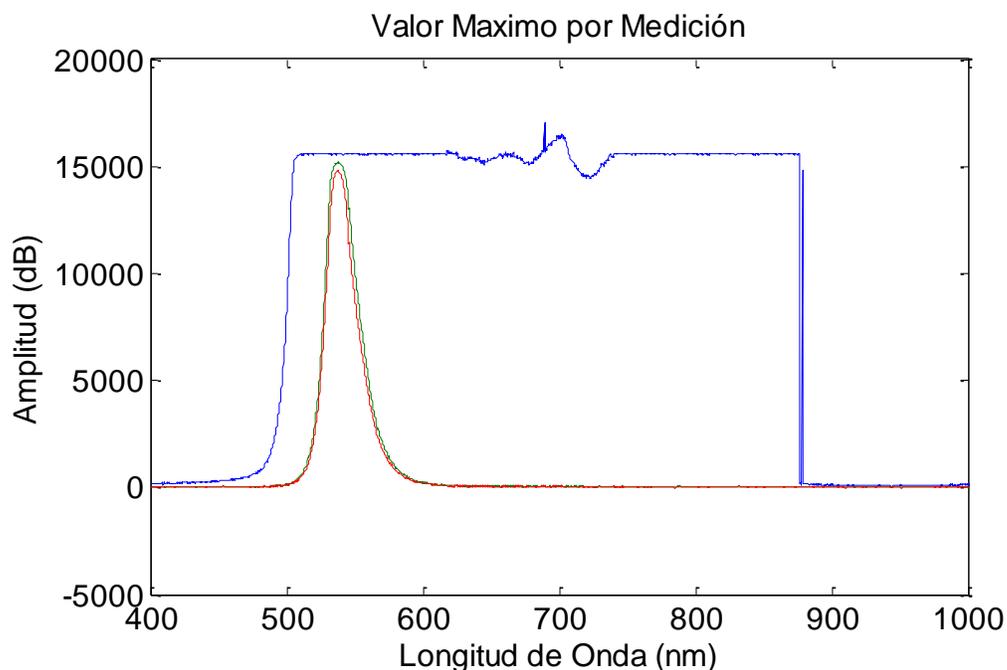
| Fuente | Longitud de onda |
|--|------------------|
| LED infrarrojos | 835,5nm y 950nm |
| LED luz normal verde | 540nm |
| Laser | 645nm |
| Fuentes de luz Ocean Optics Halogen light source HL-2000 | 400-1000 nm |
| Laser Infrarrojo | 1300 y 1500nm |
| Fuente de luz Energetiq Laser Driven Light Source (LDLS) | 200-1000nm |

Inicialmente se realizó experimento con LED verde, e infrarrojos para observar variaciones en el espectro de luz transmitido. Con el LED verde la señal medida por el espectrómetro se saturó debido a la alta intensidad de esta y a la resolución del equipo.

Para dar solución al inconveniente de la saturación en ambos casos se reguló la entrada de voltaje que alimentaba al LED, esto se hizo de dos formas. La primera consistía en configurar un circuito serie entre la resistencia y el LED, creando un divisor de voltaje que disminuía la potencia eléctrica en el diodo, la segunda se realizó controlando el voltaje de entrada con una fuente regulada.

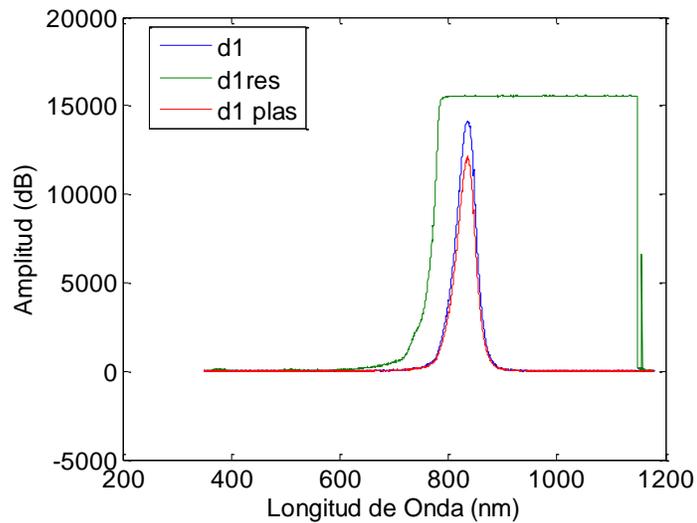
En la Figura 48 se puede observar la respuesta espectral del LED verde, sin el acondicionamiento del voltaje de alimentación, acondicionado y por último a través de la película plástica.

Figura 48. Gráfica de medición de intensidad de luz transmitida por LED infrarrojo a través del material plástico.



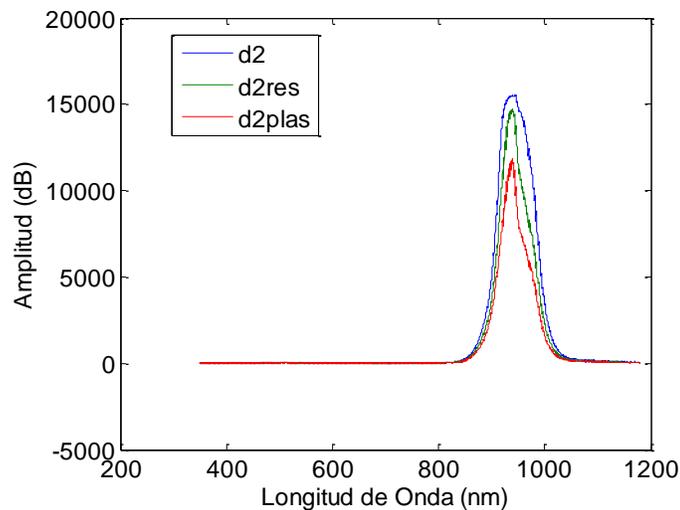
Este fenómeno también se presentó con la luz infrarroja debido a la amplitud máxima que toleraba el espectrómetro Aseq LR1. En la Figura 49, se puede observar la saturación de la señal con el LED infrarrojo, la señal acondicionada y a través de la película plástica.

Figura 49. Respuesta espectral de LED infrarrojo, regulado y a través de la película plástica.



También se realizó medición a través de la película plástica sumando diferentes muestras una sobre otra para replicar el efecto de incremento de espesor de la película plástica. Este proceso se realizó con el LED infrarrojo. Se acondicionó el voltaje de entrada al LED verde a 2,9 voltios para evitar el solapamiento de la señal, el espectro de luz obtenido se muestra en la Figura 50.

Figura 50. Resultados de la transmisión de luz del LED infrarrojo acondicionando el voltaje de alimentación de la fuente.



Luego de la realización de múltiples pruebas y de acondicionar las intensidades emitidas por las fuentes de luz para adecuarlas al instrumento de medición se procedió a realizar una prueba emulando el incremento del espesor a partir de la superposición de múltiples capas, donde cada capa corresponde a la película plástica en estudio, el esquema de esta prueba se puede observar en la Figura 51. Para esta prueba a medida que se aumentó el número de capas utilizadas en la medición, se observa disminución en la intensidad de luz transmitida. En la Figura 52, se puede observar la atenuación que mostró la intensidad de luz al incrementar el número de capas, utilizando como fuente de luz el LED infrarrojo con longitud de onda aproximada de 850 nm.

Cabe destacar que a medida que aumentó el número de capas con esta fuente de luz, el decremento se dio de forma irregular. En cada medición realizada se utilizó una resistencia de 220 ohmios y el voltaje fue suministrado por una fuente variable.

Figura 51. Emulación del Incremento de espesor superponiendo películas plásticas.

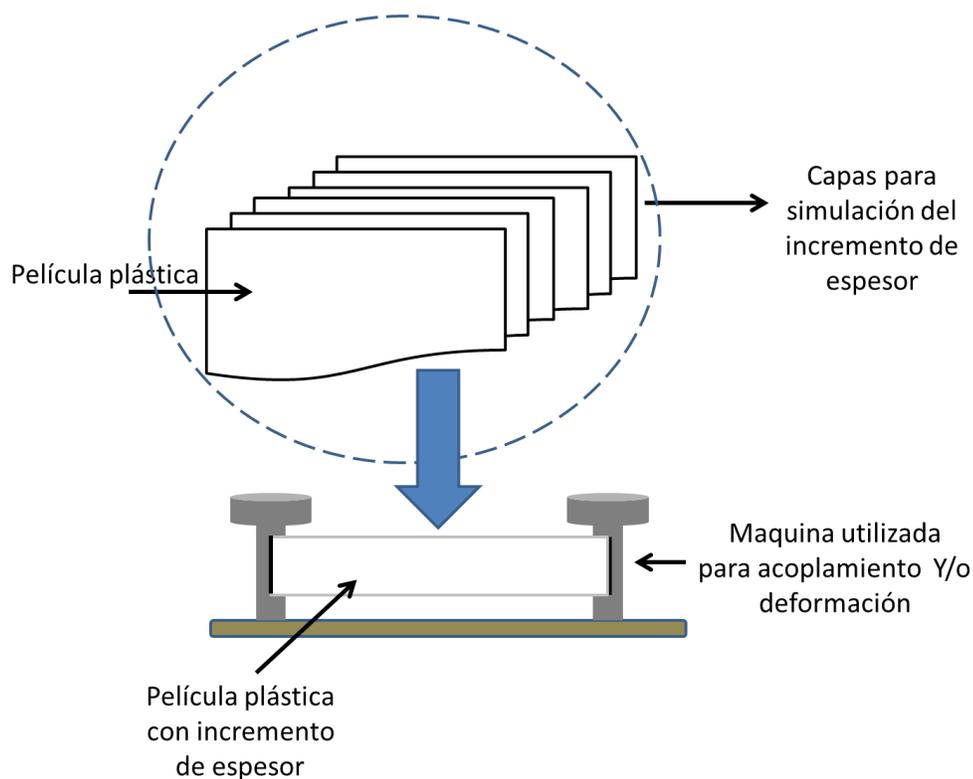
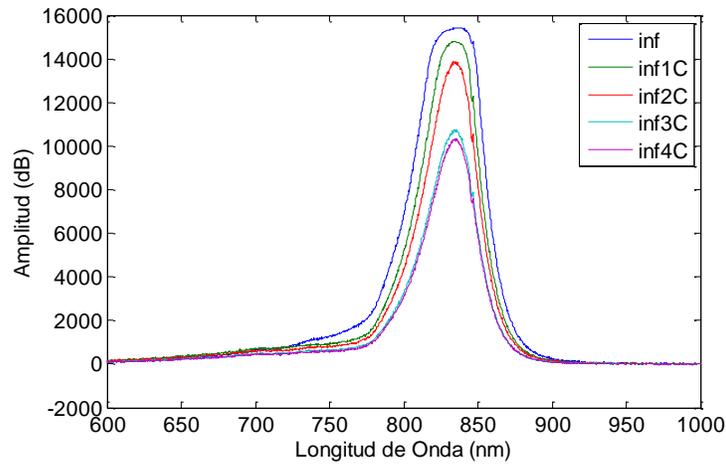
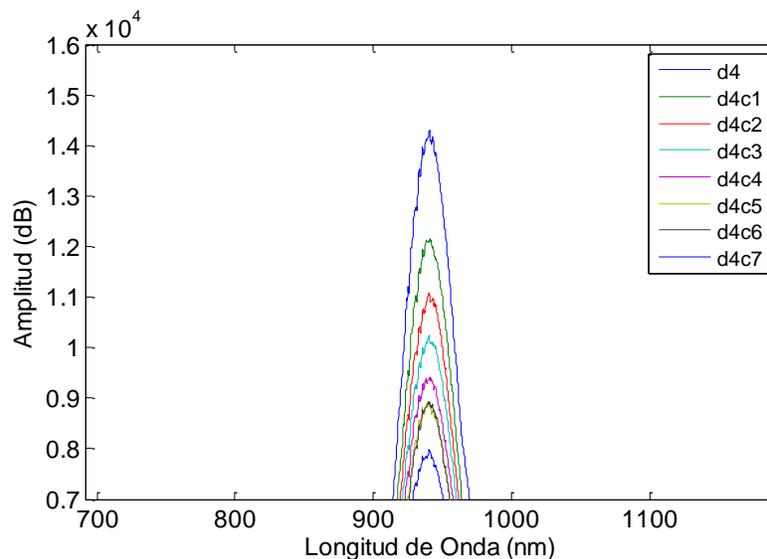


Figura 52. Resultados de la prueba con múltiples capas del material plástico utilizando infrarrojo.



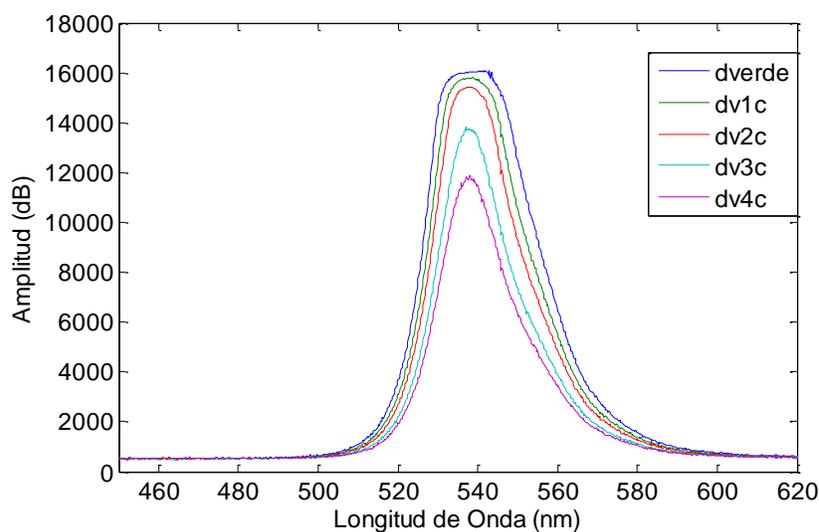
Al realizar la prueba con un LED infrarrojo de 950nm la cual se muestra en la Figura 53 el comportamiento del decremento de la intensidad se pudo observar hasta la 5 y 6 capa donde se solapan las señales, cabe resaltar que se varió el punto de medición a medida que se cambiaba el número de capas del montaje.

Figura 53. Respuesta al aumento de capas de fuente de luz LED infrarrojo con longitud de onda 950nm.



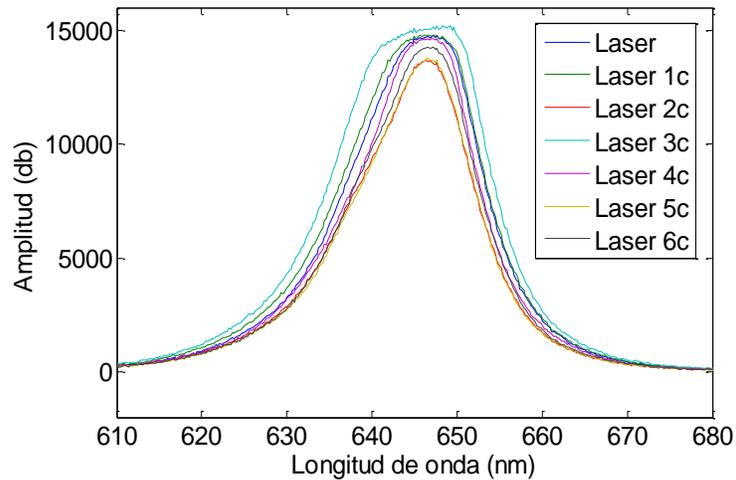
También se realizó la prueba con LED verde sobreponiendo capas. En la Figura 54, se puede observar el comportamiento de la intensidad de la luz a través de la película plástica a medida que se incrementaba el número de capas, en este caso se observó una disminución en la intensidad de luz transmitida a través del material a medida que se incrementó el número de capas de película plástica.

Figura 54. Respuesta al aumento de capas de fuente de luz LED verde con longitud de onda 540nm.



Al utilizar la fuente de laser rojo con una longitud de onda de 645nm para prueba multicapa se observó solapamiento de las señales el resultado se observa en la Figura 55, no hay proporcionalidad entre luz transmitida y numero de capas, el haz de luz al incidir se dispersa, esto se evidenció proyectando el haz de luz incidente sobre el material observando incoherencias en la luz transmitida. En la medición realizada con fuentes de iluminación de haz coherente, se observó variaciones en la intensidad medida directamente de la fuente de iluminación, esto permite suponer que hay inestabilidad en la intensidad emitida por parte de esta fuente luminosa.

Figura 55. Respuesta al aumento de capas de fuente de laser rojo con longitud de onda 645nm



Luego se realizó la prueba con dos fuente de luz láser en el infrarrojo una con longitud de onda en 1311 nm y la otra con longitud de onda de 1549.6nm, en estas fuente las mediciones de intensidad de luz transmitida de forma directa se observan en la Figura 56 y en la en la Figura 57. En ambos casos se realizó la medición directa de la fuente de iluminación al espectrómetro. En ambos casos se observó una gran inestabilidad en el láser infrarrojo, la intensidad varía en todo el ancho de su espectro.

Figura 56. Variaciones de la intensidad de luz en fuente laser con longitud de onda 1500nm directamente con espectrómetro.

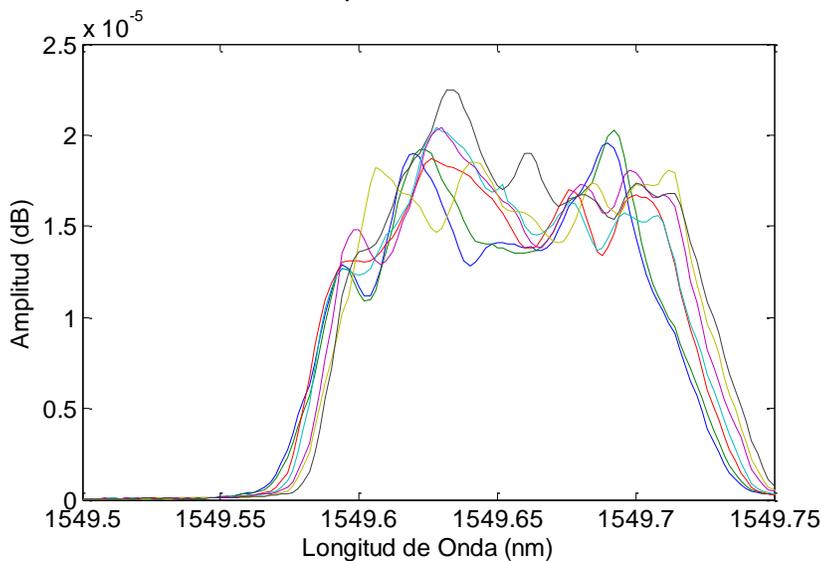
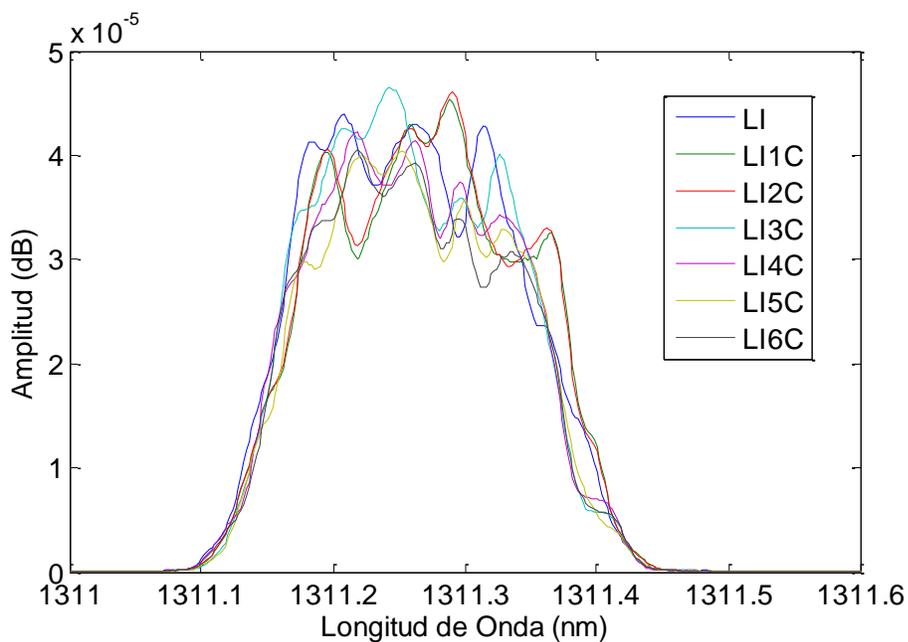


Figura 57. Respuesta al aumento de capas de fuente de laser infrarrojo con longitud de onda 1311nm.



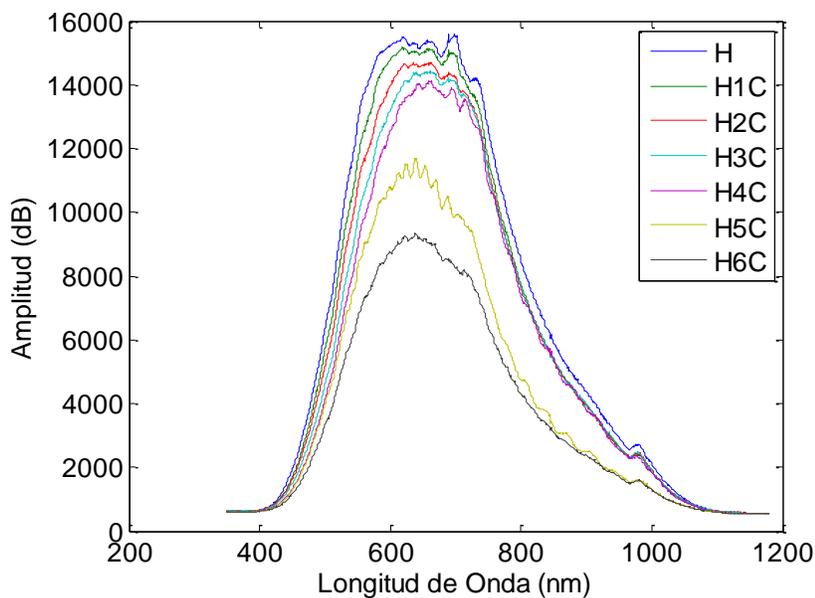
Esto se repitió con el láser de longitud de onda 1500nm, fue necesario utilizar el espectrómetro AQ6370B 600-1700nm debido a la longitud de onda en la que funcionaban las fuentes laser infrarrojas utilizadas. Por lo observado en las fuentes laser se descartó

su utilización debido a la inestabilidad en cuanto a la intensidad de luz que transmiten y por el comportamiento mostrado con las múltiples capas.

Con la fuente de luz Ocean Optics Halogen light source HL-2000 nm se observó atenuación en la amplitud del espectro al colocar la película plástica. Al realizar la medición multicapa con esta fuente de luz y al variar el punto donde fue realizada la medición se observó que normalmente hubo disminución en el valor de la amplitud esto se observa en la Figura 58.

La Fuente de luz Ocean Optics Halogen light source HL-2000nm también maneja un ancho espectro en función a la longitud de onda, es constante en cuanto a la intensidad de luz emitida, sin embargo le falta mayor potencia para excitar el receptor óptico del espectrómetro yokogawa AQ6373B ya que la intensidad se ve atenuada debido al montaje óptico utilizado para la captura de los espectros durante la deformación.

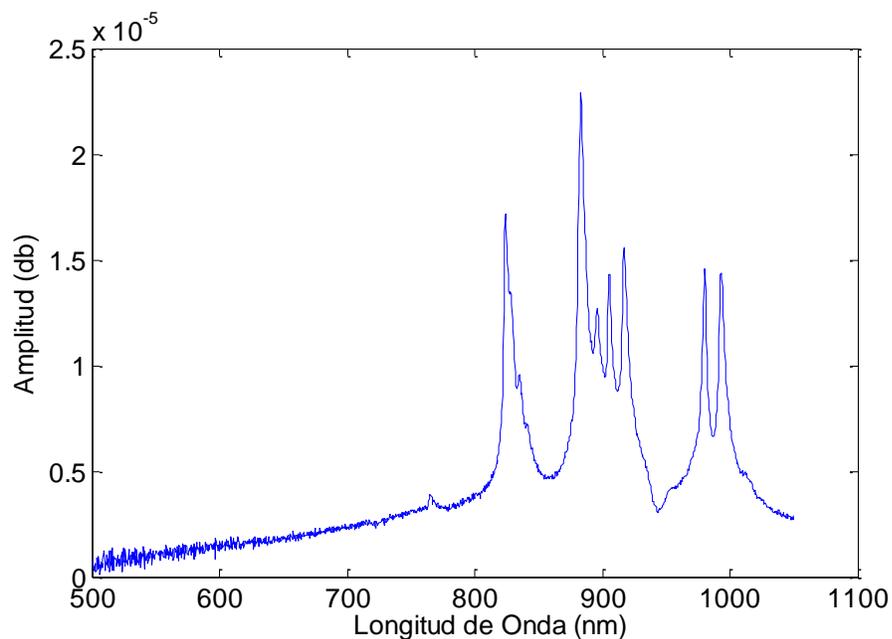
Figura 58. Respuesta de la intensidad de Fuente de luz Ocean Optics Halogen light source HL-2000 debido al incremento de las capas por la que se transmite la luz.



Para mejorar el experimento y observando que el material plástico atenúa el valor espectral en el espectro visible y en el infrarrojo cercano se decide utilizar una fuente de luz que este en este rango, la cual sea lo más estable posible y con sistema de ventilación y regulación de voltaje utilizando técnicas de control regulatorio además con un amplio rango de

longitud de onda inicialmente se trabajó con la fuente de luz Ocean Optics Halogen light source HL-2000, pero luego se tuvo acceso a la fuente de luz Energetiq Laser Driven Light Source (LDLS). Esta fuente nos proporcionó una mayor Potencia, necesaria por las pérdidas producidas por los acoples con fibra óptica necesarios para el diseño del montaje tiene un sistema de ventilación y utiliza un control PID para regular la fuente de luz además maneja un espectro de luz de los 200 a 1400nm, el espectro de esta fuente se puede observar en la Figura 59 en un rango de 600 a 1000nm. Siendo estos los parámetros dados para elegir la fuente de iluminación en la metodología propuesta (van Nijnatten, 2009)(Salzberg et al., 2005).

Figura 59. Espectro de fuente de luz seleccionada en el rango de 500 a 1050nm utilizando el montaje de deformación



3.3 Resultados de medición espectral durante la deformación de la película plástica multicapa.

Para la medición de la transmitancia se utilizó el montaje propuesta en la metodología, capítulo 2. Se utilizó la intensidad de luz medida directamente del acople con fibra óptica para la estabilidad del montaje, y se deformó la película plástica de forma secuencial, en distancias aproximadas de 0,5cm, 1cm, 3cm y en algunas pruebas hasta 30 cm directamente para observar cambios en el espectro transmitido a través de la película plástica. Cada espectro fue capturado después de la deformación de la película, generalmente se repetía el experimento hasta que la película se deformara dado el caso hasta un 300% de su longitud inicial.

Las figuras 60 y 61 muestran el comportamiento de la transmitancia de la luz cuando el material es deformado en (DM) y (TM) respectivamente, como se puede observar no es proporcional el comportamiento de la transmitancia con respecto a la disminución del espesor. (Ishikawa, Yamano, Asada, Iwata, & Ueda, 2004). Como el volumen de la película plástica es constante, al aumentar el área de la película plástica por la deformación mecánica disminuye el espesor, sin embargo el resultado temporal mostrado por el espectro de luz transmitido permite ver las fluctuaciones del espectro de luz transmitido, sin ningún patrón de comportamiento evidentemente proporcional a la disminución del espesor, en las gráficas de transmitancia la transmitancia máxima corresponde a la intensidad máxima medida por el espectrómetro en todo el rango de longitud de onda analizado de la fuente de luz y la sumatoria corresponde al área bajo la curva del espectro de luz en función de la longitud de onda.

Figura 60. Resultados de la máxima intensidad transmitida durante la deformación de una muestra (DM) de película plástica.

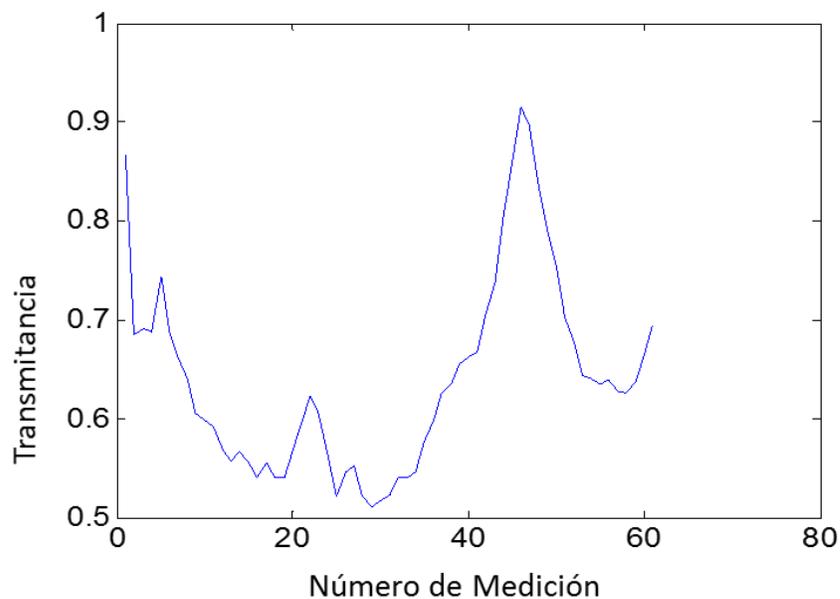
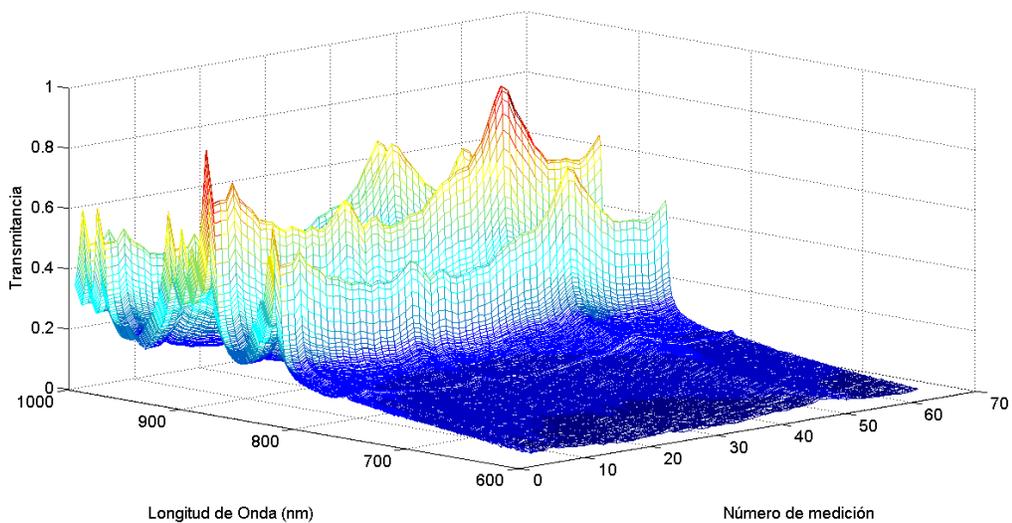


Figura 61. Gráfica del comportamiento de la transmitancia en relación a la deformación del material (DM).



En las figuras 61 y 63 se observa el comportamiento de todo el espectro de la fuente de iluminación seleccionada durante el proceso de deformación. En la Figura 62 se puede observar lo poco coherente del espectro durante el proceso de deformación.

Figura 62. Resultados de la máxima intensidad transmitida durante la deformación de una muestra (TM) de película plástica.

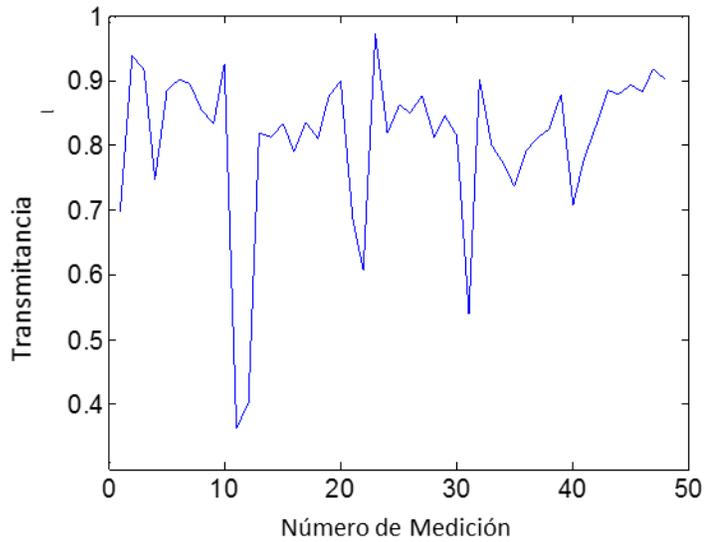
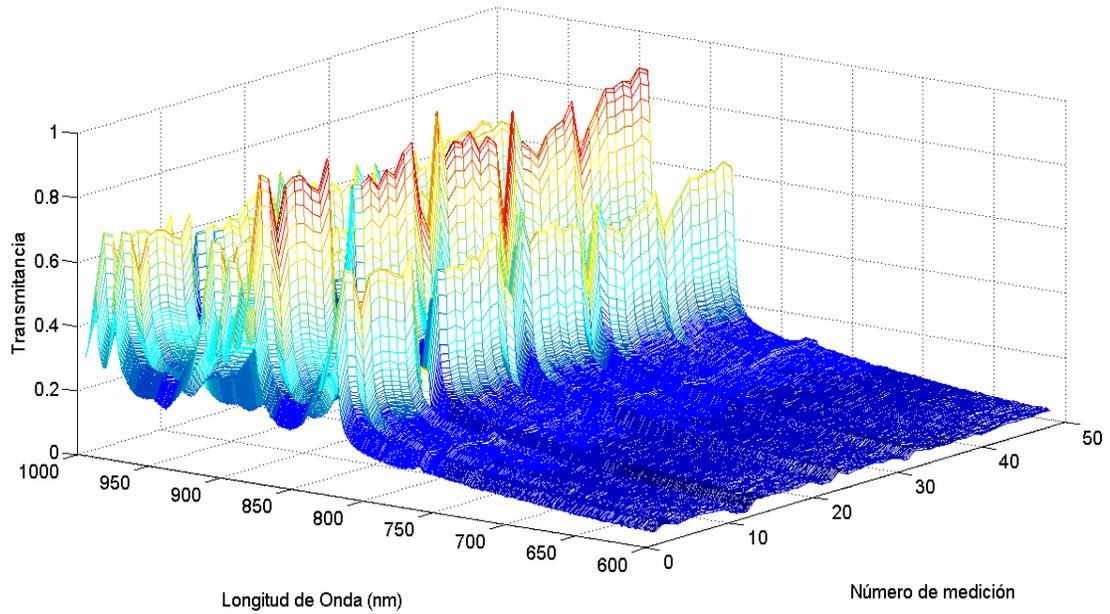


Figura 63. Gráfica del comportamiento de la transmittancia en relación a la deformación del material (TM)

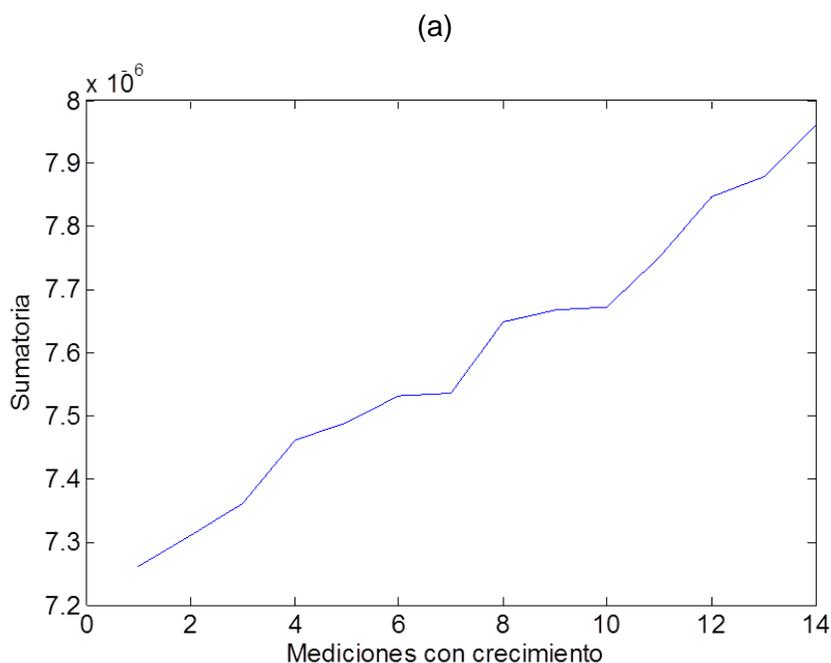


En las Figuras 61 y 63, (DM) y (TM) se observa como varía el espectro de luz transmitido durante el proceso de deformación.

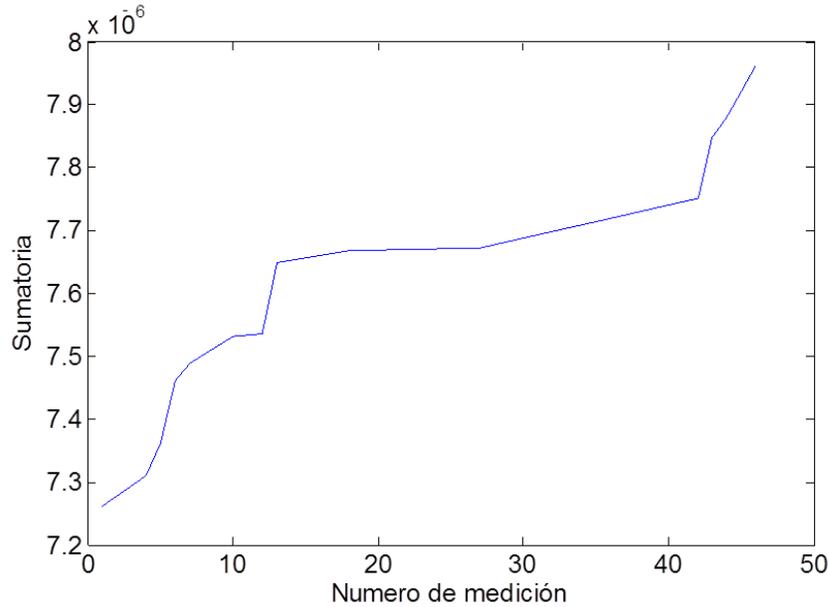
Tratando de analizar este inconveniente se realizaron 2 tareas, identificar que espectros incrementaban su intensidad transmitida a medida que la película plástica se deformaba, en la Figura 64 se observan los espectros donde hubo crecimientos a partir del área bajo la curva de cada medición; para este caso se encontraron incrementos en 14 medidas, cabe destacar que en todas las mediciones la tendencia de los espectros transmitidos durante la deformación mostro pendiente positiva.

En la Figura 64 (a) se observa como el espectro fue incrementando a medida que el material se deformaba, En la Figura 64 (b) se observa la dimensión real de la medición en el tiempo en el que se obtuvo el incremento de la intensidad de luz transmitida a través de la película plástica estudiada.

Figura 64. Gráfica de los incremento en la transmitancia de la luz durante la prueba.



(b)



La Tabla 6 contiene los valores en los cuales el espectro de luz transmitida incremento a medida que se deformaba la película plástica dándonos el registro de la medición donde se tubo el incremento.

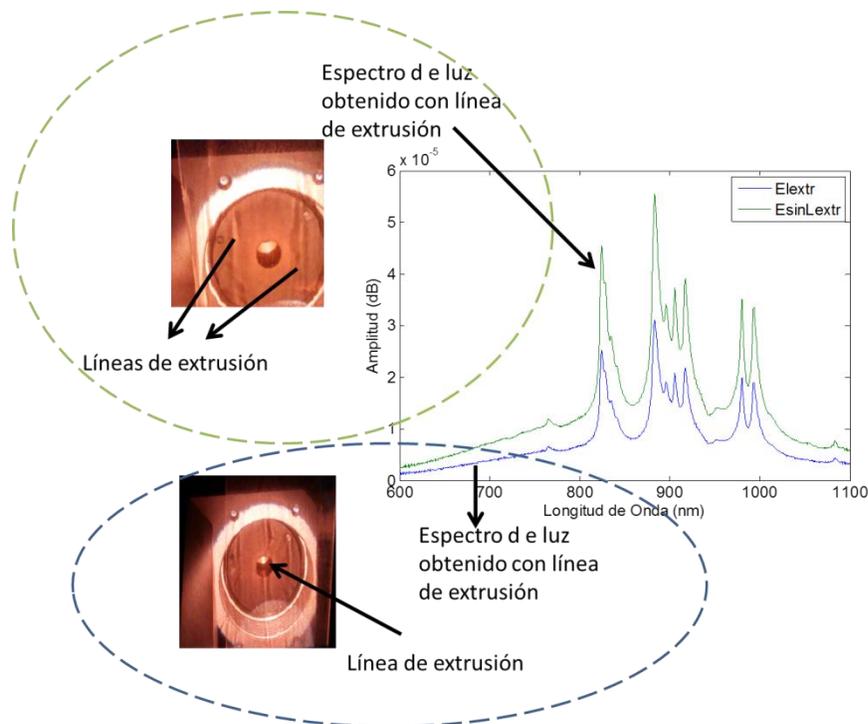
Tabla 6. Datos de número de medición y valor del área bajo la curva de los espectros crecientes.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|
| Sumatoria | 7,2 6 E- 6 | 7,30 E-6 | 7,36 E-6 | 7,46 E-6 | 7,48 E-6 | 7,53 E-6 | 7,54 E-6 | 7,64 E-6 | 7,66 E-6 | 7,67 E-6 | 7,75 E-6 | 7,8 4 E- 6 | 7,88 E-6 | 7,96 E-6 |
| Medición | 1 | 4 | 5 | 6 | 7 | 10 | 12 | 13 | 18 | 27 | 42 | 43 | 44 | 46 |

Cabe destacar que otro valor que arrojó un resultado similar sobre el comportamiento espectral es el máximo valor de intensidad de cada espectro (pico de cada espectro)

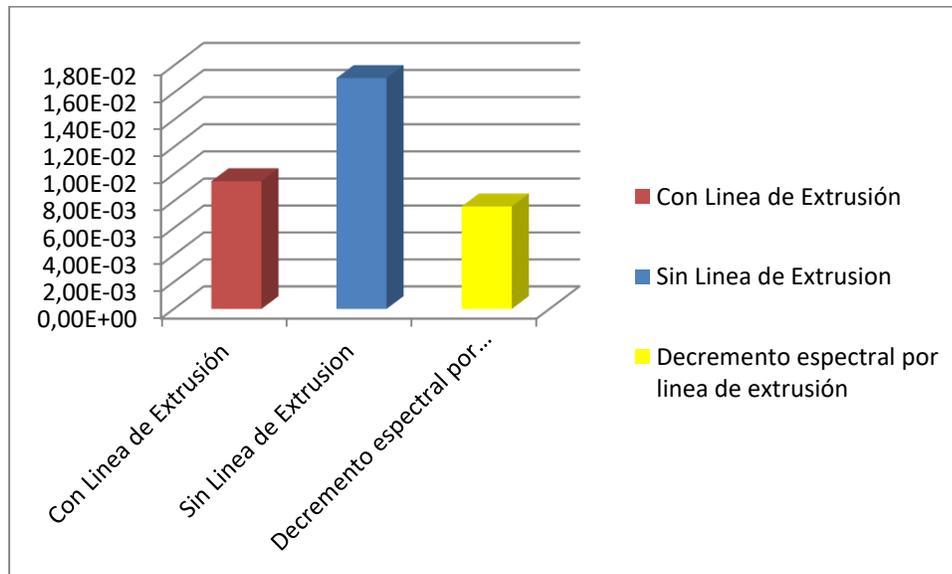
Analizando minuciosamente los cambios en la intensidad se pudieron identificar unos elementos en la película plástica que generaban cambios abruptos en su valor, estos son las líneas de extrusión del material que se generan durante el proceso de fabricación la película plástica. En la Figura 65 se muestra como el espectro de luz disminuye cuando una línea de extrusión se ubica sobre el orificio del acoplador de fibra óptica.

Figura 65. Efectos de las líneas de extrusión en la intensidad de la luz transmitida.



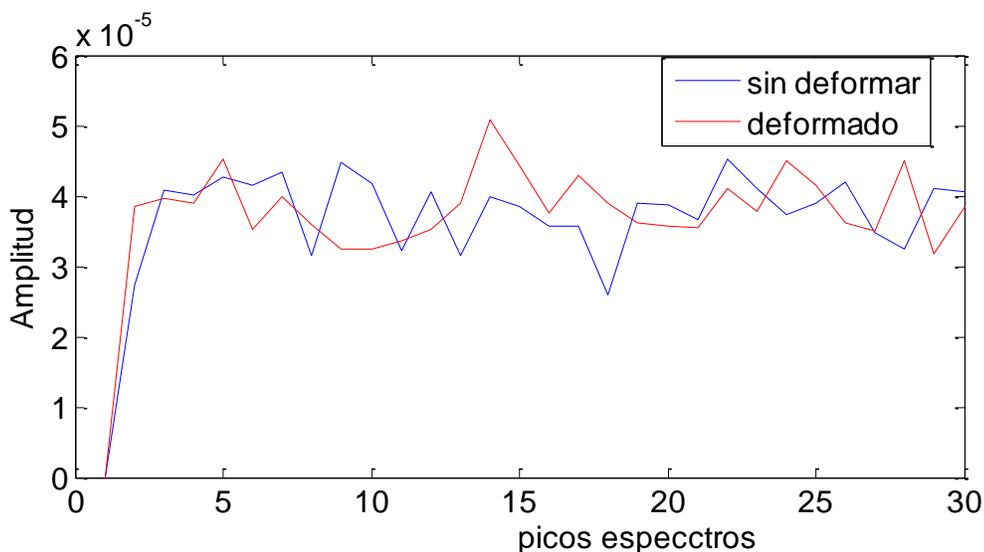
En la Figura 66 se observa que la línea de extrusión genera una disminución del área espectral transmitida, para este caso fue del 44.52%. Es de destacar el cambio que generan en la intensidad, esta es una de las razones por las cuales el valor del espectro de luz transmitido baja y sube su intensidad.

Figura 66. Representación del decremento del espectro que generan las líneas de extrusión



El otro experimento, realizado para y tratar de identificar el comportamiento de la intensidad de la luz durante la deformación, consistió en deforme película longitudinal y transversalmente aproximadamente 250% de su longitud, este experimento se realizó 5 veces en cada tipo de muestra y se midieron 30 espectros sobre la película antes y 30 después de deformada, los resultados se muestran en la Figura 67. Para este caso se observa que en algunas mediciones del espectro en el material deformado la intensidad es mayor a cualquiera de las mediciones obtenidas cuando no se ha deformado el material. Lo que permite suponer que existe una relación entre la intensidad y el espesor, sin embargo hay valores que no muestran ninguna proporción, cuando la película plástica sobrepasa la longitud deformada a un 250% inicia un proceso de opacidad sobre la superficie de la película, se empieza a tornar blanca y pierde su transparencia, esto evidencia disminución en la intensidad de luz transmitida, sin embargo se puede suponer que en esta gráfica el máximo espectro de luz transmitida lo alcanzó en una medición cuando el punto donde se realizó la medida no era opaco, esto debido a la no uniformidad en la deformación de la película plástica.

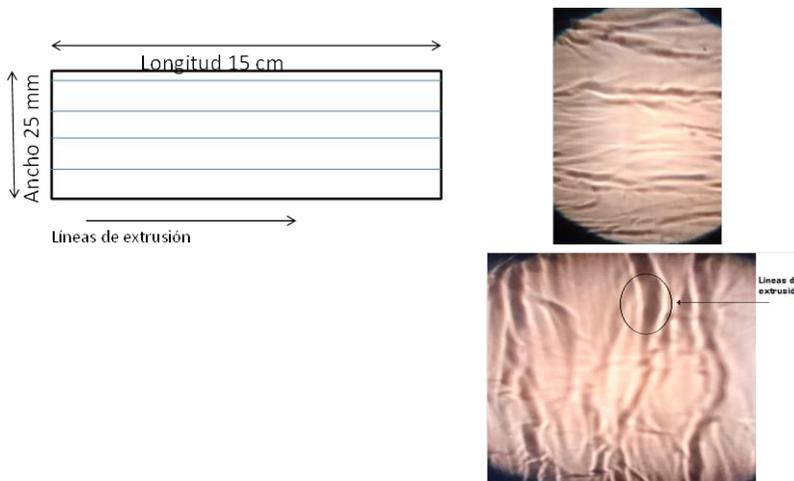
Figura 67. Gráfico de intensidad de la luz del material deformado vs no deformado



La opacidad del material se da debido al reordenamiento interno que sufren las moléculas que lo componen (Mano, Lanceros Mendez, & Costa, 2001).

En la Figura 68 podemos ver la cantidad de líneas de extrusión presentes sobre el material en las 2 direcciones de deformación.

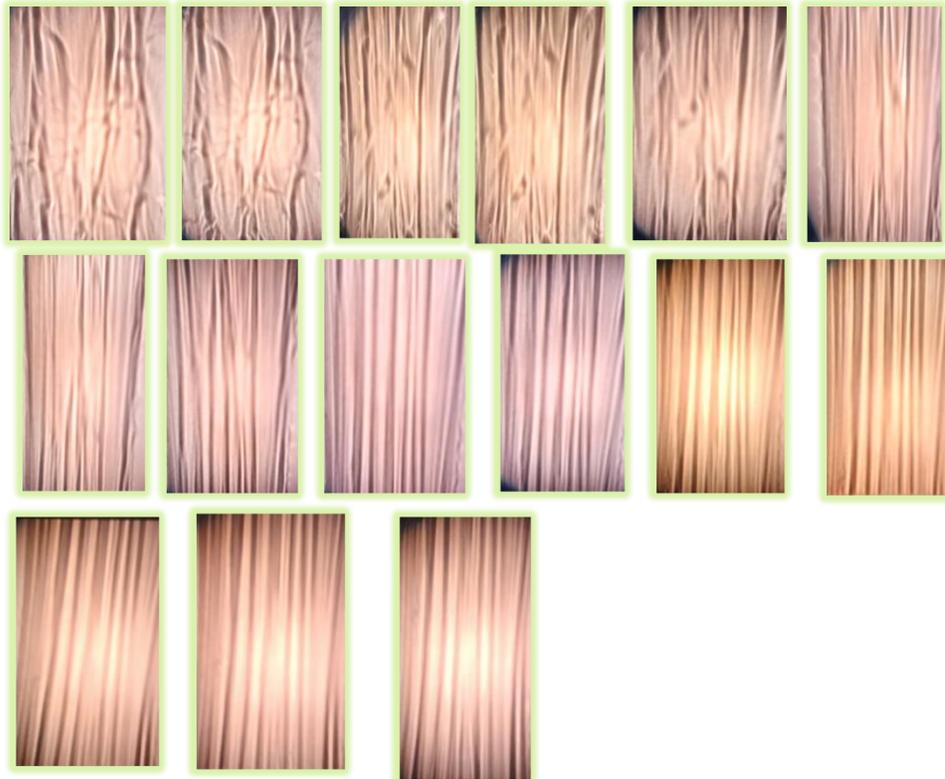
Figura 68. Imagen que muestra las Líneas de extrusión de la película plástica en muestras cortadas en DM y TM.



El comportamiento de las líneas de extrusión impide medir el material sin presencia de ellas cuando el material se deforma longitudinalmente como se muestra en la Figura 69. Se puede ver que a medida que se deforma la película la medición tiene una mayor

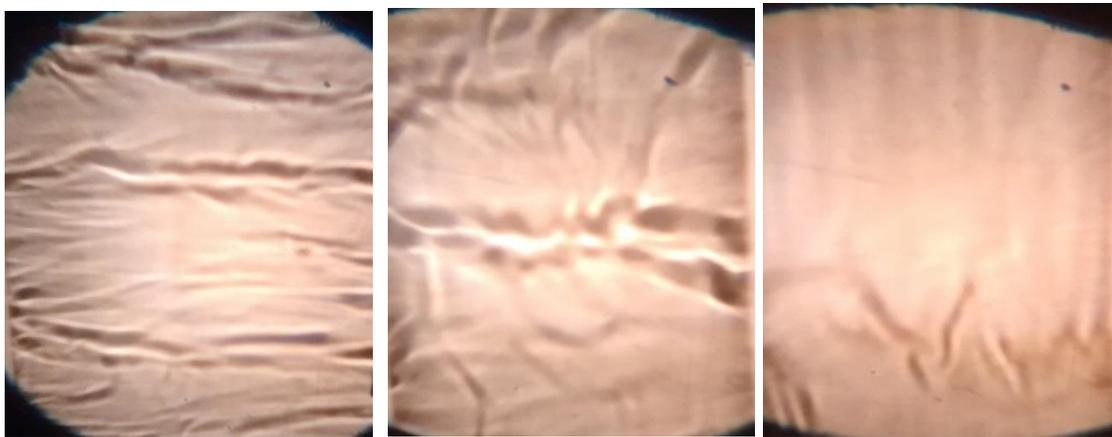
probabilidad de estar asociada a una línea de extrusión, las rugosidades en una medición óptica de transmisión de la luz genera variación en los resultados (Pe, Larena, & Milla, 2002).

Figura 69. Comportamiento de las líneas de extrusión durante la deformación de la muestra en (MD).



En la Figura 70, se muestra el comportamiento de las líneas de extrusión cuando la muestra está cortada en (TM) a diferencia de (MD) cuando es cortada transversalmente se separan las líneas de extrusión y esto permite encontrar secciones en la película donde no interfieren la líneas de extrusión en la medición, esto puede indicar que la TM es la mejor elección para medir el espectro en búsquedas de evadir el efecto de las líneas de extrusión.

Figura 70. Comportamiento de las líneas de extrusión durante la deformación de la muestra en (TM).

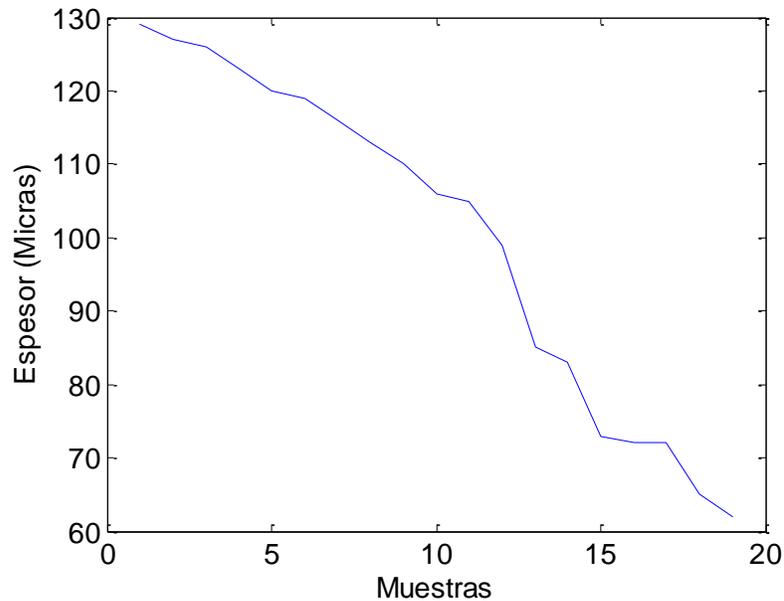


3.4 Correlación de espesor con transmitancia de la luz.

Para la correlación se utilizaron los datos obtenidos mecánicamente con el tornillo micrométrico del espesor del material durante la deformación y los resultados obtenidos del espectro de luz transmitido en el punto donde se midió el espesor. En la figura 71 se observa la tendencia a disminuir del espesor cuando la película plástica es deformada, para la obtención de los datos de la correlación se controló el punto donde se realizó la medición para evitar al máximo el contacto directo con una línea de extrusión para la medida espectral y la mecánica.

La probeta utilizada fue cortada en TD por las ventajas de separación de las líneas de extrusión haciendo más fácil la toma del espectro. Aparte se tomaban 10 espectros alrededor del punto donde se hacían las mediciones y se procedió a seleccionar el espectro con mayor intensidad transmitida, en cada caso. Se deformó el material en 18 ocasiones y se tomaba el valor del espesor en cada punto. Como el valor del espesor es básicamente igual alrededor de un punto el valor de los espectros medidos es muy parecido generalmente. Esto se hizo con el fin de eliminar el efecto de las líneas de extrusión del material y las pequeñas variaciones de espesor en puntos cercanos.

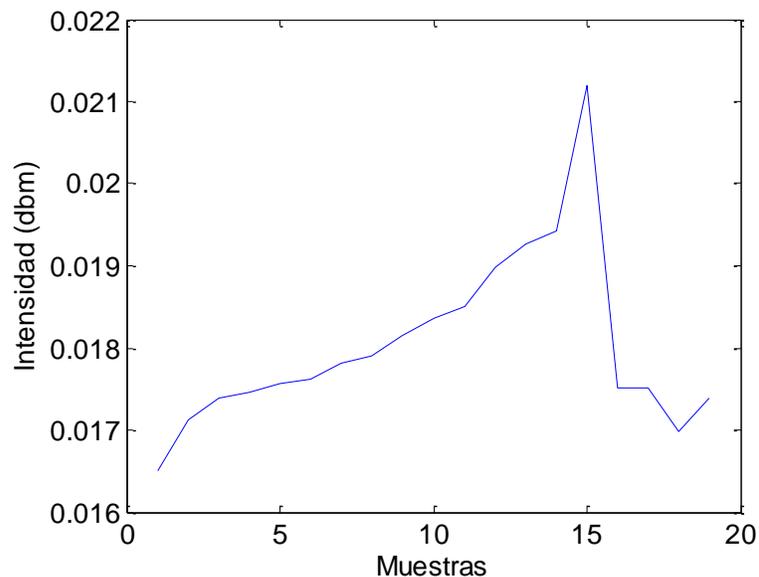
Figura 71. Disminución del espesor durante la deformación de la película plástica.



El resultado de la intensidad de la luz acumulada en las diferentes longitudes de onda se muestra en la Figura 72.

Analizando los resultados de la Figura 72. Se observa que el comportamiento del espectro acumulado en las diferentes longitudes de onda incrementa a medida que disminuye el espesor, este crecimiento se ve interrumpido cuando la deformación alcanza un incremento de aproximadamente un 200% la longitud inicial de la película plástica, luego de eso la intensidad de luz transmitida empieza a disminuir inclusive después de aumentar la deformación en un 300% de su longitud inicial la película se torna totalmente opaca. Este fenómeno se presenta en los polímeros por la reestructuración molecular en el sentido del esfuerzo aplicado, el cual se mencionó en el apartado anterior.

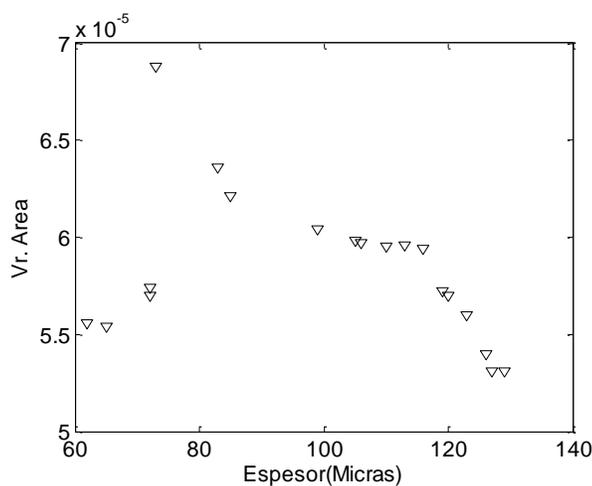
Figura 72. Área bajo la curva de los espectros tomados durante la deformación de la película plástica en el punto donde se adquirieron los espesores.



Como resultado de este fenómeno, el incremento en la intensidad se dio en las primeras 15 mediciones, luego tuvo un notable decremento en la transmitancia ya que en este punto de la deformación el material se tornó opaco.

La Figura 73 nos muestra el comportamiento que existe entre el espesor del material plástico y el área del espectro de luz transmitido, evidenciando una proporcionalidad inversa entre ellos, hasta que el espesor del material llega aproximadamente a 78 micrómetros.

Figura 73. Resultados de la relación existente entre el espesor de la película plástica y el área de la intensidad espectral durante la deformación.

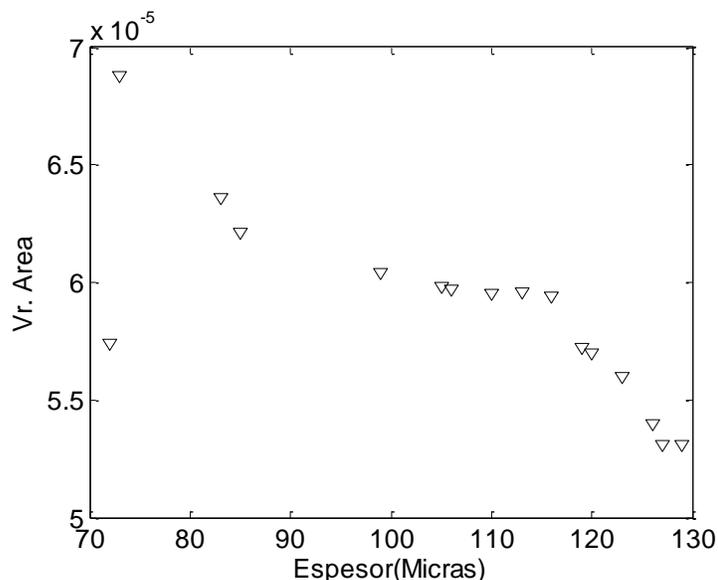


Cuando el material plástico inicia el proceso de deformación y a medida que disminuye el espesor del material la película plástica permite incrementos en la transmitancia de la luz, como se puede observar en la Figura 72. Se puede decir que son inversamente proporcionales en la primera parte de la deformación cuando mecánicamente el material todavía muestra un comportamiento elástico. En la Figura 73 podemos ver el comportamiento inversamente proporcional que muestran la intensidad del espectro de luz transmitido y el espesor de la película plástica hasta que el espesor de la película disminuye a aproximadamente 80 micras, esto se presenta hasta cierto instante de la deformación cuando el espesor de la película a disminuido aproximadamente un 40%. es decir utilizando 16 datos este resultado se observa en la Figura 74.

Realizando una correlación lineal se obtuvo un resultado de -0.3410 con todos los datos almacenados. Estos datos son los datos mostrados en la figura 72, linealmente son inversamente proporcionales pero su correlación es muy baja, esta afirmación se hace teniendo en cuenta que la correlación va de 0 a ± 1 . Donde el signo representa la proporcionalidad y el número indica que tanta relación existe entre los datos correlacionados.

Luego se realizó una segunda correlación entre intensidad de luz transmitida excluyendo los datos cuando el espesor ha disminuido más del 40% de su valor inicial como se muestra en la Figura 74. En esta los valores del total de la amplitud del espectro de luz transmitido que disminuyeron a medida que el espesor disminuyo se excluyeron de la medición, realizando una correlación lineal con los 16 datos mostrados en la Figura 74 se obtuvo un resultado de -0.759 con todos los datos almacenados. Mejorando la descripción entre espesor e intensidad transmitida.

Figura 74. Relación entre espesor e intensidad transmitida cuando el espesor ha disminuido aproximadamente un 40% de su espesor original.



Por último se excluyó la medición 16 de la muestra, es decir se utilizaron espesores entre 75 μm y 130 μm dando como resultado una correlación muy alta entre espesor e intensidad de luz transmitida, con un valor de -0.9668 .

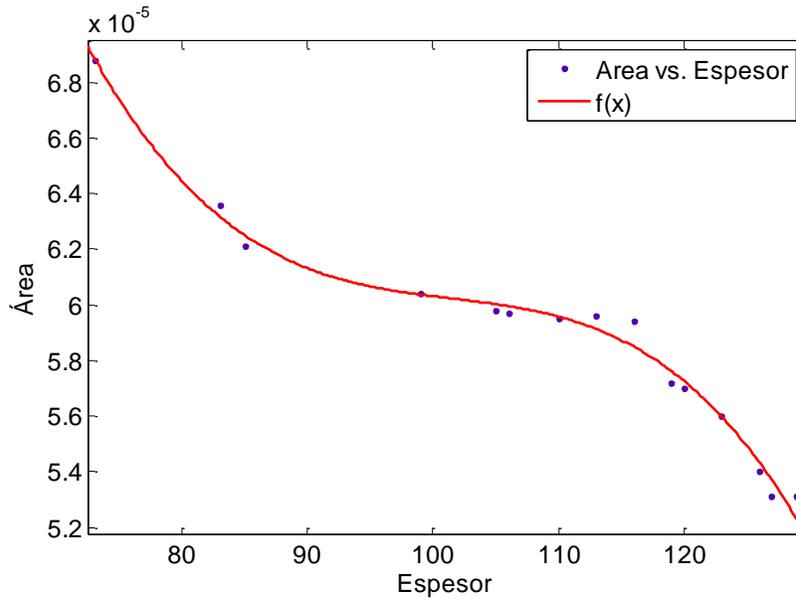
Para validar esta correlación se utilizó la toolbox de matlab curve fitting esta herramienta genera funciones que relacionen datos de diferentes características, para este trabajo se tomó un sistema de tercer orden para representar esta relación mostrada en (17), genero los cuatro coeficientes p_1 , p_2 , p_3 , p_4 .

$$f(x) = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4 \quad (17)$$

$$p_1 = -3.068e-010 \quad p_2 = 9.338e-008 \quad p_3 = -9.528e-006 \quad p_4 = 0.000386$$

En la figura 75 se puede observar como este modelo de orden 3 es una buena opción para dar respuesta al comportamiento existente entre el espesor y el espectro de luz transmitido, se asemeja mucho el resultado experimental.

Figura 75. Representación gráfica del modelo generado por la toolbox cftool a partir del espesor y espectros obtenidos durante la deformación.



En la Tabla 7 se muestra el resultado obtenido experimental con respecto al resultado generado por el modelo de tercer orden, mostrando que el espectro de luz transmitido es una buena alternativa para dar respuesta a cambios físicos de las películas plásticas multicapa, teniendo en cuenta los procedimientos y restricciones propuestos en este trabajo.

Tabla 7. Tabla comparativa entre el modelo de tercer orden y los resultados experimentales

| Espesor | f(x) polinomio de tercer orden | Medición Experimental |
|----------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 129 | 5.23204E-05 | 5.31E-05 |
| 127 | 5.37261E-05 | 5.31E-05 |
| 126 | 5.43575E-05 | 5.40E-05 |
| 123 | 5.5988E-05 | 5.60E-05 |
| 120 | 5.72616E-05 | 5.70E-05 |
| 119 | 5.76154E-05 | 5.72E-05 |
| 116 | 5.84904E-05 | 5.94E-05 |
| 113 | 5.91244E-05 | 5.96E-05 |
| 110 | 5.95672E-05 | 5.95E-05 |
| 106 | 5.9946E-05 | 5.97E-05 |
| 105 | 6.00152E-05 | 5.98E-05 |
| 99 | 6.03576E-05 | 6.04E-05 |
| 85 | 6.2477E-05 | 6.21E-05 |
| 83 | 6.31466E-05 | 6.36E-05 |
| 73 | 6.88276E-05 | 6.88E-05 |

4. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En cuanto a la respuesta mecánica del material plástico se pudo determinar diferencias en el comportamiento MD y TD. En MD la película plástica muestra un mayor oposición a la deformación otro dato interesante es que en TD la película plástica alcanza un menor espesor y alcanza una mayor longitud su deformación longitudinal.

La deformación de las películas plásticas en una máquina universal es heterogénea con respecto al espesor de la película, es decir al deformarse el espesor es diferente en diferentes partes de la película, sin embargo esta diferencia se hace más notoria en puntos que están alejados longitudinalmente, como las distancias transversales no sobrepasan los 25mm aquí las variaciones de espesor son muy pequeñas esto permite concluir que las mediciones de espesor horizontal sobre la película son más homogéneas que las verticales

Las fuentes de luz en el rango visible y de radiación normal resultan convenientes para este tipo de pruebas de transmitancia en películas plásticas multicapa transparentes ya que muestran un buen comportamiento temporal en cuanto a la intensidad lumínica que emiten y el material muestra respuestas coherentes a este tipo de iluminación.

Cuando se realizan cambios de espesor grandes como la superposición de películas plásticas se pudo determinar que este tipo de material plástico muestra respuestas espectrales que caracterizan cambios físicos en ella.

Existen elementos dentro del material plástico que dificultan la medición de los espectros coherentemente con respecto a la variación del espesor estos elementos son las líneas de extrusión estos elementos disminuyen de gran manera e irregularmente la intensidad de la luz transmitida sobre al material plástico analizado en este trabajo.

Las líneas de extrusión generan un problema que representa una gran dificultad para describir el material analizado, pero se puede evadir deformando muestras cortadas en dirección transversal a las líneas de extrusión y realizando varias mediciones cercanas sobre un mismo punto para tratar de evadir el efecto de las líneas de extrusión sobre el espectro transmitido.

La reducción del espesor durante la deformación de la película plástica puede ser asociada a la respuesta espectral del material, resaltando que la medida espectral tiene comportamiento irregular es decir no lineal; sin embargo existe un rango de deformación longitudinal donde se evidencia este comportamiento ya que pasada cierta longitud la

película sufre una reestructuración molecular y se torna opaca lo que trae como consecuencia caídas grandes en la intensidad de la luz transmitida. Por lo tanto se debe limitar el rango de deformación para la evaluación de las intensidades de luz transmitida en este tipo de pruebas.

La correlación de los esfuerzos en las películas plásticas brinda información global del comportamiento al esfuerzo de las películas plásticas, sin embargo al hacer una correlación entre los espectros de luz transmitida, la cual es una medida puntual de la película plástica y el esfuerzo en el instante que se realiza esa medición es incoherente, en cambio el espesor y la intensidad de luz transmitida si guardan relación y puede generarse una función en la cual se vea dependencia de estas variables en condiciones específicas.

A partir del espectro y con la metodología del experimento específicamente organizado es posible realizar el proceso de regresión inversa y obtener una muy buena aproximación del valor del espesor de la muestra plástica durante el proceso de deformación mecánica.

5. Bibliografía

- A.R. Astvatsurov, R. A. (1999). Spectrometric characteristics of polystyrene scintillation films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 516-521.
- Boujnah, M., Boumdyan, M., Naji, S., Benyoussef, A., El Kenz, A., & Loulidi, M. (2016). High efficiency of transmittance and electrical conductivity of v doped ZnO used in solar cells applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 671, 560–565. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.107>
- BRIÑEZ DE LEON, J. C., RESTREPO MARTÍNEZ, A., & LÓPEZ GIRALDO, F. E. (2012). MÉTRICAS DE SIMILITUD APLICADAS PARA ANÁLISIS DE IMÁGENES DE FOTOELASTICIDAD. *DYNA*.
- Briñez, J. C. (2013). *Caracterización de la deformación de películas plásticas mediante el estudio de patrones de interferencia de color producidos por la polarización de la luz, aplicando técnicas para el análisis digital de imagenes*. Medellín: ITM.
- Cárdenas, R., Alfonso, J., & Torres, J. (2003). Metodo para determinar las constantes opticas de películas delgadas que presentan bandas de absorción. *Revista Colombiana de Fisica*, 160-163.
- Chen, J. J., Lin, J. Der, & Sheu, L. J. (1999). Simultaneous measurement of spectral optical properties and thickness of an absorbing thin film on a substrate. *Thin Solid Films*, 354(1), 176–186. [http://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00530-1](http://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00530-1)
- Cisowski, J., Jarzabek, B., Jurusik, J., & Domanski, M. (2012). Direct determination of the refraction index normal dispersion for thin films of 3, 4, 9, 10-perylene tetracarboxylic dianhydride (PTCDA). *Optica Applicata*, 187-190.
- Davazoglou, D., Vasilopoulou, M., & Argitis, P. (1998). Optical characterisation of thin organic films by analysing transmission measurements with the Forouhi - Bloomer model. *Microelectronic Engineering*, 619-622.
- EDICIÓN), Ó. (. (2000). *Eugene Hecht*. Madrid: ADDISSON WESLEY IBEROAMERICANA.
- El-Zaiat, S. (2012). Determination of the complex refractive index of a thick slab material from its spectral reflectance and transmittance at normal incidence. *Elsevier*, 1-5.
- El-Zaiat, S. Y. (2013). Determination of the complex refractive index of a thick slab material from its spectral reflectance and transmittance at normal incidence. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 124(2), 157–161. <http://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.11.039>

- Fase, I. (1982). *Propiedades Ópticas*, 76–127.
- Gaston, F., Dupuy, N., Marque, S. R. A., Barbaroux, M., & Dorey, S. (2016). One year monitoring by FTIR of γ -irradiated multilayer film PE/EVOH/PE. *Radiation Physics and Chemistry*, 125, 115–121. <http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.03.010>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna, edición3*. Mexico: Mc-Graw Hill Interamericana.
- HECHT, E. (2000). *ÓPTICA*. MADRID: ADDISON WESLEY IBEROAMERICANA.
- Hwang, Y.-M., Yoon, S.-W., Kim, J.-H., Kim, S., & Pakh, H.-J. (2008). Thin-film thickness profile measurement using wavelet transform. *Optics and Lasers in Engineering*, 179–184.
- Hocker, S., Hummel, M., Binkele, P., Lipp, H., & Schmauder, S. (2015). Molecular dynamics simulations of tensile tests of Ni-, Cu-, Mg- and Ti-alloyed aluminium nanopolycrystals. *Computational Materials Science*, 116, 32–43. <http://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.07.047>
- Ishikawa, K., Yamano, H., Asada, K., Iwata, K., & Ueda, M. (2004). Real-time measurement of a thickness of a thin coating by means of sheet laser. *Optics and Lasers in engineering*, 731-742.
- J. Quintana, F. C.-C. (2007). Análisis y Diseño de Empaques Flexibles para Alimentos. *Revista Tecnológica ESPOL*, 11-18.
- Jing Li, H. L. (2014). In-situ FTIR imaging on the plastic deformation of iPP thin films. *Polymer*, 1103-1107.
- Larenaa, A., Millán, F., Pérez, G., & Pinto, G. (2002). Effect of surface roughness on the optical properties of multilayer polymer films. *Applied Surface Science*, 339-346.
- Mackeen, L. W. (2012). *Film Properties of Plastics and Elastomers* (Third Edition ed.). Elsevier.
- Mano, J., Lanceros Mendez, S., & Costa, A. M. (2001). FTIR AND DSC STUDIES OF MECHANICALLY. *J. MACROMOL. SCI.—PHYSICS*, 517–527.
- Martinez Antón, J. (2002). The total infrared transmittance of polymerized vinyl fluoride films for a wide range of radiant source temperatura. *Optical materials*, 335-341.
- (2012). Procesamiento y Analisis de imagenes digitales. En J. P. Moya, *Procesamiento y Analisis de imagenes digitales* (págs. 7,8). Costa Rica: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.

-
- Nigel Marx, J. G. (2016). Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts. *Tribology International*, 267-277.
- Pe, G., Larena, A., & Milla, F. (2002). Effect of surface roughness on the optical properties of multilayer polymer films, 187, 339–346.
- Pham, M., & Lee, C. (2015). Novel approach to predict the varying thicknesses of a PVA film during a roll-to-roll process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 92, 52–69. <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.12.001>
- Robertson, G. L. (2014). Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. En G. L. Robertson, *Encyclopedia of Food Microbiology* (págs. 232–249). Elsevier Ltd.
- Rodríguez, F. D. (2012). *CONFORMADO DE MATERIALES PLÁSTICOS*. CUAUTITLÁN IZCALLI : FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN .
- Rushton, D. N. (2003). Functional Electrical Stimulation and rehabilitation—an hypothesis. *Medical Engineering & Physics*, 25, 75–78. <http://doi.org/10.1016/S>
- Salzberg, B. M., Kosterin, P. V., Muschol, M., Obaid, A. L., Rummyantsev, S. L., Bilenko, Y., & Shur, M. S. (2005). An ultra-stable non-coherent light source for optical measurements in neuroscience and cell physiology. *Journal of Neuroscience Methods*, 141(1), 165–169. <http://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2004.06.009>
- Šantić, B. (2010). Measurement of the refractive index and thickness of a transparent film from the shift of the interference pattern due to the sample rotation. *Thin Solid Films*, 518(14), 3619–3624. <http://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.09.067>
- Serway, R. A. (1996). *Física Tomo II*. Mexico, D.F.: McGRAW-HILL.
- Song, K., Mohseni, M., & Taghipour, F. (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Research*, 94, 341–349. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.003>
- Tanabe, T., Watanabe, K., Oyama, Y., & Seo, K. (2010). Polarization sensitive THz absorption spectroscopy for the evaluation of uniaxially deformed ultra-high molecular weight polyethylene. *NDT and E International*, 43(4), 329–333. <http://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.03.001>
- Testing, P. P., & Films, P. (2012). *2 Introduction to the Properties of Plastic and Elastomer Films*. <http://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2551-9.00002-5>
- Tojo, F., Hirakawa, S., Toyoda, T., Iguachi, M., Katayama, Y., Nishikubo, T., et al. (2007). Evaluation of plastic film thickness measuring sistem using an X-ray slit beam.

Instrumentation and Measurement Technology Conference, (p. 5). Warsaw, Poland.

Tsilingiris, P. (2003). The total infrared transmittance of polymerized vinyl fluoride films for a wide range of radiant source temperatura. *Renewable Energy*, 887-900.

van Nijnatten, P. a. (2009). Optical monitoring of thin film properties using in-situ measurement of transmittance and reflectance. *Thin Solid Films*, 517(10), 3087–3091. <http://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.091>

Yusoh, R., Horprathum, M., Eiamchai, P., Chanyawadee, S., & Aiempanakit, K. (2011). Determination of the Thickness and Optical Constants of ZrO₂ by Spectroscopic Ellipsometry and Spectrophotometric Method. *Procedia Engineering*, 8, 223–227. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.041>