

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LA RESISTENCIA
CORTANTE DE ADHESIVOS EPÓXICOS BICOMPONENTES**

**MAYRA ALEJANDRA CARREÑO LOPEZ
NICOLLE JULIETTE VASQUEZ PEÑALOZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2022

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LA RESISTENCIA
CORTANTE DE ADHESIVOS EPÓXICOS BICOMPONENTES**

**MAYRA ALEJANDRA CARREÑO LOPEZ
NICOLLE JULIETTE VASQUEZ PEÑALOZA**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Director
WILLIAM PINTO HERNÁNDEZ
PhD. en Ingeniería Mecánica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2022

AGRADECIMIENTOS

Las autoras de este proyecto de grado expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a las siguientes personas y entidades que aportaron para la realización de este trabajo:

A William Pinto Hernández, Ph.D en Ingeniería Mecánica y director de este proyecto de grado, por su paciencia, asesoría y colaboración en el desarrollo.

Al auxiliar de los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo brindado para la realización de las pruebas requeridas para este proyecto.

Al Doctor Darío Peña Ballesteros y al ingeniero Juan Carlos Orozco pertenecientes a la sede Guatigurá de la Universidad Industrial de Santander por la disposición en el préstamo y el uso de la estufa eléctrica necesaria para el proceso de este proyecto.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por todos los conocimientos transmitidos, sus enseñanzas contribuyendo en nuestra formación como ingenieras.

A nuestras familias, amigos, compañeros y todas las personas que han hecho parte durante todos estos años de nuestro proceso.

DEDICATORIA

A Dios por acompañarme y guiarme durante todo este proceso.

A mis padres por su apoyo y su amor incondicional, por su esfuerzo constante para ayudarme en todo lo necesario. A mis nonitos por darme todo su amor a diario y estar siempre presentes en mi vida. A mi hermano y mis sobrinos porque han sido mi motor en cada instante. A Felipe por su paciencia, apoyo y amor en todo momento que lo necesite. Y a mi compañera y amiga Alejandra por su dedicación y empeño en este proyecto, también por su amistad incondicional.

Nicolle

DEDICATORIA

A Dios porque a el le debo todo lo que tengo y lo que soy. Por la fortaleza y sabiduría en aquellos momentos de dificultad y de debilidad. A la Virgen por su bendición y protección en mi vida.

A mis padres por su apoyo incondicional, por todo su amor y cariño. Por confiar en mi y hacer de mi una mejor persona a través de sus enseñanzas y consejos. Por ayudarme a enfrentar los retos y a alcanzar mis metas. Es un orgullo y privilegio contar con ustedes.

A mi hermano por influir en mi vida con su apoyo, su amor y motivación.

A mi compañera de proyecto y amiga Nicolle por su comprensión, apoyo y dedicación en este proyecto.

Alejandra

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	13
1. OBJETIVOS	14
1.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
2. MARCO TEORICO	15
2.1 TEORIA GENERAL DE LA ADHESION	15
2.1.1 Diseño de uniones adhesivas	17
2.1.2 Fallas adhesivas	19
2.1.3 Adhesivo epóxico	20
2.1.4 Tratamientos superficiales	21
2.1.5 Curado de adhesivos	22
2.2 MODELOS CONSTITUTIVOS MECÁNICOS	22
2.2.1 Modelo elástico clásico	23
2.2.2 Modelos viscoelásticos	24
2.2.2.1 Modelo viscoelástico de Kelvin-Voight	24
2.2.2.2 Modelo viscoelástico de Maxwell.	25
2.2.3 Modelos hiperelásticos	26
2.2.3.1 Modelo de Ogden	28
2.2.3.2 Modelo Neohookeano	29
2.2.3.3 Modelo de Mooney-Rivlin	29
3. ETAPA EXPERIMENTAL	31
3.1 MATERIA PRIMA	31
3.1.1 Adhesivo.	31
3.1.2 Acero HR.	31
3.2 HERRAMIENTAS USADAS	31
3.3 EQUIPOS	32
3.3.1 Universal MTS Bionix.	32
3.3.2 Estufa Eléctrica Memmert.	33

3.4 ETAPA EXPERIMENTAL ENSAYO CORTANTE PURO Y CORTANTE TIPO SANDWICH	34
3.4.1 Proceso de fabricación de las probetas	34
3.5 PROCESO DE LOS ENSAYOS.	35
3.5.1 Preparación de probetas. S	35
3.6 CURADO DE LAS PROBETAS	39
3.7 ENSAYOS EN LA MÁQUINA “Universal MTS bionix”	40
3.7.1 Protocolo para el ensayo cortante puro.	40
3.7.2 Protocolo para el ensayo cortante tipo sándwich.	41
4. ANALISIS DE RESULTADOS	44
4.1 ESFUERZO VS DEFORMACIÓN	44
4.2 FUERZA VS DESPLAZAMIENTO	51
4.3 ESFUERZO VS LAMBDA	59
5. CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de unión adhesiva.	15
Figura 2. Diseño de uniones adhesivas.	18
Figura 3. Montaje tipo sándwich.	19
Figura 4. Montaje solape simple.	19
Figura 5. Tipos de fallas adhesivas.	20
Figura 6. Representación del modelo viscoelástico de Kelvin-Voight.	24
Figura 7. Representación del modelo viscoelástico de Maxwell.	25
Figura 8. Universal MTS Bionix	33
Figura 9. Estufa Eléctrica Memmert	34
Figura 10. Geometría probeta cortante puro.	34
Figura 11. Geometría probeta cortante tipo sándwich.	35
Figura 12. Probetas marcadas ensayo cortante puro.	36
Figura 13. Probetas marcadas ensayo cortante tipo sándwich.	36
Figura 14. Mezcla del adhesivo epóxico	37
Figura 15. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de 105° C (a) ensayo cortante, (b) ensayo tipo sándwich.	37
Figura 16. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de 70° C, (c) ensayo cortante, (d) ensayo tipo sándwich.	38
Figura 17. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de 45° C, (e) ensayo cortante, (f) ensayo tipo sándwich.	38
Figura 18. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de ambiente(25C°C), (g) ensayo cortante, (h) ensayo tipo sándwich.	39
Figura 19. Geometría y fuerza del ensayo cortante puro.	41
Figura 20. Montaje del ensayo cortante puro en la máquina.	41
Figura 21. Geometría y fuerza del ensayo cortante tipo sándwich	42
Figura 22. Ensayo cortante tipo sándwich en la maquina	43
Figura 23. Geometría del ensayo cortante puro.	45

Figura 24. Esfuerzo vs deformación cortante puro para cada temperatura de curado (a) 25°C, (b) 45°C, (c) 70°C y (d) 105°C	46
Figura 25. Comportamiento promedio de cada temperatura de curado (e) 25°C, (f) 45°C, (g) 70°C y (h) 105°C	48
Figura 26. Comportamiento promedio de todas las temperaturas de curado ensayo cortante puro	49
Figura 27. Influencia de la temperatura en el módulo de rigidez.	50
Figura 28. Curva interpolación Modulo de rigidez vs Temperatura de curado	51
Figura 29. Geometría del ensayo cortante tipo sándwich.	53
Figura 30. Fuerza vs desplazamiento cortante tipo sándwich para cada temperatura de curado (a) 25°C, (b) 45°C, (c) 70°C Y (d) 105°C	54
Figura 32. Comportamiento promedio de cada temperatura de curado (e) 25°C, (f) 45°C, (g) 70°C y (h) 105°C	56
Figura 33. Comportamiento promedio de todas las temperaturas de curado ensayo cortante tipo sándwich.	57
Figura 34. Influencia de la temperatura en el módulo de elasticidad.	58
Figura 35. Curva interpolación Modulo de elasticidad vs Temperatura de curado	59
Figura 36. Geometría del ensayo cortante puro.	60
Figura 37. Esfuerzo vs lambda cortante puro para cada temperatura de curado, (a) 25°C, (b) 45°C, (c) 70°C y (d) 105°C	62
Figura 38. Comportamiento promedio de cada temperatura de curado (e) 25°C, (f) 45°C, (g) 70°C y (h) 105°C	63
Figura 39. Comportamiento promedio de todas las temperaturas de curado ensayo cortante puro	64
Figura 40. Influencia de la temperatura en el módulo de corte (μ_1)	66
Figura 41. Curva de interpolación Modulo de corte vs Temperatura de curado.	67
Figura 42. Influencia de la temperatura en el módulo de corte (μ_2)	68
Figura 43. Curva de interpolación Modulo de corte vs Temperatura de curado.	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Coeficiente de correlación para esfuerzo vs deformación.	47
Cuadro 2. Coeficiente de correlación para fuerza vs desplazamiento.	55
Cuadro 3. Coeficiente de correlación para esfuerzo vs λ	63
Cuadro 4. Coeficiente de correlación para esfuerzo vs λ	63

RESUMEN

TITULO: INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE CURADO EN LA RESISTENCIA CORTANTE DE ADHESIVOS EPOXICOS BICOMPONENTES.*

AUTORES: CARREÑO LOPEZ MAYRA ALEJANDRA, VASQUEZ PEÑALOZA NICOLLE JULIETTE.**

PALABRAS CLAVE: Adhesivo epóxico, modelo elástico clásico, modelo hiperelástico, rigidez, elasticidad.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad, los adhesivos se han convertido en materiales de gran importancia ya que ofrecen alternativas similares a otro tipo de uniones para el ensamble de estructuras y diferentes elementos debido a sus propiedades y aplicaciones. De esta forma, se hace necesario estudiar el comportamiento y desempeño de estos basándose en modelos constitutivos disponibles en la literatura y así ampliar la información que se pudiere tener acerca de este tipo de materiales.

En el presente proyecto, se realizó la simulación del comportamiento mediante modelos constitutivos mecánicos como el modelo elástico-clásico para la zona elástica y el modelo de Mooney-Rivlin para materiales hiperelásticos en grandes deformaciones, haciéndose un análisis de los módulos de rigidez y elasticidad.

Se utilizaron datos experimentales obtenidos luego de realizar 20 ensayos a cortante puro y 6 ensayos a cortante tipo sándwich siendo estas probetas sometidas con anterioridad a temperaturas de curado (25°C, 45°C, 70°C, 105°C), con el propósito de hallar la influencia que tiene esta temperatura de curado en las propiedades del adhesivo epóxico eucodural 452 gel.

Finalmente, se estableció que la temperatura de curado tiene influencia y genera una variación en las propiedades mecánicas del adhesivo epóxico eucodural 452 gel en la zona elástica para ensayos a cortante puro y cortante tipo sándwich, así mismo en la zona de grandes deformaciones para ensayos a cortante puro.

* Trabajo de Grado

** Escuela de ingeniería mecánica. Director. William Pinto Hernández. PhD. en Ingeniería Mecánica
Escuela de ingeniería mecánica

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF THE CURING TEMPERATURE ON SHEAR STRENGTH OF TWO-COMPONENT EPOXIC ADHESIVES *

AUTHORS: CARREÑO LOPEZ MAYRA ALEJANDRA, VASQUEZ PEÑALOZA NICOLLE JULIETTE.**

KEYWORDS: Epoxic adhesives, classic elastic model, hyperelastic model, rigidity, elasticity.

DESCRIPTION:

Nowadays, adhesives have become materials of great importance since they offer similar alternatives to other types of joints for the assembly of structures and different elements due to their properties and applications. However, it is necessary to study their behavior and performance based on constitutive models available in the literature and thus expand the information that may be obtained about this type of material.

In this project, behavior simulation was performed using mechanical constitutive models such as the classical-elastic model for the elastic zone and the Mooney-Rivlin model for hyperelastic materials at large deformations, performing an analysis of the modulus of stiffness and elasticity.

Experimental data obtained after performing 20 pure shear tests and 6 sandwich shear tests were used. The specimens used were previously subjected to different curing temperatures (25°C, 45°C, 70°C, 105°C), with the aim of finding the influence that this treatment has on the properties of the 452 gel eucodural epoxy adhesive.

Finally, it was established that the curing temperature influences and generates a variation in the mechanical properties of the 452 gel eucodural epoxy adhesive in the elastic zone for pure shear and sandwich-type shear tests, as well as in the zone of large deformations for pure shear tests.

* Bachelor thesis.

** Faculty of Physical Engineering-Mechanical. School of mechanical engineering. Director William Pinto Hernandez. Mechanical engineer.

INTRODUCCION

Actualmente existe una amplia variedad de sectores que utilizan adhesivos como parte de sus procesos y se está experimentando un auge para uso en áreas como la construcción y fabricación. Existen muchas variables que afectan e influyen en la resistencia que presenta la unión con el adhesivo, como lo son el tipo de adhesivo, la geometría, el material de los sustratos, el tipo de carga y la temperatura de curado.

Los adhesivos epóxicos son polímeros termoestables que al ser mezclados con un catalizador su fórmula se endurece, por esto son clasificados como adhesivos bicomponentes, que son usados en la industria para diferentes uniones e instalaciones. Las variables más influyentes para este tipo de adhesivo son el esfuerzo al que sea sometido, el tiempo de curado y su temperatura.

Cada fabricante posee una ficha técnica y de seguridad del adhesivo la cual es entregada al comprador, estas fichas carecen de información con respecto al comportamiento mecánico que presenta el adhesivo epóxico a diferentes temperaturas de curado por lo cual no es posible caracterizar el material para el estudio de este cuando es sometido a pruebas de esfuerzo cortante por medio de montajes tipo sándwich y cortante puro.

En este proyecto de grado, se planteó la necesidad de analizar diferentes modelos constitutivos mecánicos para caracterizar el comportamiento del adhesivo epóxico eucodural 452 gel bajo diferentes temperaturas de curado y para ensayos cortante puro y tipo sándwich, esta caracterización se analizó para la zona elástica de las curvas obtenidas en los dos ensayos, encontrando que la temperatura de curado influye y puede hacer variar las propiedades del adhesivo en el régimen elástico

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y comparar mecánicamente uniones metálicas con adhesivo de resina epóxica eucodural 452 gel sometido a diferentes temperaturas de curado para ensayos a cortante contribuyendo a la misión de la Universidad Industrial de Santander divulgando conocimiento por medio de la investigación.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Modelar el comportamiento mecánico de un adhesivo epóxico sometido a ensayos a cortante a diferentes temperaturas de curado mediante modelos ya existentes en la literatura.
- Determinar la influencia de la temperatura de curado en la capa adhesiva epóxica entre dos superficies de acero, realizando ensayos a esfuerzos cortantes para caracterizar el comportamiento mecánico del adhesivo, siguiendo la norma ASTM D 1151-72 (Effect of Moisture and Temperature on Adhesive Bonds).
- Simular mediante el software Matlab el comportamiento del adhesivo epóxico en montajes a cortante puro y tipo sándwich.
- Validar el modelo a través de ensayos usando la maquina (Universal MTS bionix) para realizar los ensayos a cortante tipo sándwich bajo la norma ISO 14679:1997 y la norma ASTM D1002-05 para cortante puro (Método de prueba estándar para la resistencia al cizallamiento de muestras de metal unidas por una sola unión adhesiva por carga de tensión “metal a metal”).

2. MARCO TEORICO

2.1 TEORIA GENERAL DE LA ADHESION

El desarrollo e implementación de adhesivos como sistema de unión ha sido de gran impacto en la industria ya que ofrece alternativas similares a otro tipo de uniones como la soldadura, las uniones mecánicas, etc.

Un adhesivo es aquella sustancia que se aplica entre superficies, como se puede apreciar en la figura 1, y permite una unión resistente a la separación. Los sustratos son las piezas que se pretenden unir por medio del adhesivo y la adhesión son las interacciones que hay entre la interfase del adhesivo-adherente.

Cuando se diseña una unión adhesiva se pretende que la rotura no sea en ningún caso adhesiva, es decir, que la separación nunca se produzca en la interfase sustrato-adhesivo.¹

Figura 1. Esquema de unión adhesiva.



Fuente: Autores.

Algunas características de las uniones adhesivas pueden ser:

- Distribución uniforme de tensiones.

¹ Madrid, Mario. «2.ulpgc.es.» 2020. https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf (último acceso: 2021).

- Rigidización de las uniones.
- No se produce distorsión del sustrato.
- Permiten la unión económica de distintos materiales.
- Uniones selladas.
- Aislamiento.
- Reducción del número de componentes.
- Mejora del aspecto del producto.
- Compatibilidad del producto.
- Uniones híbridas.

Estas características se presentan como ventajas en comparación a otros métodos de ensamblaje de materiales. Por otro lado, entre los inconvenientes que tiene el uso de adhesivos están:

- Necesidad de preparación superficial.
- Espera de los tiempos de curado.
- Dificultad de desmontaje.
- Resistencias mecánicas y a la temperatura limitadas.

- Inexistencia de ensayos no destructivos.²

2.1.1 Diseño de uniones adhesivas³. Es necesario considerar para las uniones adhesivas los métodos de aplicación del adhesivo, la preparación de las superficies y los sistemas de curado al que es sometida la unión. De esta forma, el diseño de la unión es uno de los parámetros en miras de obtener un rendimiento deseado del adhesivo a utilizar. Esta elección se debe hacer teniendo en cuenta la aplicación del adhesivo. En la figura 2 se muestran las configuraciones para las cuales son aplicadas juntas con adhesivos.⁴

La compresión es una fuerza aplicada a una unión en plano y recta, la fuerza se aplica en dirección al adhesivo y se distribuye por toda la superficie de la línea de unión.

La tracción es una tensión que se ejerce sobre toda la unión. Como se muestra en la figura 2 inciso b. La dirección de la tensión es en recta, en plano y en dirección opuesta a la unión del adhesivo y se distribuye por toda la superficie de la línea de unión.

Las tensiones que se producen en la cizalla son paralelas al plano de unión y se distribuye por toda la superficie de la línea de unión. Como se muestra en la figura 2 inciso b.

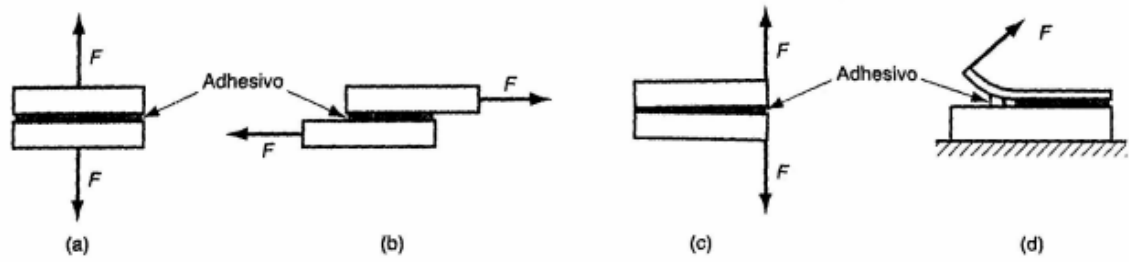
² Gomez , Alberto . «Linkedin.» 22 de Octubre de 2020. <https://es.linkedin.com/pulse/ventajas-y-desventajas-de-las-uniones-adhesivas-alberto-g%C3%B3mez> (último acceso: 2021).

³ Guillen, J. «upct .» 2008. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/46/Introduccion3.pdf?sequence=19&isAllowed=y> (último acceso: 2021).

⁴ 3M Science Applied to Life. «3m.» 2022. https://www.3m.com.es/3M/es_ES/union-y-montaje/formacion/ciencia-de-la-adhesion/tipos-de-tensiones-comunes-en-las-uniones-con-adhesivo/ (último acceso: 2021).

En el efecto de pelado se aplica una tensión alta en el borde de la unión y con ella se produce una rotura de la unión. Como se muestra en la figura 2 inciso c y d. Uno de los sustratos es flexible.

Figura 2. Diseño de uniones adhesivas.



Fuente: Materias FC y T UMSS. «materias.fcyt.umss.» 2022. <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecnologia/PDF/cap-44.pdf> (último acceso: 2022).

En el diseño de las uniones adhesivas se considera que el adhesivo trabaje a cargas de cizalla lo máximo posible, evitando configuraciones no deseadas, en las que la unión es sometida a un esfuerzo de pelado. Así como los esfuerzos de tracción son aceptables pero peligrosos ya que se podrían generar momentos flectores tras una desviación en la línea de aplicación de la carga.⁵

Montaje tipo sándwich: están formadas por dos láminas delgadas que encierran el adhesivo. Entre sus características más destacables está la rigidez a la flexión y el aislamiento térmico.⁶

⁵ Convezar. «Convezar.» 2020. <https://convezar.com/disenio-de-uniones-adhesivas/> (último acceso: 2022).

⁶Navarro Ugena, Carlos, y Enrique Barbero Pozuelo. «Universidad Carlos III de MAdrid.» 2008. <http://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/elasticidad-y-resistencia-ii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo7.pdf> (último acceso: 2021).

Figura 3. Montaje tipo sándwich.



Fuente: Autores.

Montaje tipo solape simple: está formado por dos laminas unidas mediante una capa de adhesivo. Este montaje trabaja en la dirección máxima de resistencia del adhesivo. ⁷

Figura 4. Montaje solape simple.



Fuente: Autores

2.1.2 Fallas adhesivas. ⁸ El mecanismo de unión adhesiva se relaciona con la fuerza de unión entre el sustrato y el adhesivo y las fuerzas internas del adhesivo, es decir, la adhesión y la cohesión. Cuando la unión no consigue repartir la carga adecuadamente se producen daños que harán fallar la unión adhesiva. Estos daños pueden ser producidos por tratamientos de superficies inadecuados, falta de cohesión del adhesivo por una mezcla inadecuada de sus componentes, un curado inapropiado, fallas en los elementos estructurales, falla por reacción química entre el sustrato y el adhesivo, etc.⁹

Así mismo, las fallas en las uniones adhesivas pueden darse de 3 posibles modos:

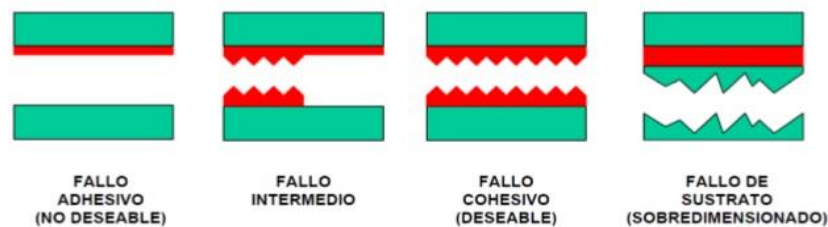
⁷Guillen, J. «upct .» 2008. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/46/Introduccion3.pdf?sequence=19&isAllowed=y> (último acceso: 2021).

⁸Converzar. «Converzar.» 2020. <https://converzar.com/disenio-de-uniones-adhesivas/> (último acceso: 2022).

⁹ Universidad Tecnológica Nacional . «<http://www.frlp.utn.edu.ar/>.» 2020. <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qaplicada/Adhesivos.html> (último acceso: 2021).

1. Separación de tipo adhesiva, cuando hay separación entre la interfase sustrato y el adhesivo.
2. Separación por cohesión o cohesiva, cuando ocurre rotura en el adhesivo.
3. Rotura de sustrato, cuando se rompe el sustrato antes que la unión adhesiva o la interfase sustrato-adhesivo.

Figura 5. Tipos de fallas adhesivas.



Fuente: Universidad Tecnológica Nacional . «<http://www.frlp.utn.edu.ar/>.» 2020.
<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qaplicada/Adhesivos.html> (último acceso: 2021).

En lo deseable, se pretende que la rotura no sea adhesiva en ningún caso, es decir, que no haya separación entre el sustrato y el adhesivo. No se puede predecir el modo de fallo que tendrá la unión, ya que la magnitud de la fuerza de adhesión depende de múltiples factores algunos controlables y otro no. La falla de separación de tipo adhesiva es la ideal porque con este tipo de falla se evidencia que se ha alcanzado la máxima resistencia de los materiales.¹⁰

2.1.3 Adhesivo epóxico.¹¹ Los adhesivos epóxicos al tener la capacidad de unir la mayoría de los materiales, se utiliza en una gran variedad de aplicaciones, esto los hace adhesivos estructurales por excelencia.¹²

¹⁰ Universidad Tecnológica Nacional . «<http://www.frlp.utn.edu.ar/>.» 2020.
<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qaplicada/Adhesivos.html> (último acceso: 2021).

¹¹ Antala Industria . «Antala Industria.» 2022. <https://www.antala.es/categoria/adhesivos-sellantes/epoxi/> (último acceso: 2022).

¹² Madrid , Mario . «2.ulpgc.es.» 2020.
https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf (último acceso: 2021).

Entre algunas de las propiedades de los adhesivos epóxicos se encuentran:

- Alta resistencia a cizalla y a tracción.
- Adhesivos rígidos, con resistencia al pelado.
- Buena resistencia química.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Adherencia a la mayoría de sustratos.

¹³ Los adhesivos pueden clasificarse por su número de componentes necesarios para que se produzca el curado del adhesivo, entre estos, están los adhesivos monocomponentes que se presentan en un solo envase y solo tienen un componente reactivo y los adhesivos bicomponentes que se presentan en dos envases diferentes, siendo la mezcla de estos con la proporción correcta necesaria para que inicie el proceso de curado.

2.1.4 Tratamientos superficiales¹⁴

La adhesión es un fenómeno de la superficie. Cuando se requiere una unión la limpieza es fundamental, debido a que la suciedad en las superficies hace que el contacto intermolecular disminuya entre adherente y adhesivo. En superficies metálicas, se eliminan las grasas y aceites con disolventes, asegurando que al momento de realizar la unión, no hayan disolventes presente, es decir, que el disolvente se haya evaporado o secado completamente, para evitar defectos por la

¹³ Antala Speciality Chemicals. «Antala.» 7 de Mayo de 2017. <https://www.antala.es/clasificacion-adhesivos-industriales/> (último acceso: 2022).

¹⁴ Madrid, Mario. «2.ulpgc.es.» 2020. https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf (último acceso: 2021).

presencia de estos. Así mismo la unión debe realizarse inmediatamente terminada la limpieza, para evitar contacto con contaminantes suspendidos en el aire.

2.1.5 Curado de adhesivos. Los adhesivos son principalmente los que se curan por calor, así, principalmente constan de resina y endurecedor. La temperatura de curado depende del endurecedor. El tiempo de curado es inversamente proporcional a la temperatura de curado, por tanto, en cuanto más alta sea la temperatura de curado, menor sería el tiempo.

Las características de los típicos epoxis de curado térmico suelen ser:

- Resistencia entre media-alta.
- Buena adhesión a diversos substratos.
- Resistencia al ambiente buena.

El mecanismo de curado afecta fundamentalmente a las características cohesivas del material adhesivo.

2.2 MODELOS CONSTITUTIVOS MECÁNICOS

Basándose en la finalidad del proyecto, se realiza la búsqueda de modelos constitutivos mecánicos que permitan describir de la manera más aproximada el comportamiento de las uniones adhesivas sometidas a pruebas a cortante puro y tipo sándwich. Durante esta investigación, se indagó en los modelos elástico clásico, modelos viscoelásticos y algunos modelos hiperelásticos.

2.2.1 Modelo elástico clásico. ¹⁵ Las estructuras ingenieriles se diseñan para sufrir deformaciones pequeñas, esto involucra la parte recta del diagrama esfuerzo-deformación mostrando el comportamiento de como un resorte lineal y en esta parte del diagrama se evidencia que el esfuerzo σ es directamente proporcional a la deformación ε . Esta relación es conocida como la ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Donde E es un coeficiente el cual se denomina módulo de elasticidad del material o módulo de Young, este determina la rigidez del material y es único para cada uno.

En un material sometido a cortante puro puede realizarse el estudio de su comportamiento usando sus datos para determinar el esfuerzo cortante y la deformación unitaria cortante, este material exhibirá un comportamiento elástico lineal por lo cual tendrá un límite de proporcionalidad. Finalmente, su comportamiento elástico es lineal, de modo que la ley de Hooke para el cortante puede escribirse así:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2)$$

Donde G es el módulo de elasticidad por cortante o módulo de rigidez y siendo γ la deformación angular.

¹⁶ Del mismo modo, para ensayos cortantes tipo sándwich o flexión, de una viga simplemente apoyada, la estimación del módulo de elasticidad E se puede calcular mediante la curva carga-desplazamiento, teniendo en cuenta la inercia y la distancia entre soportes L , como:

¹⁵ Hibbeler, Russell C. *Mecánica de Materiales*. 6. Mexico : Pearson Educacion , 2020

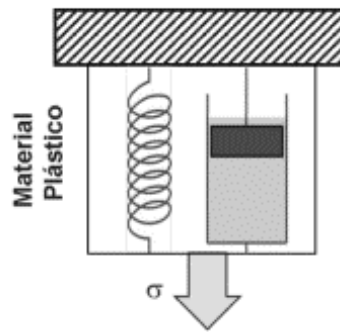
¹⁶ Guede , D, P Gonzalez , y J R Caeiro . «Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos.» *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral* 5, nº 1 (2013).

$$E = \frac{PL^3}{48I\delta} \quad (3)$$

2.2.2 Modelos viscoelásticos.¹⁷ Un material viscoelástico puede considerarse que tiene un comportamiento intermedio, ya que tiene elementos elásticos y elementos viscosos. Si le aplica una carga instantánea, sufre una deformación instantánea que contiguamente sigue una deformación diferida creciente por el tiempo. En un material viscoelástico la tensión depende de la deformación y la velocidad de deformación. Existen diversos modelos constitutivos que representan los efectos de los elementos elásticos y viscosos.

2.2.2.1 Modelo viscoelástico de Kelvin-Voight. Se considera su comportamiento viscoelástico definido por la combinación en paralelo de un embolo y un resorte.

Figura 6. Representación del modelo viscoelástico de Kelvin-Voight.



Fuente: Fombuena , V, T Boronat, L Sanchez-N´acher, D Garc´ia-Sanoguera, y R Balart. «Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingenieria de.» *Grupo de Innovacion de Practicas Academicas (GIPA) materiales polimericos* 1, nº 1 (2017).

Debido al acoplamiento, las tensiones soportadas por el material plástico serán la suma de la tensión en el muelle σ_1 y la tensión en el émbolo σ_2 :

¹⁷Fombuena , V, T Boronat, L Sanchez-N´acher, D Garc´ia-Sanoguera, y R Balart. «Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingenieria de.» *Grupo de Innovacion de Practicas Academicas (GIPA) materiales polimericos* 1, nº 1 (2017).

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4)$$

Así mismo, la deformación de los elementos será idéntica, ya que están conectados en paralelo:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (5)$$

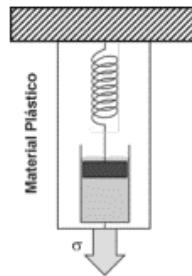
Sustituyendo y tomando como referencia la expresión de aditividad de las tensiones, se obtiene la expresión general del modelo de Kelvin-Voight:

$$\sigma = \xi \varepsilon_1 + \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \xi \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (6)$$

La expresión del modelo Kelvin-Voight explica un comportamiento real como lo es la fluencia, teniendo en cuenta que esta es exponencial en función del tiempo. Kelvin-Voight explica el crecimiento de la deformación de tipo exponencial, pero no es capaz de determinar una deformación inicial.

2.2.2.2 Modelo viscoelástico de Maxwell. Se considera que el comportamiento de un viscoelástico viene definido por la combinación entre un elemento elástico y un elemento viscoso que están acoplados en serie.

Figura 7. Representación del modelo viscoelástico de Maxwell.



Fuente: Fombuena , V, T Boronat, L Sanchez-N'acher, D Garc'ia-Sanoguera, y R Balart. «Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de.» *Grupo de Innovación de Prácticas Académicas (GIPA) materiales poliméricos* 1, nº 1 (2017).

Debido al acoplamiento de ambos componentes (elástico y viscoso), se considera la deformación total del polímero (ε) como la suma de la deformación puramente elástica (ε_1) y la componente viscosa (ε_2). Siendo la deformación elástica independiente del tiempo y la deformación viscosa creciente con el tiempo.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (7)$$

Así mismo, las tensiones, al estar conectadas en serie son iguales para ambos elementos:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (8)$$

Sustituyendo y considerando que las tensiones son las mismas, se obtiene la expresión general del modelo viscoelástico de Maxwell:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\xi} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma_2 = \frac{1}{\xi} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \quad (9)$$

El modelo de Maxwell, con relación a la fluencia es capaz de estimar la deformación elástica inicial pero la fluencia viscosa con el paso del tiempo es lineal, por lo cual no se ajusta a la realidad.

2.2.3 Modelos hiperelásticos¹⁸. Cuando los materiales son sometidos a grandes deformaciones presentan un comportamiento no lineal (hiperelasticidad). Los

¹⁸ Moreno , Miguel , Carlos Plazaola , Guadalupe Gonzalez , Maytee Zambrano , y Carmenza Spadafora . «knepublishing.» 6 de Enero de 2018. <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/1417/3438#info>.

materiales hiperelásticos pueden sufrir grandes deformaciones y observar una respuesta elástica, son casi incompresibles. Los modelos hiperelásticos están en función de invariantes de deformación, pero pueden ser expresados en términos de alargamientos principales λ_1, λ_2 y λ_3 . Cada invariante principal puede representarse como:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (10)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (11)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (12)$$

¹⁹Cada modelo dependerá de uno u otros invariantes principales, no necesariamente depende de todos. Cuando el material debido a sus características se dice que es incompresible por tanto el parámetro I_3 no se empleará. Para este caso $I_3 = 1$.

²⁰En 1990, se propone la función de densidad de energía de deformación (W) que se puede expresar como un polinomio de:

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (13)$$

Como los alargamientos principales y las invariantes de deformación:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (14)$$

¹⁹ Iborra Conca , Alicia . «Universitat Politècnica de Valencia .» 2018. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/125916/TFG%20ALICIA%20IBORRA%20V6%20definitivo_15620834283061006520807187673227.pdf?sequence=1&isAllowed=y (último acceso: 2022).

²⁰ Fombuena , V, T Boronat, L Sanchez-N'acher, D Garc'ia-Sanoguera, y R Balart. «Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de.» *Grupo de Innovación de Prácticas Académicas (GIPA) materiales poliméricos* 1, nº 1 (2017).

Donde

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \delta}{L_0} = 1 + \frac{\delta}{L_0} \quad (15)$$

Para materiales isotrópicos hiperelásticos

$$\sigma_i = -P + \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (16)$$

2.2.3.1 Modelo de Ogden. Se expresa la energía de deformación W en función de los tres alargamientos principales λ_1, λ_2 y λ_3 .

$$W = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (17)$$

²¹ Este modelo muestra buena aproximación del comportamiento de rigidez de la relación tensión/deformación, puede ajustarse a diferentes grados de no-linealidad si se aumenta el número de constantes N . Es aplicable para cualquier tipo de dureza y proporciona ajuste con menor error en comportamiento de elastómeros sometidos a grandes deformaciones.

Aplicando las condiciones de contorno, para ensayos uniaxiales y materiales isotrópicos incompresibles, se tiene que el esfuerzo esta dado por:

$$\sigma_1 = \sum_p^N \mu_p (\lambda_1^{\alpha_p - 1} - \lambda_1^{-\alpha_p - 1})$$

²¹ Rodríguez, Alejandro. «blog.blogmateria.» Enero de 2020. <https://blog.blogmateria.com/2020/01/hiperelasticidad-modelo-de-ogden.html> (último acceso: 2022).

2.2.3.2 Modelo Neohookeano. Constituye el modelo más simple, usando la primera invariante de deformación I_1

$$W = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (18)$$

$$N = 1, \alpha_1 = 2$$

$$W = \frac{\mu_1}{\alpha_1} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (19)$$

Aplicando condiciones de contorno para análisis de ensayos axiales, se obtiene la siguiente ecuación para esfuerzos:

$$\sigma_1 = \mu_1 (\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1})$$

²² Este modelo es una extensión del modelo elástico clásico (Ley de Hooke) para el caso de grandes deformaciones, ya que después de cierto punto la curva esfuerzo/deformación cambia a un comportamiento no lineal, pero no podrá obtener con precisión estas grandes deformaciones. Las tensiones predichas son inferiores a las tensiones que sufre el material en realidad, principalmente las biaxiales.

2.2.3.3 Modelo de Mooney-Rivlin. Es una extensión del modelo neohookeano, relacionando las tensiones y deformaciones a través de la función de densidad de energía de deformación W , la cual en función de las dos primeras invariantes principales de deformación I_1 y I_2 .

²² Galindo Moreno, D Juan Manuel . «Universidad de Malaga .» Junio de 2019. https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/19489/AnalisisMaterialesViscoelasticos_NFU.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

$$W = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (20)$$

$$N = 2, \alpha_1 = 2, \alpha_2 = -2$$

$$W = \frac{\mu_1}{\alpha_1} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + \frac{\mu_2}{\alpha_2} (\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) \quad (21)$$

²³ En relación al modelo neohookeano, este modelo presenta mejor ajuste en para ensayos biaxiales. La energía de deformación de la forma de Mooney-Rivlin se emplea para la descripción del comportamiento de materiales isotrópicos.

La ecuación que representa el esfuerzo viene dada así:

$$\sigma_1 = \mu_1 (\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}) + \mu_2 (\lambda_1^{-2} - \lambda_1)$$

²³ Holzapfel, Gerhard. *Nonlinear Solid Mechanics*. Other Wiley Editorial Offices, 2000.

3. ETAPA EXPERIMENTAL

En esta etapa se encontrará, la materia prima requerida, todas las herramientas mecánicas y manuales que fueron utilizadas y así mismo todo el proceso que se llevó a cabo de diseño, preparación y ensayos con las probetas, también los equipos empleados para la realización de los ensayos cortante puro y cortante tipo sándwich.

3.1 MATERIA PRIMA

3.1.1 Adhesivo. Para este proyecto se utilizó un adhesivo de resina epoxica eucodural 452 gel de 2 componentes (polímero más catalizador), es 100% reactivo, está diseñado como un adhesivo insensible a la humedad, en este tipo de adhesivo cuando se realiza el secado con calor es más resistente al calor y a agentes químicos.²⁴

3.1.2 Acero HR. Se utilizaron láminas de acero HR de 2 mm y 1 mm de espesor, estos materiales se obtienen por laminación en caliente a partir de planchones en acero por eso se conocen como Hot Rolled o laminado en caliente, este tipo de acero estructural tiene una resistencia entre 400 a 485 MPa y una fluencia entre 250 a 345 MPa.²⁵

3.2 HERRAMIENTAS USADAS

Después de obtener la materia prima, se usaron algunas herramientas de corte y acabado superficial para ajustar las probetas a las normas requeridas por cada

²⁴ Euclid Chemical Toxement . «Toxement .» 2022. <https://www.toxement.com.co/productos/portafolio-productos/grouts-y-ancclajes-para-obra-civil-equipos-y-maquinaria/ep%C3%B3xicos/?prodId=1588>.

²⁵ Metaza . «Metaza .» 2022. <https://metaza.com.co/wp-content/uploads/2017/10/Ficha-t%C3%A9cnica-Acero-Hot-Rolled.pdf> (último acceso: 2022).

ensayo, también se adquirieron algunos elementos de seguridad como los guantes y gafas y elementos de limpieza. Algunas técnicas utilizadas:

Técnicas de acabado: Se utilizó pulidora manual y sierra de mesa con disco de lija con el fin de pulir y perfeccionar el perímetro de las probetas y lija de trapo grano 80 para eliminar óxido de las probetas.

Técnicas de limpieza: La limpieza de las probetas se realizó con diluyente thinner y acetona con el fin de eliminar todas las impurezas.

3.3 EQUIPOS

3.3.1 Universal MTS Bionix. Máquina creada para dar desempeño, versatilidad y precisión en pruebas mecánicas y biomecánicas, estas pruebas mecánicas son esenciales para garantizar el cumplimiento de los estándares regulatorios de la industria, caracteriza una amplia gama de materiales y componentes mecánicos, simula fuerzas y desplazamientos, contiene controles digitales precisos, tiene una amplia selección de agarres, accesorios y extensómetros. Las aplicaciones más comunes de esta máquina son: Rendimiento y fuerza máxima, características de fluencia y visco elástica, características de fatiga y desgaste, resistencia a la fractura, entre otros.

En este proyecto la máquina nos permite desarrollar el ensayo de cortante puro mediante dos agarres ubicados en cada extremo de la probeta de forma axial y ejerciéndole una fuerza hasta la ruptura, obteniendo de este ensayo valores de fuerza, desplazamiento y tiempo.

También se desarrolla el ensayo de cortante tipo sándwich cambiando los agarres por tres rodillos y aplicando una carga en la mitad de la probeta hasta el punto de

ruptura, obteniendo de este ensayo igualmente valores de fuerza, desplazamiento y tiempo.

Figura 8. Universal MTS Bionix



Fuente: Autores.

3.3.2 Estufa Eléctrica Memmert. Es una estufa de calentamiento y secado con regulación de temperatura, usada en el sector científico, de la investigación y para realizar ensayos de materiales en el sector industrial. Está fabricada en acero inoxidable, la estufa cuenta con protección para temperaturas hasta 300°C, también cuenta con una ventilación adecuada. Permite ajustar el valor de set point, ajustar la rampilla y cuenta con un reloj de cuenta atrás digital ajustable desde 1 minuto a 99 días.

Esta estufa u horno se utilizó para el curado de las probetas para los ensayos cortante puro y cortante tipo sándwich, se tuvieron en cuenta temperaturas de curado de 45°C, 70°C y 105°C.

Figura 9. Estufa Eléctrica Memmert



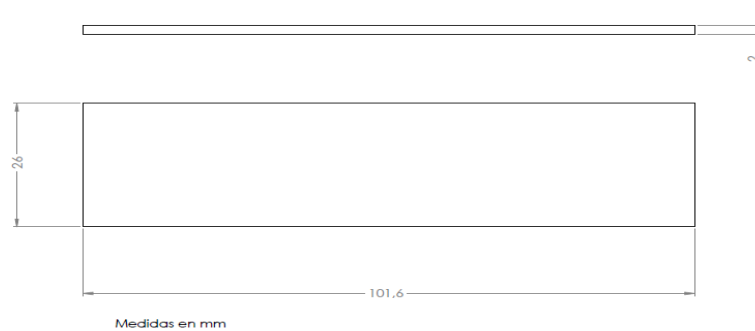
Fuente: Autores.

3.4 ETAPA EXPERIMENTAL ENSAYO CORTANTE PURO Y CORTANTE TIPO SANDWICH

3.4.1 Proceso de fabricación de las probetas

- Diseño de la probeta: Para la geometría de las probetas de los ensayos a cortante puro se utilizó la norma ASTM D1002-05 y para la geometría de las probetas de los ensayos a cortante tipo sándwich se utilizó la norma ISO 14679:1997.

Figura 10. Geometría probeta cortante puro.



Fuente: Autores.

Figura 11. Geometría probeta cortante tipo sándwich.



Fuente: Autores.

- Según la recomendación de las normas mencionadas anteriormente el material para el sustrato de las probetas era acero e24 para el ensayo cortante puro y un acero xc18 para ensayo cortante tipo sándwich. Para esto es necesario recalcar que, en la ciudad de Bucaramanga no se encuentra disponible este tipo de acero, por esta razón se decidió adquirir láminas de acero HR ya que son las más comercializadas y así se evitan gastos no deseados.
- Mecanizado de las probetas: las probetas fueron cortadas con láser y posteriormente pulidas y rectificadas para conseguir la geometría adecuada por las normas.

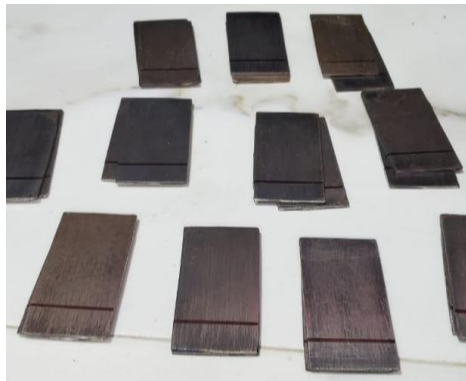
3.5 PROCESO DE LOS ENSAYOS.

3.5.1 Preparación de probetas. Se siguieron los pasos sugeridos por la norma ISO 4588 (Guía para la preparación de superficies metálicas) para la preparación de las superficies de las probetas realizando la limpieza sobre toda la superficie.

- Se lijaron las probetas con thinner para retirar suciedad y exceso de óxido.
- Se limpiaron vertiendo acetona y posteriormente limpiando con un paño limpio de microfibra.

- Se marcan las probetas según las normas ASTM D1002-05 (cortante puro) y ISO 14679:1997 (tipo sándwich) para aplicar el adhesivo. Para el ensayo cortante puro se aplica el adhesivo al final de una de las probetas y con medidas de 12,7 mm x 26 mm, intentando que mantenga el adhesivo un espesor de 4 mm. Para el ensayo cortante tipo sándwich el adhesivo se aplica en el centro con medidas de 25 mm x 5 mm, de igual forma intentando mantener el mismo espesor.

Figura 12. Probetas marcadas ensayo cortante puro.



Fuente: Autores.

Figura 13. Probetas marcadas ensayo cortante tipo sándwich.



Fuente: Autores.

- Se aplica el adhesivo epóxico teniendo en cuenta las indicaciones del fabricante, se extraen partes iguales de base y catalizador, se mezclan hasta lograr una masa homogénea, se aplica esta mezcla con una pala plástica en la marcación que anteriormente detallada y después de dos horas de curado a temperatura ambiente se trasladan al horno.

Figura 14. Mezcla del adhesivo epóxico



Fuente: Autores.

- Se marcan las probetas para poder identificar la temperatura de curado.

Figura 15. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de 105° C (a) ensayo cortante, (b) ensayo tipo sándwich.



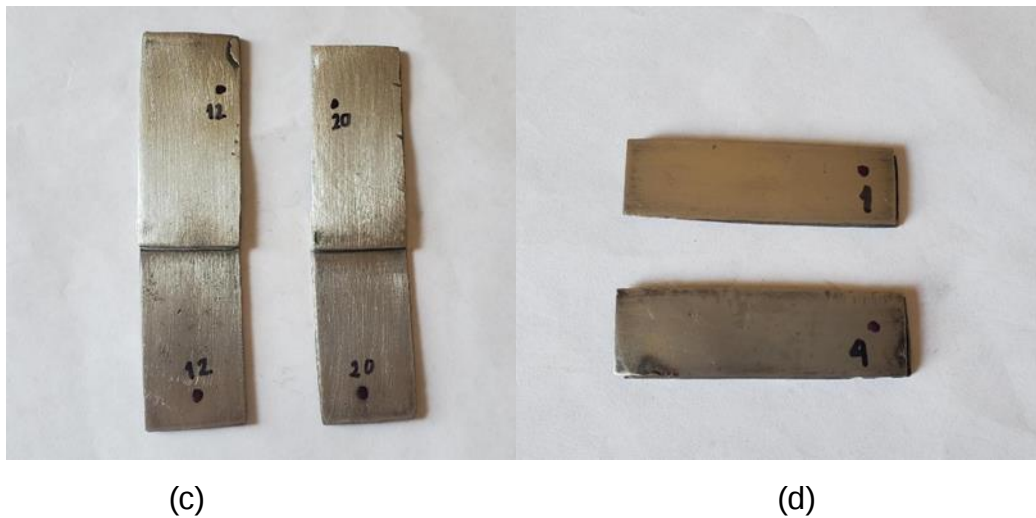
(a)



(b)

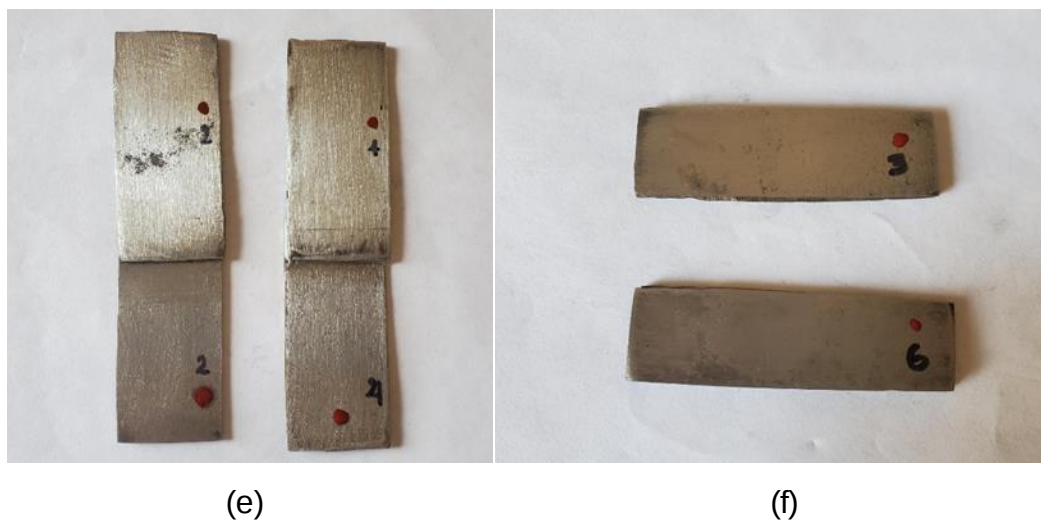
Fuente: Autores.

Figura 16. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de 70° C, (c) ensayo cortante, (d) ensayo tipo sándwich.



Fuente: Autores.

Figura 17. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de 45° C, (e) ensayo cortante, (f) ensayo tipo sándwich.



Fuente: Autores.

Figura 18. Probetas de los ensayos para la temperatura de curado de ambiente(25C°C), (g) ensayo cortante, (h) ensayo tipo sándwich.



(g)

(h)

Fuente: Autores.

3.6 CURADO DE LAS PROBETAS

Se realiza el proceso de curado de las probetas en una estufa eléctrica marca Memmert ubicada en la sede UIS-Guatiguara. Se siguen los siguientes pasos para las tres temperaturas (45°C, 70°C y 105°C):

- Se introducen las probetas dentro del horno de manera ordenada y dejando espacio entre ellas.
- Se enciende el horno, se marca el set point, este depende de la temperatura a la que va a curar la probeta y el tiempo que estará encendido el horno.
- Cerramos el horno, y se calcula el tiempo que se demora el horno para llegar al set point y se espera un tiempo optimo, en este caso 24 horas sugeridas para obtener mejores resultados.

Nota: el funcionamiento del horno se da mediante un control on/off presentando temperaturas máximas y mínimas para cada temperatura de curado.

- Para la temperatura de curado de 105°C: alcanza su set point después de 27'15", la temperatura máxima es de 106.9°C y la mínima de 103.3°C.
- Para la temperatura de curado de 70°C: alcanza su set point después de 17'25", la temperatura máxima es de 71.8°C y la mínima de 69°C.
- Para la temperatura de curado de 45°C: alcanza su set point después de 10'20", la temperatura máxima es de 48.4°C y la mínima de 44.5°C.

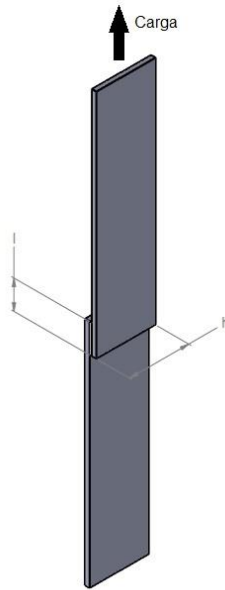
3.7 ENSAYOS EN LA MÁQUINA “Universal MTS bionix”

Debido a la contingencia ocurrida entre el año 2020 y 2021, no se pudo acceder a los laboratorios de la escuela de ingeniería mecánica, por lo cual, se contó con el apoyo del auxiliar de laboratorio donde se encuentra la máquina y realizó las pruebas siguiendo los protocolos estipulados por las normas.

3.7.1 Protocolo para el ensayo cortante puro. Para este ensayo se dispone una probeta en la máquina, esta probeta se coloca sobre las mandíbulas de modo que estas sujeten solo 1 pulg (25,4 mm) de cada extremo, el eje largo de la probeta debe coincidir con la dirección del tirón. Se aplica una fuerza a razón de 80 a 100 kg/ cm² del área de corte por minuto, esta fuerza se aplica hasta que ocurra la fractura. Es decir, se realiza mediante las indicaciones descritas por la norma ASTM D1002-05.

Cabe mencionar, que se ejecutaron en total 20 ensayos, los cuales como anteriormente se aclaró, registraron datos de tiempo, fuerza y desplazamiento.

Figura 19. Geometría y fuerza del ensayo cortante puro.



Fuente: Autores.

Figura 20. Montaje del ensayo cortante puro en la máquina.



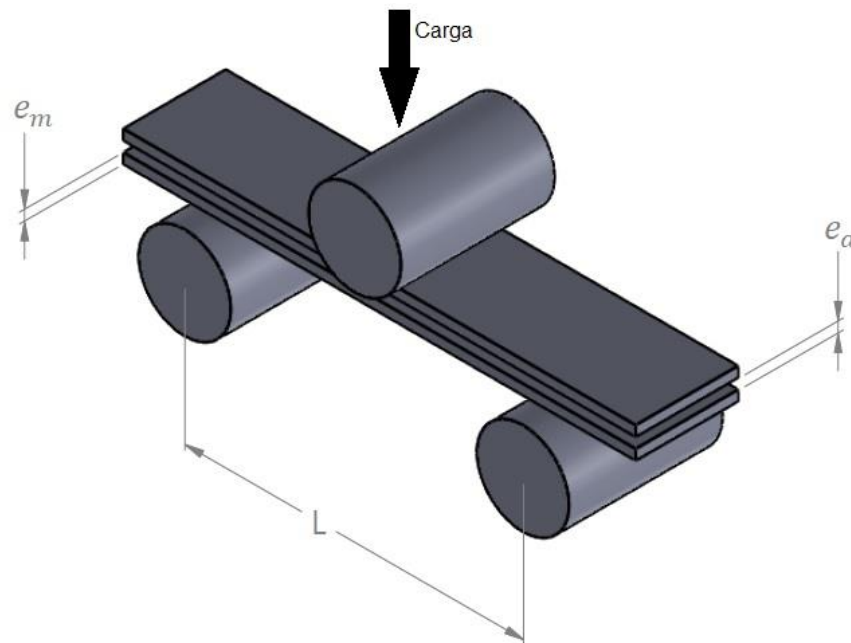
Fuente: Autores.

3.7.2 Protocolo para el ensayo cortante tipo sándwich. Se dispone la probeta en la máquina, los dos puntos de apoyo deben estar separados entre sí a 33 mm (L), la longitud de los puntos de apoyo y la varilla central debe ser superior a 15 mm, en

la norma recomiendan que los rodillos inferiores sean de 6 mm y el rodillo superior de 12 mm, pero por medidas estándar de la máquina dispuesta en el laboratorio se consideró utilizar 3 rodillos de 9 mm; seguido de esto se verifica que la velocidad de desplazamiento de las mordazas sea de $(0,500 \pm 0.001)$ mm/min, luego se toman datos hasta la fractura. Es decir, se realiza el ensayo con las especificaciones dadas por la norma ISO 14679:1997.

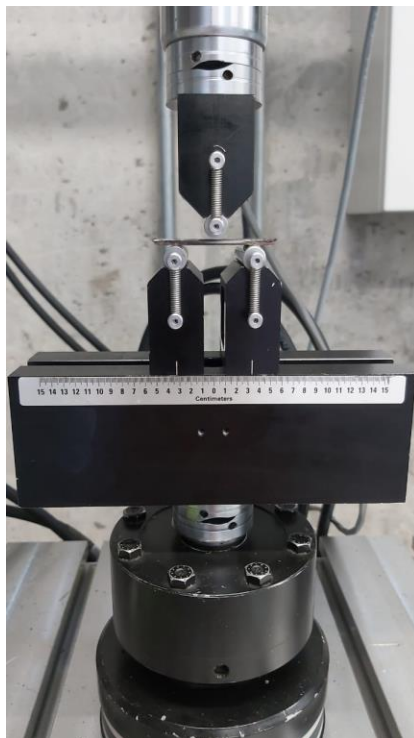
Cabe mencionar que en total se realizaron 6 ensayos, donde se registraron datos de tiempo, fuerza y desplazamiento.

Figura 21. Geometría y fuerza del ensayo cortante tipo sándwich



Fuente: Autores.

Figura 22. Ensayo cortante tipo sándwich en la maquina



Fuente: Autores.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Para predecir el comportamiento de la unión entre dos láminas de metal con un adhesivo epóxico eucodural 452 gel se consideraron, 20 ensayos para cortante puro y 6 ensayos para cortante tipo sándwich para cada una de las temperaturas de curado analizadas, también se calculó el módulo de rigidez para cortante puro y el módulo de elasticidad para cortante tipo sándwich, mediante la pendiente correspondiente a la zona elástica de cada curva teniendo en cuenta que se realizó un estudio de pequeñas deformaciones para estos ensayos.

Para los dos ensayos mencionados anteriormente se simularon diferentes modelos mecánicos, pero al final el modelo que presentó un ajuste óptimo fue el modelo elástico clásico.

4.1 ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

En el ensayo cortante puro se obtuvieron datos de fuerza y desplazamiento en el dominio del tiempo. Con estos resultados se pueden calcular los valores de esfuerzo y deformación mediante las siguientes ecuaciones:

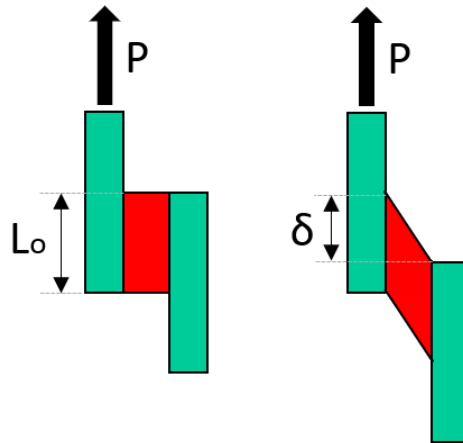
$$\tau = \frac{P}{A} \quad (22)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, P es la carga cortante aplicada a las muestras y A es el área de la sección sobre la cual se está aplicando la carga.

$$\gamma = \frac{\delta}{L_0} \quad (23)$$

Donde γ es la deformación angular, δ el desplazamiento y L_0 la longitud inicial.

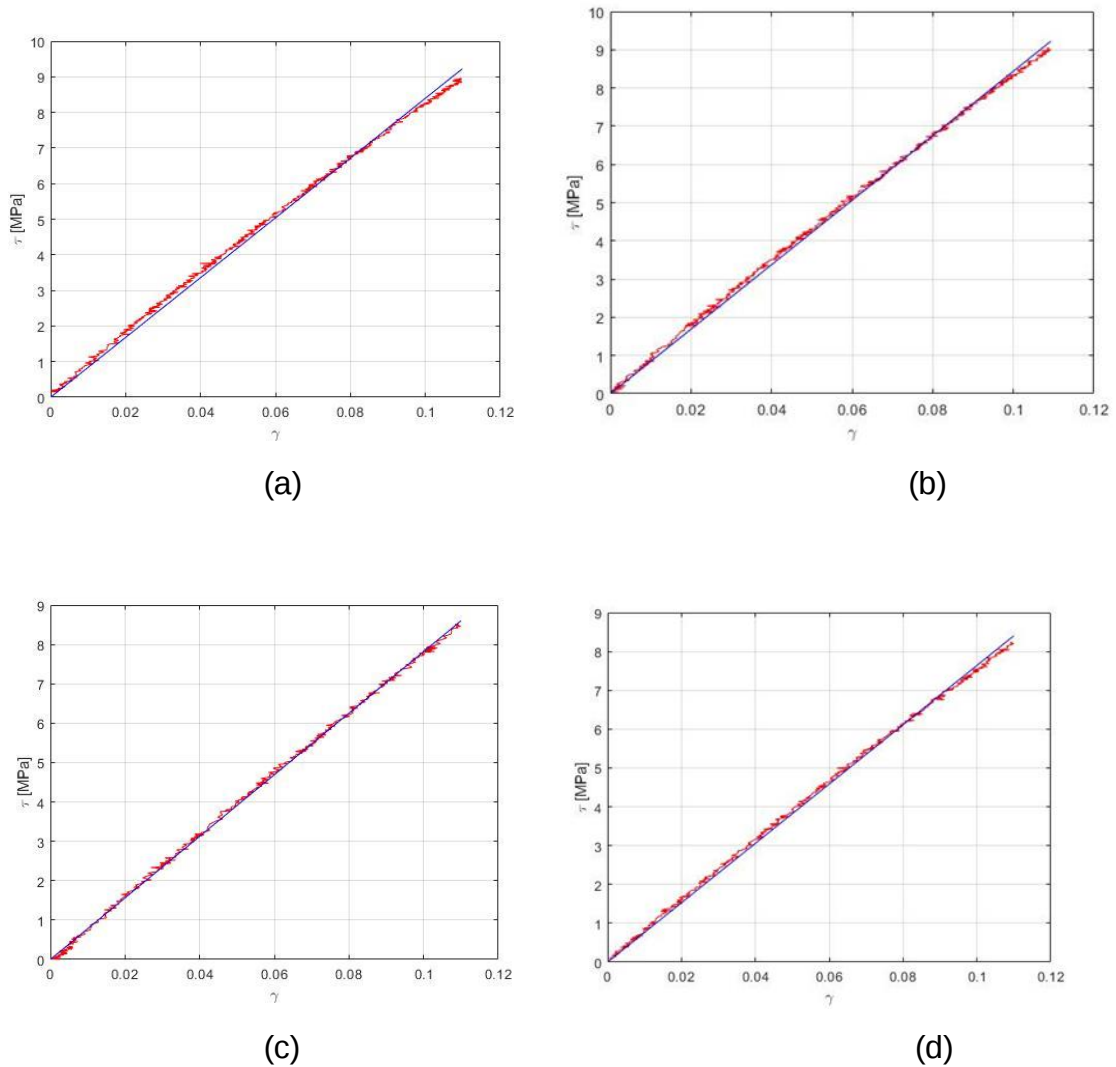
Figura 23. Geometría del ensayo cortante puro.



Fuente: Autores.

Con los datos de esfuerzo-deformación, se halla el módulo de rigidez teórico. Mediante el software Matlab se realiza la simulación del modelo elástico clásico utilizando la función mínimos cuadrados no lineales (LSQNONLIN) para hallar un ajuste entre los datos experimentales y el modelo simulado. De esta forma se obtienen los valores del módulo de rigidez para el ajuste que presento con respecto a la curva inicial y las siguientes gráficas para cada temperatura de curado 25°C, 45°C, 70°C Y 105°C respectivamente:

Figura 24. Esfuerzo vs deformación cortante puro para cada temperatura de curado (a) 25°C, (b) 45°C, (c) 70°C y (d) 105°C



Fuente: Autores.

En la figura 24 se muestra la curva color azul la cual es el valor teórico hallado mediante el modelo y la curva color rojo la cual representa el valor experimental obtenido mediante el ensayo. Para estas graficas se halla el coeficiente de correlación (R^2) el cual nos permite cuantificar la relación que hay entre una curva y la otra, obteniendo un rango para cada temperatura de curado que se observa en el siguiente cuadro:

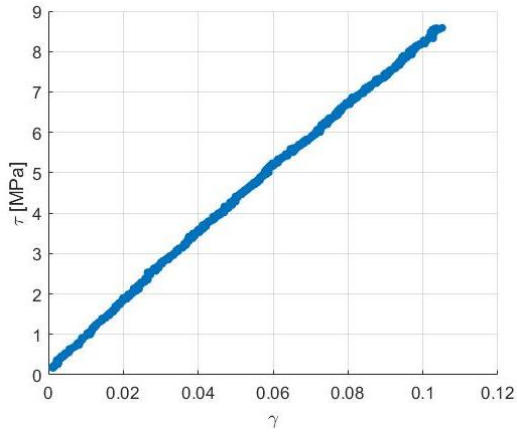
Cuadro 1. Coeficiente de correlación para esfuerzo vs deformación.

Temperatura de curado °C	$\bar{G}$	G máximo	G mínimo	Desviación estándar	$\bar{R}^2$	R^2 máximo	R^2 mínimo
25	84.2825	86.9490	80.6175	1.8123	0.9994	0.9996	0.9989
45	83.9751	87.6238	76.3495	3.1028	0.9994	0.9996	0.9991
70	79.9621	83.0686	75.6140	2.0697	0.9995	0.9996	0.9994
105	80.5351	84.3065	76.4617	2.0537	0.9995	0.9996	0.9992

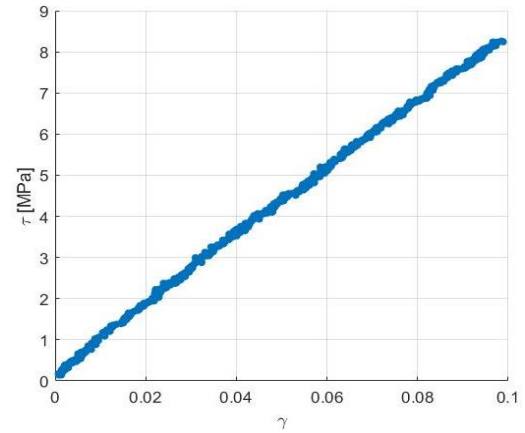
Fuente: Autores

Se puede observar en el cuadro 1 que se presentó un ajuste adecuado ya que el rango del coeficiente de correlación para cortante puro se encuentra entre 0.9996 y 0.9989, lo que representa que los valores experimentales del ensayo tienen un ajuste próximo a los valores teóricos.

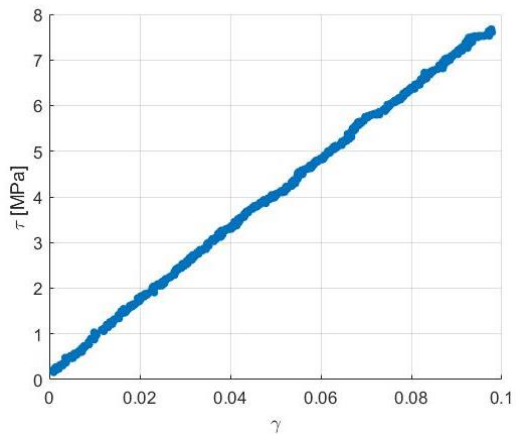
Figura 25. Comportamiento promedio de cada temperatura de curado (e) 25°C, (f) 45°C, (g) 70°C y (h) 105°C



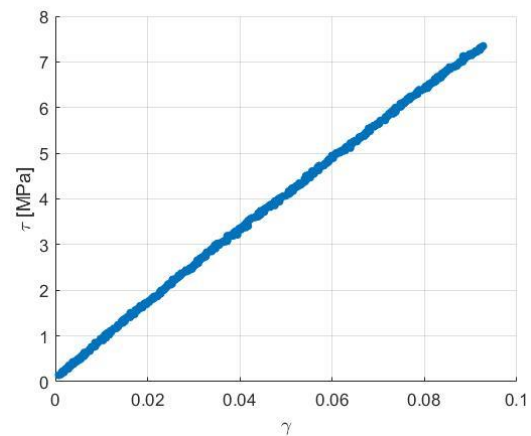
(e)



(f)



(g)

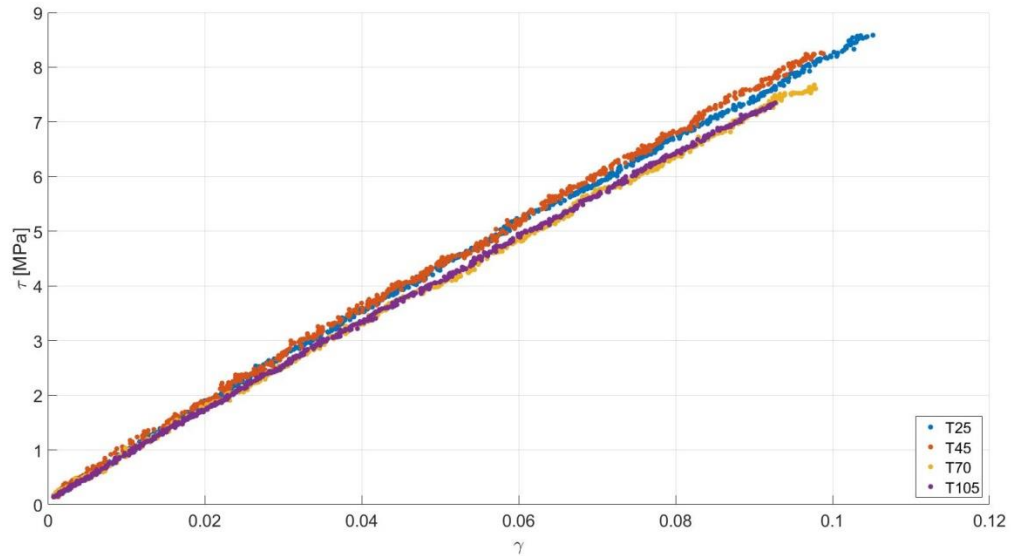


(h)

Fuente: Autores

La figura 25 representa los valores promedio de esfuerzo y deformación para cada temperatura de curado.

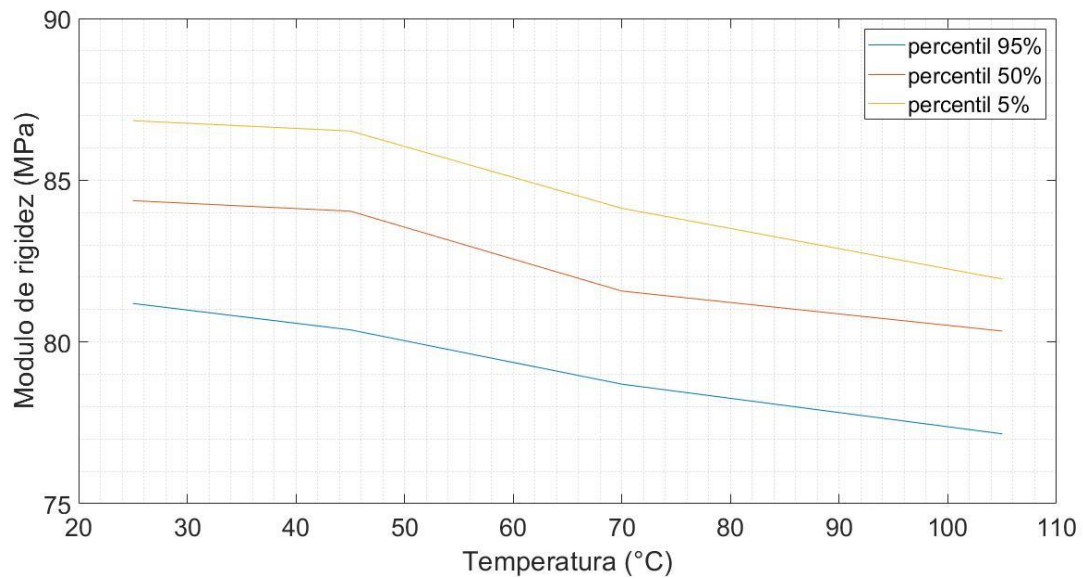
Figura 26. Comportamiento promedio de todas las temperaturas de curado ensayo cortante puro



Fuente: Autores.

La figura 26 nos muestra el comportamiento de cada temperatura de curado para τ vs γ y un promedio de los 20 ensayos realizados por cada T° , en la cual la T105° presenta una pendiente menor y la T25° presenta la mayor pendiente entre las temperaturas. Por otro lado, se evidencia un rango de variación bajo en el esfuerzo, lo que demuestra que entre temperaturas de curado no se ve afectada las pequeñas deformaciones en comparación entre ellas.

Figura 27. Influencia de la temperatura en el módulo de rigidez.

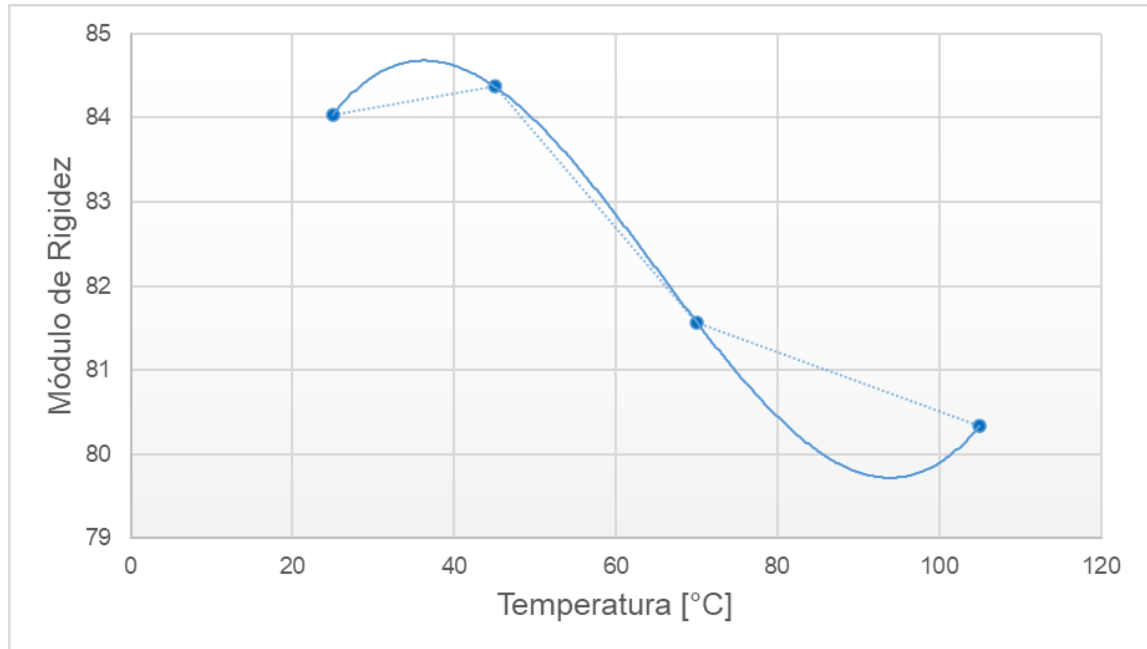


Fuente: Autores.

En la figura 27 se muestra la relación entre la temperatura de curado y el módulo de rigidez, para esta relación se utilizó el software Matlab con el cual se halló el percentil del 5%, 50% y 95% para cada muestra de 20 ensayos. En esta se aprecia un comportamiento inverso ya que a medida que aumenta la temperatura de curado disminuye el módulo de rigidez

Dependiendo de la aplicación deseada para el adhesivo si se necesita un módulo de rigidez pequeño, se lleva a una temperatura de curado alta. Es decir, a mayor módulo de rigidez se necesita mayor fuerza para producir deformación.

Figura 28. Curva interpolación Modulo de rigidez vs Temperatura de curado



Fuente: Autores.

Con la figura 28 se puede predecir el comportamiento de la curva mediante la ecuación hallada $G = 5e-05T^3 - 0.0101T^2 + 0.5279T + 76.343$ la cual nos muestra una nueva condición para cada punto común en un rango de temperatura de curado entre 25°C y 105°C.

Dependiendo de las condiciones y del montaje que se requiera se toma la temperatura de curado que más se ajuste a lo deseado.

4.2 FUERZA VS DESPLAZAMIENTO

En el ensayo cortante tipo sándwich se obtienen resultados de fuerza y desplazamiento en el dominio del tiempo, estos resultados son adecuados para realizar la gráfica fuerza vs desplazamiento experimental. Con los datos obtenidos y mediante la ecuación

$$E = \frac{PL^3}{48I\delta} \quad (24)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, P la carga aplicada, L la distancia entre apoyos, I la inercia y δ el desplazamiento.

Debido a que el momento de Inercia se halla teniendo en cuenta la sección transversal de la viga, y se representa así:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (25)$$

A lo cual aplicamos el método de la sección transformada con el cual se transforma toda la viga en un solo material homogéneo, donde por medio de la razón modular n obtenemos un momento de inercia en términos del módulo de elasticidad del adhesivo así:

$$I_T = I_a + nI_m = I_a + \frac{E_a}{E_m}I_m \quad (26)$$

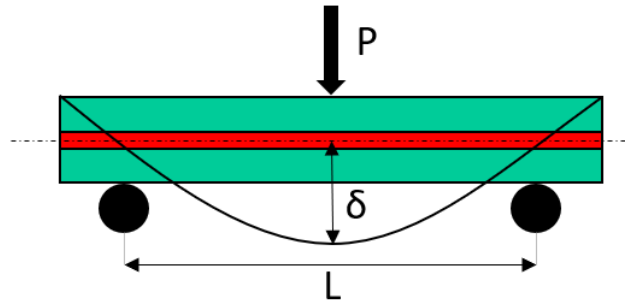
Donde I_T es el momento de inercia de la sección transformada, I_a es el momento de inercia de la sección del adhesivo, I_m es el momento de inercia de la sección del metal y n representa la razón modular del adhesivo y el metal.

Dado que E en la ecuación X representa el módulo de elasticidad del conjunto tipo sándwich, se utiliza la siguiente ecuación donde tenemos un módulo de elasticidad equivalente E_q y los módulos de elasticidad de cada componente con su respectiva fracción volumétrica, así:

$$E_q = XE_m + (1 - X)E_a \quad (27)$$

Donde X es la fracción volumétrica para el metal y $(1 - X)$ la fracción volumétrica para el adhesivo.

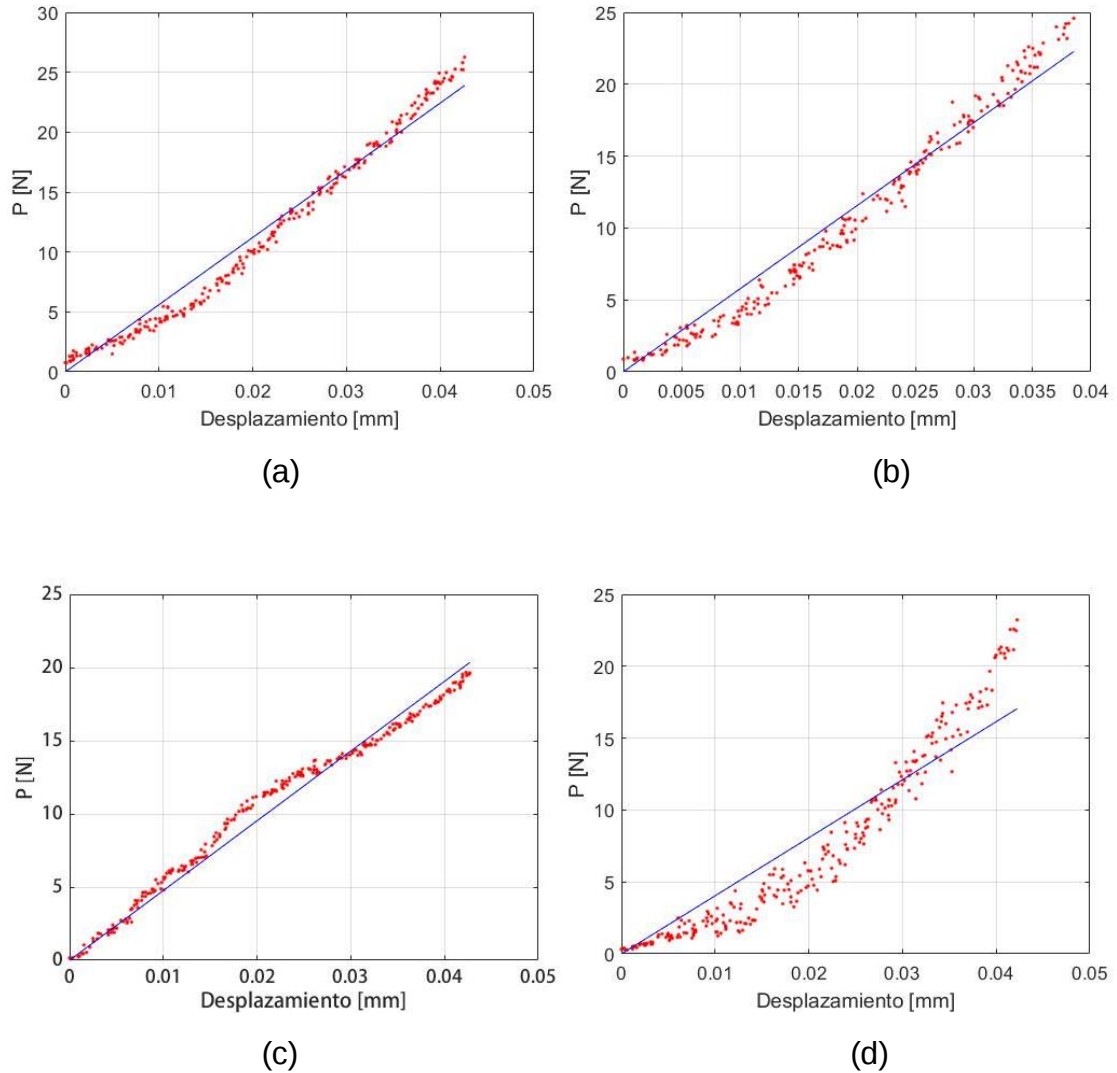
Figura 29. Geometría del ensayo cortante tipo sándwich.



Fuente: Autores.

Mediante el software Matlab se realiza la programación del modelo elástico clásico utilizando la función LSQNONLIN de la librería OPTIMIZATION TOOLBOX la cual se encarga de minimizar el error cuadrático de manera iterativa para este modelo, debido a que fue el que presento mejor ajuste con respecto a los datos obtenidos del ensayo y se obtienen los valores del módulo de elasticidad para el ajuste que presento con respecto a la curva inicial y las siguientes gráficas para cada temperatura de curado 25°C, 45°C, 70°C Y 105°C respectivamente:

Figura 30. Fuerza vs desplazamiento cortante tipo sándwich para cada temperatura de curado (a) 25°C, (b) 45°C, (c) 70°C Y (d) 105°C



Fuente: Autores.

En la figura 31 se muestra la curva color azul la cual es el valor teórico hallado mediante el modelo y la curva color rojo la cual representa el valor experimental obtenido mediante el ensayo. Para estas graficas se halla el coeficiente de correlación (R^2) el cual nos permite cuantificar la relación que hay entre una curva y la otra, obteniendo un rango para cada temperatura de curado que se observa en el siguiente cuadro:

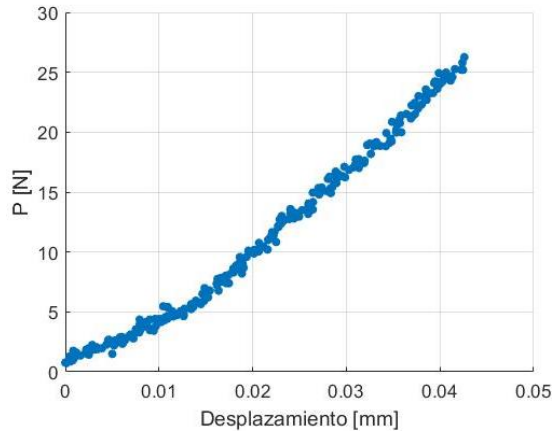
Cuadro 2. Coeficiente de correlación para fuerza vs desplazamiento.

Temperatur de curado °C	$\bar{E}$	E máximo	E mínimo	Desviación estándar	$\bar{R}^2$	R^2 máximo	R^2 mínimo
25	7.12E+07	9.42E+07	6.04E+07	1.58E+07	0.9303	0.9978	0.8374
45	4.97E+07	5.52E+07	4.27E+07	5.96E+06	0.9890	0.9962	0.9724
70	4.30E+07	5.80E+07	3.21E+07	1.21E+07	0.9934	0.9967	0.9873
105	1.65E+08	3.29E+08	9.37E+07	1.10E+08	0.9837	0.9992	0.9613

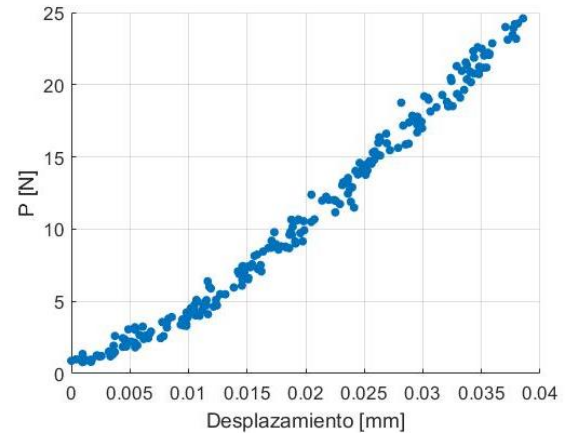
Fuente: Autores.

Se puede observar en el cuadro 2 que se presentó un ajuste adecuado ya que el rango del coeficiente de correlación para cortante tipo sándwich se encuentra entre 0.9992 y 0.8374, lo que representa que los valores experimentales del ensayo tienen un ajuste próximo a los valores teóricos.

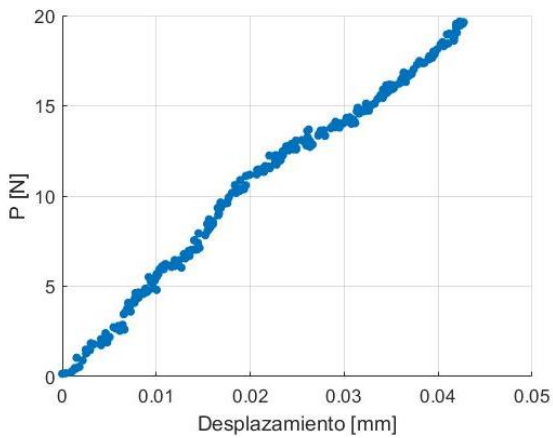
Figura 32. Comportamiento promedio de cada temperatura de curado (e) 25°C, (f) 45°C, (g) 70°C y (h) 105°C



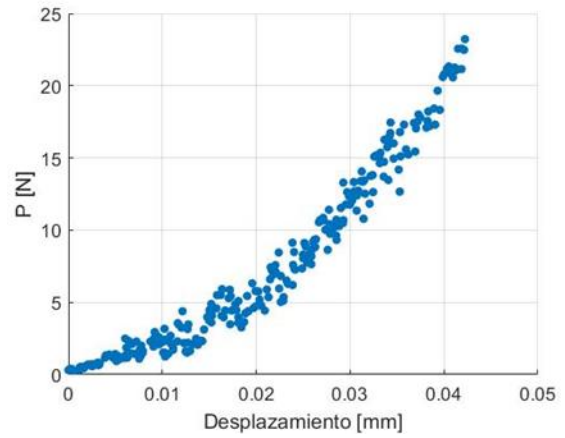
(e)



(f)



(g)

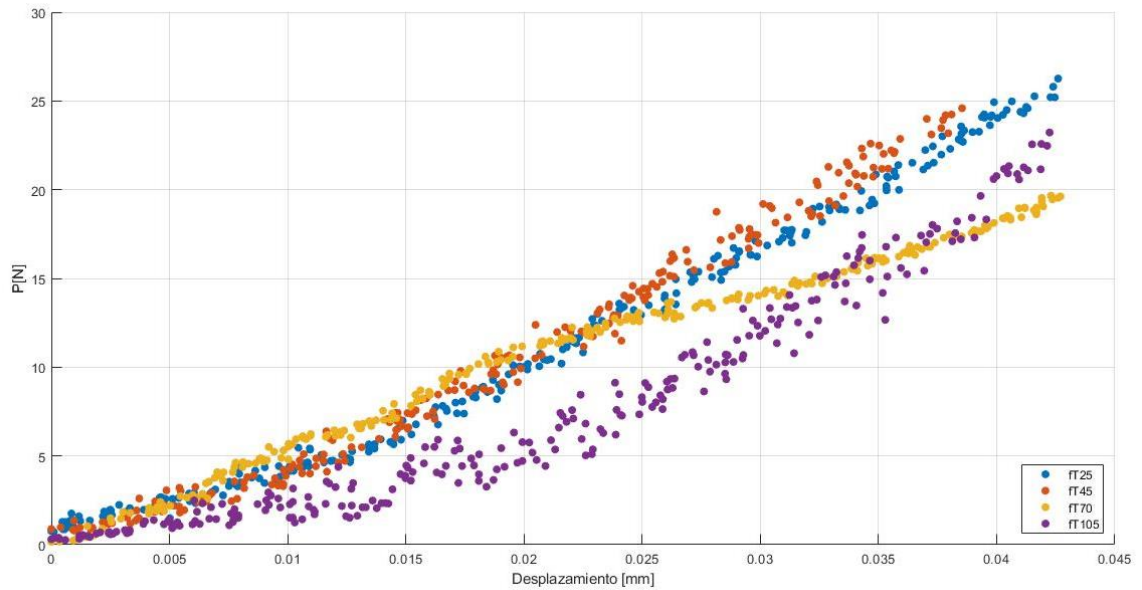


(h)

Fuente: Autores.

La figura 32 representa los valores promedio de esfuerzo y deformación para cada temperatura de curado.

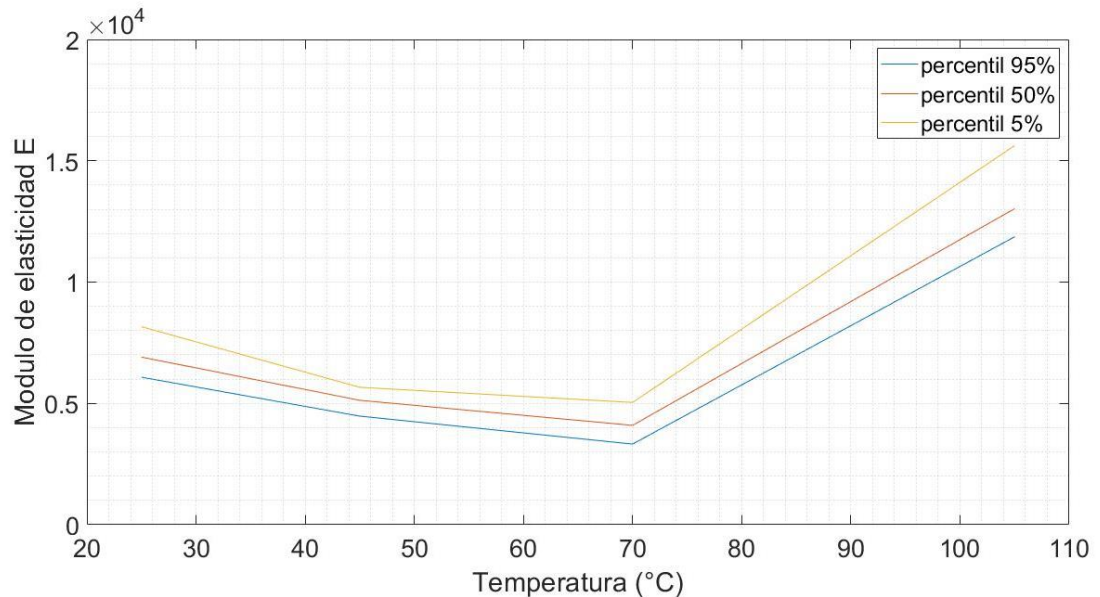
Figura 33. Comportamiento promedio de todas las temperaturas de curado ensayo cortante tipo sándwich.



Fuente: Autores.

La figura 33 nos muestra el resumen de los 6 ensayos realizados para cada temperatura de curado. El comportamiento de cada temperatura de curado para P vs δ , en la cual se observa que al aplicar una carga mayor con respecto a otras los rangos de desplazamiento en la zona elástica tienen una baja variación.

Figura 34. Influencia de la temperatura en el módulo de elasticidad.

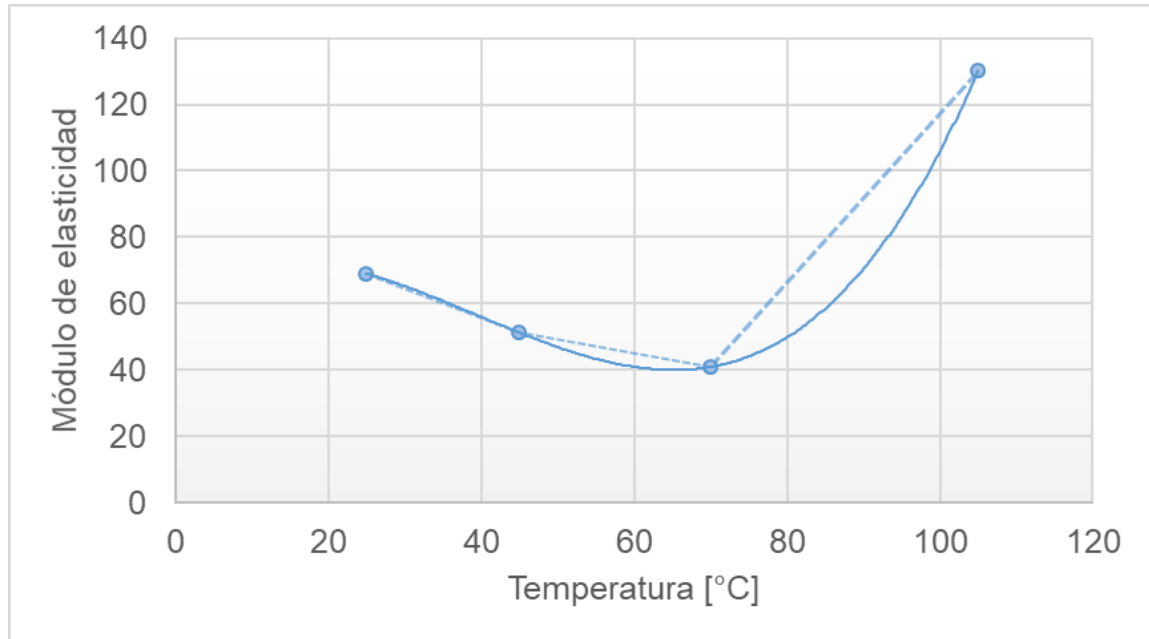


Fuente: Autores.

Según la figura 34 se muestra la relación entre la temperatura de curado y el módulo de elasticidad, para esta relación se utilizó el software Matlab con el cual se halló el percentil del 5%, 50% y 95% para cada muestra de 6 ensayos. Para temperaturas de curado de 25°C, 45°C y 70°C se muestra un comportamiento inverso, es decir, a medida que aumenta la temperatura de curado disminuye el módulo de elasticidad y para la temperatura de curado de 105°C muestra un comportamiento creciente lo cual posiblemente se debe a que la probeta para esta temperatura nunca tuvo fractura de adhesivo.

El módulo de elasticidad nos dice que tan rígido es un material, es decir, un módulo de elasticidad alto nos muestra un material más rígido, por tanto, se necesita más fuerza para producir deformación.

Figura 35. Curva interpolación Modulo de elasticidad vs Temperatura de curado



Fuente: Autores.

Con la figura 35 se puede predecir el comportamiento de la curva mediante la ecuación hallada $E = 0.0005T^3 - 0.0571T^2 + 1.2798T + 65.206$, la cual nos muestra una nueva condición para cada punto común en un rango de temperatura de curado entre 25°C y 105°C.

Dependiendo de las condiciones y del montaje que se requiera se toma la temperatura de curado que más se ajuste a lo deseado.

4.3 ESFUERZO VS LAMBDA

En el ensayo cortante puro se obtuvieron datos de fuerza y desplazamiento en el dominio del tiempo. Con estos resultados se pueden calcular los valores de esfuerzo y lambda mediante las siguientes ecuaciones:

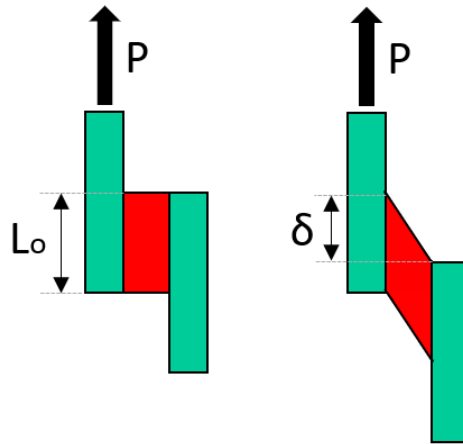
$$\tau = \frac{P}{A} \quad (28)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, P es la carga aplicada sobre la muestra y A es el área de la sección sobre la cual se está aplicando la carga.

$$\lambda = \frac{L_0 + \delta}{L_0} \quad (29)$$

Donde λ es el alargamiento principal, L_0 es la longitud inicial de la muestra y δ es el desplazamiento.

Figura 36. Geometría del ensayo cortante puro.



Fuente: Autores

Con los datos obtenidos de esfuerzo-lambda, se halla el módulo de corte

Al plantear este modelo hiperelástico, se asume un material con propiedades mecánicas isotrópicas e isotérmicas descrito en términos de la energía de deformación W y de las invariantes I_1 y I_2 , la invariante $I_3 = 1$ debido a que se asume un material incompresible.

$$W = \sum_{i,j=0}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (30)$$

Usando la ecuación (17) del modelo de Ogden para los factores

$$N = 2, \alpha_1 = 2 \text{ y } \alpha_2 = -2$$

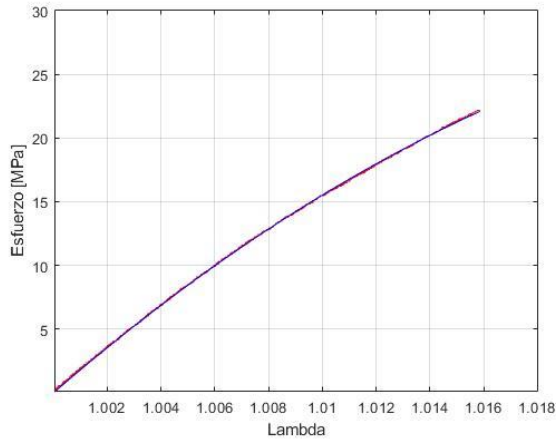
$$W = \frac{\mu_1}{\alpha_1}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + \frac{\mu_2}{\alpha_2}(\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) \quad (31)$$

Se toma como experimento uniaxial, isotrópico e incompresible, se tiene que:

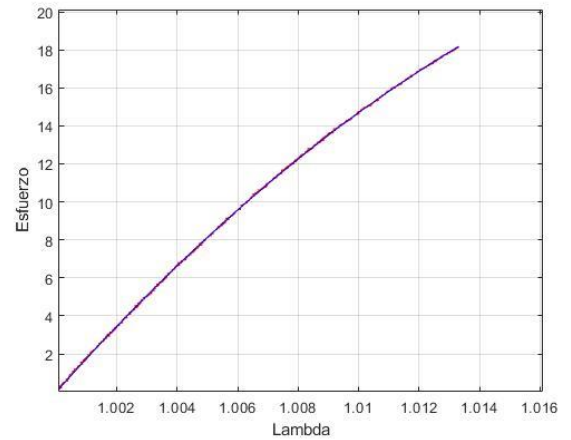
$$\sigma_1 = \mu_1(\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}) + \mu_2(\lambda_1^{-2} - \lambda_1) \quad (32)$$

Mediante el software Matlab se realiza la programación del modelo Mooney-Rivlin para materiales hiperelásticos utilizando la función LSQNONLIN de la librería OPTIMIZATION TOOLBOX la cual se encarga de minimizar el error cuadrático de manera iterativa para este modelo, debido a que fue el que presentó mejor ajuste con respecto a los datos obtenidos del ensayo y se obtienen los valores del módulo de corte para el ajuste que presento con respecto a la curva inicial y las siguientes gráficas para cada temperatura de curado 25°C, 45°C, 70°C Y 105°C respectivamente:

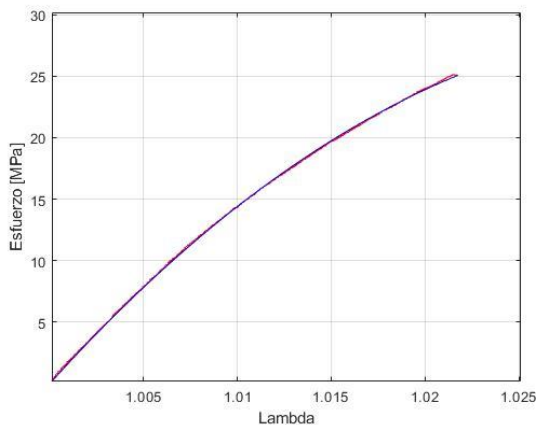
Figura 37. Esfuerzo vs lambda cortante puro para cada temperatura de curado, (a) 25°C, (b) 45°C, (c) 70°C y (d) 105°C



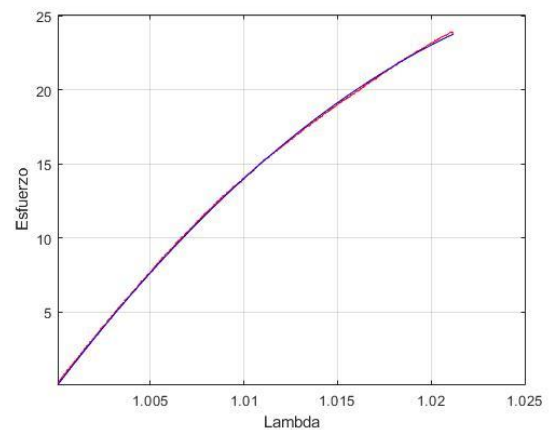
(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Autores.

En la figura 37 se muestra la curva color azul la cual representa el valor teórico hallado mediante el modelo programado y la curva color rojo representa el valor experimental obtenido mediante el ensayo. Para estas graficas el coeficiente de correlación (R^2) el cual nos permite cuantificar la relación que hay entre una curva y la otra, obteniendo un rango para cada temperatura de curado que se observa en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Coeficiente de correlación para esfuerzo vs lambda

Temperatura de curado °C	μ_1 promedio	μ_1 máximo	μ_1 mínimo	Desviación estándar	$\bar{R}^2$	R^2 máximo	R^2 mínimo
25	1.258E+04	1.718E+04	9.250E+03	2.486E+03	0.9997	0.9999	0.9991
45	1.086E+04	1.536E+04	6.987E+03	2.745E+03	0.9998	1	0.9994
70	7.140E+03	1.043E+04	5.537E+03	1.436E+03	0.9998	1	0.9995
105	7.024E+03	9.878E+03	4.570E+03	1.410E+03	0.9998	1	0.9994

Fuente: Autores

Se puede observar en el cuadro 3 que se presentó un ajuste deseado ya que el rango del coeficiente de correlación para el ensayo cortante puro se encuentra entre 0.9991 y 1, lo que representa que los valores experimentales del ensayo tienen un ajuste próximo a los valores teóricos.

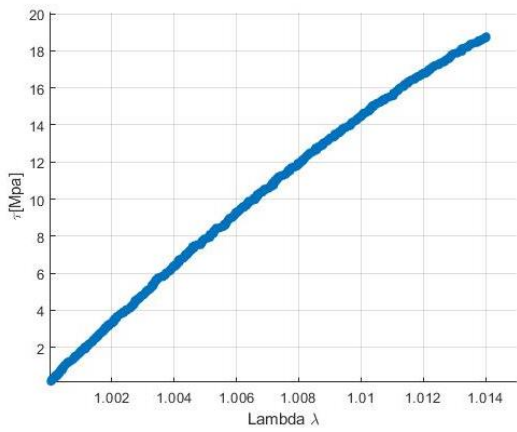
Cuadro 4. Coeficiente de correlación para esfuerzo vs lambda

Temperatura de curado °C	μ_2 promedio	μ_2 máximo	μ_2 mínimo	Desviación estándar	$\bar{R}^2$	R^2 máximo	R^2 mínimo
25	1.320E+04	1.782E+04	9.849E+03	2.497E+03	0.9997	0.9999	0.9991
45	1.146E+04	1.599E+04	7.578E+03	2.760E+03	0.9998	1	0.9994
70	7.695E+03	1.104E+04	6.053E+03	1.459E+03	0.9998	1	0.9996
105	7.571E+03	1.044E+04	5.068E+03	1.434E+03	0.9997	1	0.9994

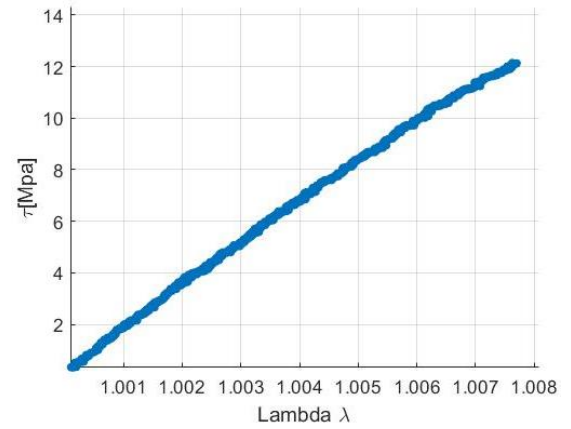
Fuente: Autores

Se puede observar en el cuadro 4 que se presentó un ajuste deseado ya que el rango del coeficiente de correlación para el ensayo cortante puro se encuentra entre 0.9991 y 1, lo que representa que los valores experimentales del ensayo tienen un ajuste próximo a los valores teóricos.

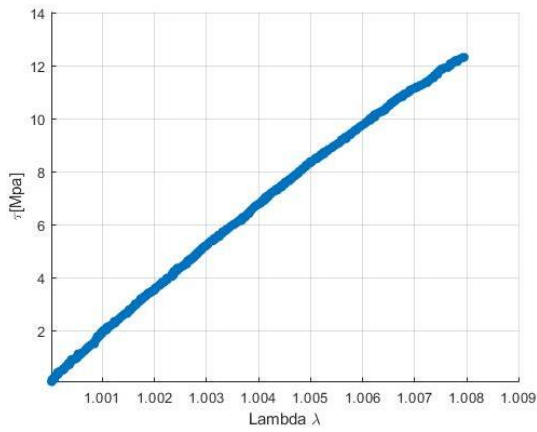
Figura 38. Comportamiento promedio de cada temperatura de curado (e) 25°C, (f) 45°C, (g) 70°C y (h) 105°C



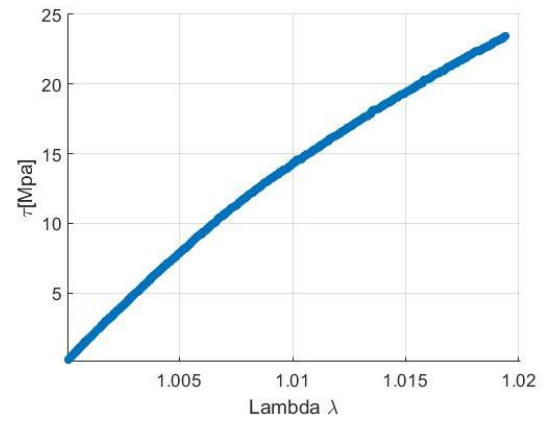
(e)



(f)



(g)

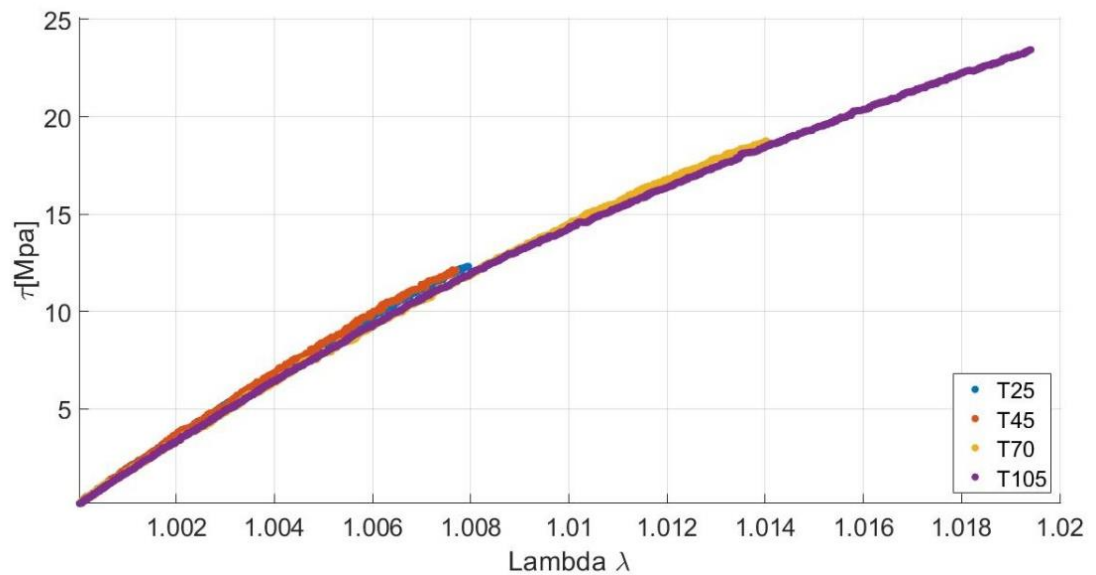


(h)

Fuente: Autores.

La figura 38 representa los valores promedio de esfuerzo y deformación para cada temperatura de curado.

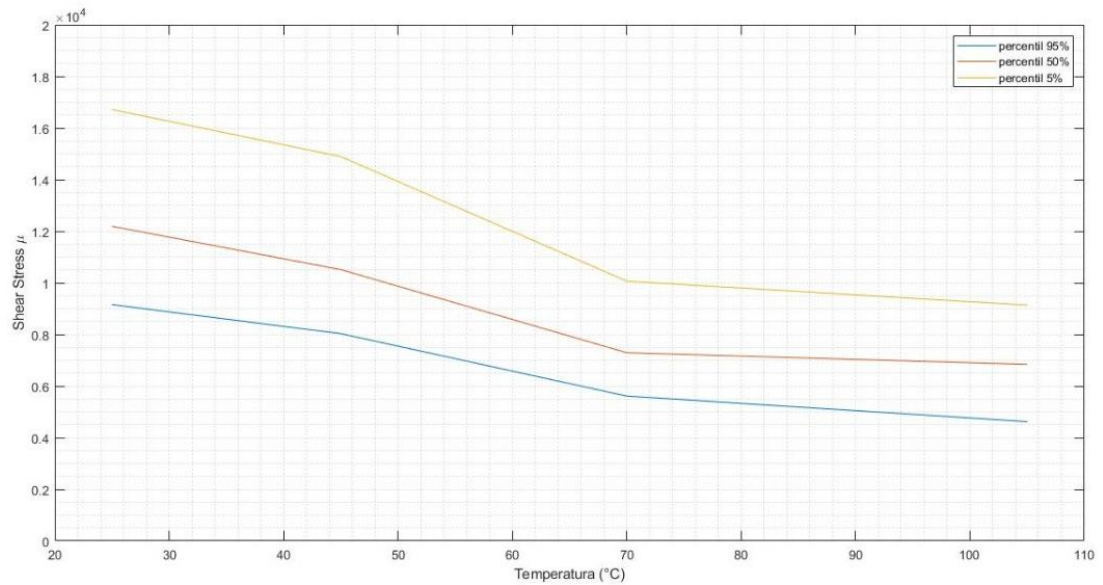
Figura 39. Comportamiento promedio de todas las temperaturas de curado ensayo cortante puro.



Fuente: Autores.

La figura 39 nos muestra el comportamiento de cada temperatura de curado para τ vs λ y un promedio de los 20 ensayos realizados por cada T° , en la cual la T105° presenta una pendiente menor y la T25° presenta la mayor pendiente entre las temperaturas. Por otro lado, se evidencia un rango de variación bajo en el esfuerzo, lo que demuestra que entre temperaturas de curado no se ve afectada las pequeñas deformaciones en comparación entre ellas.

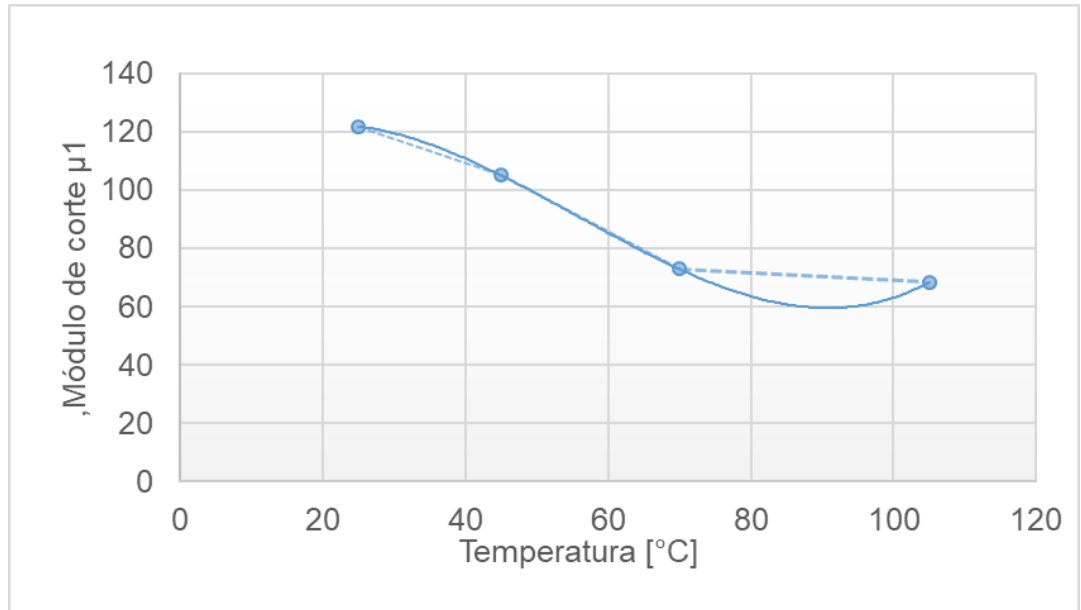
Figura 40. Influencia de la temperatura en el módulo de corte (μ_1)



Fuente: Autores.

En la figura 40 se muestra la relación entre la temperatura de curado y el módulo de corte, para esta relación se utilizó el software Matlab con el cual se halló el percentil del 5%, 50% y 95% para cada muestra de 20 ensayos. En esta figura se puede apreciar un comportamiento inverso, es decir, a medida que la temperatura de curado aumenta el módulo de corte disminuye.

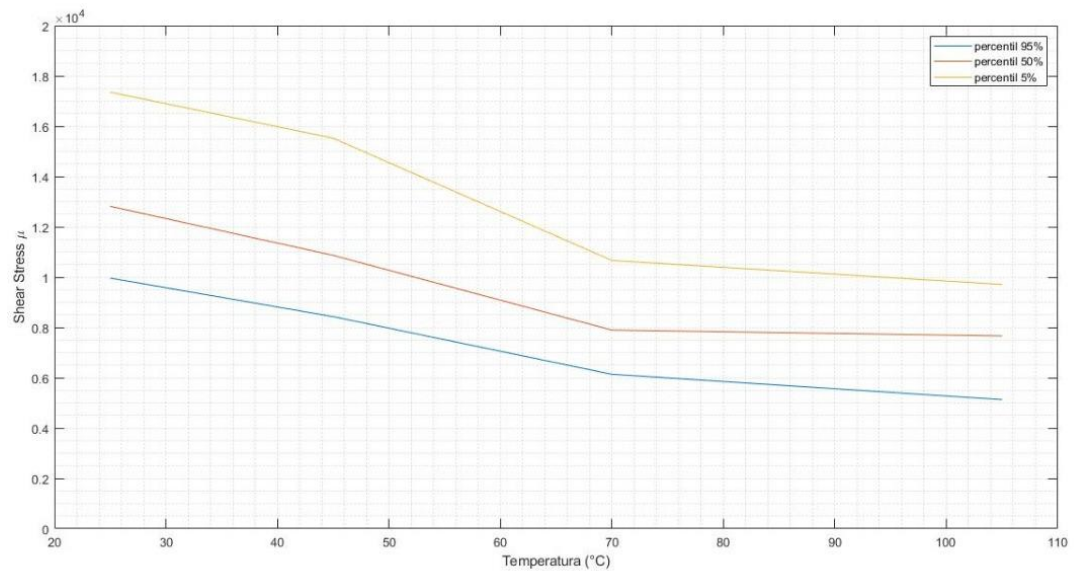
Figura 41. Curva de interpolación Modulo de corte vs Temperatura de curado.



Con la figura 41 se puede predecir el comportamiento de la curva mediante la ecuación hallada $\mu_1 = 0.0004T^3 - 0.0612T^2 + 2.0598T + 102.91$, la cual nos muestra una nueva condición para cada punto común en un rango de temperatura de curado entre 25°C y 105°C.

Dependiendo de las condiciones y del montaje que se requiera se toma la temperatura de curado que más se ajuste a lo deseado.

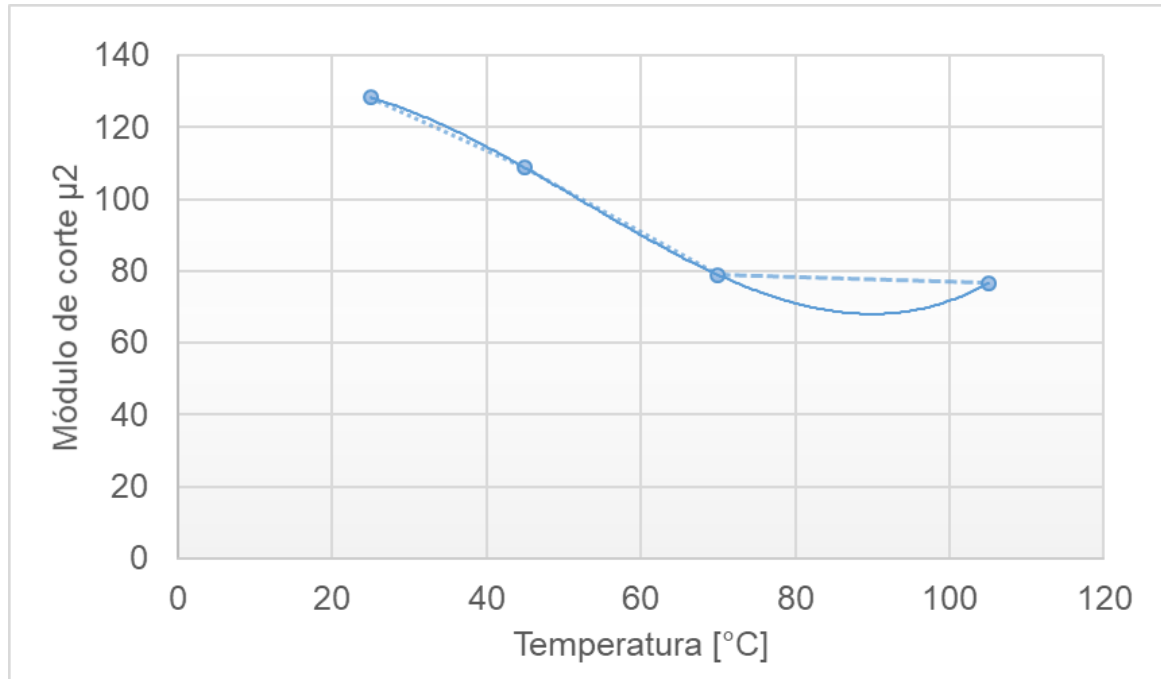
Figura 42. Influencia de la temperatura en el módulo de corte (μ_2)



Fuente: Autores.

En la figura 42 se muestra la relación entre la temperatura de curado y el módulo de corte, para esta relación se utilizó el software Matlab con el cual se halló el percentil del 5%, 50% y 95% para cada muestra de 20 ensayos. En esta figura se puede apreciar un comportamiento inverso, es decir, a medida que la temperatura de curado aumenta el módulo de corte disminuye.

Figura 43. Curva de interpolación Modulo de corte vs Temperatura de curado.



Con la figura 43 se puede predecir el comportamiento de la curva mediante la ecuación hallada $\mu_2 = 0.0003T^3 - 0.0459T^2 + 1.129T + 124.07$, la cual nos muestra una nueva condición para cada punto común en un rango de temperatura de curado entre 25 $^{\circ}\text{C}$ y 105 $^{\circ}\text{C}$.

Dependiendo de las condiciones y del montaje que se requiera se toma la temperatura de curado que más se ajuste a lo deseado.

5. CONCLUSIONES

Se puede observar el comportamiento mecánico del adhesivo epóxico eucodural 452 gel mediante el modelo Mooney Rivlin, este se ajusta completamente a la zona elástica y a grandes deformaciones para el ensayo cortante puro, como se observa en la figura 37, por otra parte, para las condiciones de cortante tipo sándwich (flexión) mostradas el modelo no se ajustó para grandes deformaciones.

Se puede observar el comportamiento mecánico del adhesivo epóxico eucodural 452 gel mediante el modelo clásico-elástico (ley de Hooke), en las figuras 24 y 30 se aprecia un ajuste adecuado en la zona elástica para ambos ensayos, así mismo, en los cuadros 1 y 2 se detallan los resultados del coeficiente de correlación (R^2) que hay entre los datos experimentales y teóricos, siendo estos valores cercanos a 1, es decir, el modelo experimental se aproxima al modelo teórico, lo cual representa un buen ajuste entre estas curvas.

Para el ensayo cortante puro y tipo sándwich no es favorable curar el adhesivo epóxico eucodural 452 gel, debido a que el módulo de rigidez y el módulo de elasticidad disminuye a medida que la temperatura de curado aumenta, es decir, si se requiere pequeñas deformaciones lo ideal es curar el adhesivo a temperatura ambiente.

Se simuló el comportamiento del material bajo un esfuerzo cortante puro y un esfuerzo cortante tipo sándwich (flexión), a través de una herramienta de cálculo computacional, generando un algoritmo basado en el método de mínimos cuadrados no lineales, para validar el comportamiento teórico del adhesivo.

Se establece que para el ensayo cortante puro se realizó un montaje óptimo ya que la máquina permitía seguir todas las recomendaciones de la norma (ASTM D1002-05), por otro lado, para el ensayo cortante tipo sándwich la máquina no presentaba

una disposición adecuada en cuanto al tamaño de los rodillos recomendados por la norma (ISO 14679:1997), obteniéndose así algunas cargas y desplazamientos no deseados.

RECOMENDACIONES

Con el fin de ampliar la investigación para caracterizar el comportamiento de adhesivos epóxicos se recomienda realizar ensayos a esfuerzos cortante con otros tipos de adhesivos, no solo con el adhesivo de resina epóxica eucodural 452 gel, para así poder observar el comportamiento mecánico de estos y comparar los resultados que se obtendrían para cada ensayo con diferentes tipos de adhesivos.

Realizar ensayos a esfuerzos cortante con otro tipo de montajes, para caracterizar el comportamiento mecánico del adhesivo epóxico y estudiar la favorabilidad del curado a diferentes temperaturas del adhesivo, ya que para el ensayo cortante puro y para el ensayo cortante tipo sándwich no fue favorable curar el adhesivo.

Se recomienda continuar con el estudio de la influencia de la temperatura de curado en las características de los adhesivos epóxicos bicomponentes realizando diferentes ensayos (tracción, compresión, fatiga, etc), para ampliar y mejorar la caracterización este tipo de material.

BIBLIOGRAFÍA

- 3M Science Applied to Life. «3m.» 2022. https://www.3m.com.es/3M/es_ES/union-y-montaje/formacion/ciencia-de-la-adhesion/tipos-de-tensiones-comunes-en-las-union-es-con-adhesivo/ (último acceso: 2021).
- American Society for Testing and Materials. «Norma ASTM D1002-05 Método de prueba estándar para la resistencia al cizallamiento de muestras de metal unidas por una sola unión adhesiva por carga de tensión “metal a metal”.» s.f.
- Antala Industria . «Antala Industria.» 2022. <https://www.antala.es/categoria/adhesivos-sellantes/epoxi/> (último acceso: 2022).
- Antala Speciality Chemicals. «Antala.» 7 de Mayo de 2017. <https://www.antala.es/clasificacion-adhesivos-industriales/> (último acceso: 2022).
- ASTM. «ASTM D1151-72 Standard Practice for Effect of Moisture and Temperature on Adhesive Bonds.» 16 de Agosto de 2017.
- Converzar. «Converzar.» 2020. <https://converzar.com/diseño-de-union-es-adhesivas/> (último acceso: 2022).
- Ebnesajjad, Sina . «elsevier.» 15 de Diciembre de 2010. <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-adhesives-and-surface-preparation/ebnesajjad/978-1-4377-4461-3> (último acceso: 2022).
- Euclid Chemical Toxement . «Toxement .» 2022. <https://www.toxement.com.co/productos/portafolio-productos/grouts-y-anclajes-para-obra-civil-equipos-y-maquinaría/ep%C3%B3xicos/?prodId=1588>.
- Fombuena , V, T Boronat, L Sanchez-N´acher, D Garc´ia-Sanoguera, y R Balart. «Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de.» *Grupo de Innovación de Prácticas Académicas (GIPA) materiales poliméricos* 1, nº 1 (2017).

- Galindo Moreno, D Juan Manuel . «Universidad de Malaga .» Junio de 2019.
https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/19489/AnalisisMaterialesViscoelasticos_NFU.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- Gomez , Alberto . «Linkedin.» 22 de Octubre de 2020.
<https://es.linkedin.com/pulse/ventajas-y-desventajas-de-las-uniones-adhesivas-alberto-g%C3%B3mez> (último acceso: 2021).
- González Carbonell, R A, E Álvarez García, J L Moya Rodríguez, y K Abreu González . «Modelos de materiales hiperelásticos para el análisis de los elastómeros usando el MEF.» *ResearchGate* 12, nº 3 (Septiembre 2009): 57-66.
- Guede , D, P Gonzalez , y J R Caeiro . «Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos.» *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral* 5, nº 1 (2013).
- Guillen, J. «upct .» 2008.
<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/46/Introduccion3.pdf?sequence=19&isAllowed=y> (último acceso: 2021).
- Holzapfel , Gerhard . *Nonlinear Solid Mechanics*. Other Wiley Editorial Offices, 2000.
- Iborra Conca , Alicia . «Universitat Politecnica de Valencia .» 2018.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/125916/TFG%20ALICIA%20IBORRA%20V6%20definitivo_15620834283061006520807187673227.pdf?sequence=1&isAllowed=y (último acceso: 2022).
- International Organization for Standardization. «Norma ISO 14679:1997 Adhesives - Measurement of adhesion characteristics by a three-point bending method.» 1997. 11.
- International Organization for Standardization. «Norma ISO 4588:1995 Directrices para la preparación de superficies metálicas.» 2020.
- Madrid , Mario . «2.ulpgc.es.» 2020.
https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf (último acceso: 2021).

- Materias FC y T UMSS. «materias.fcyt.umss.» 2022.
<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-44.pdf> (último acceso: 2022).
- Metaza . «Metaza .» 2022. <https://metaza.com.co/wp-content/uploads/2017/10/Ficha-t%C3%A9cnica-Acero-Hot-Rolled.pdf> (último acceso: 2022).
- Moreno , Miguel , Carlos Plazaola , Guadalupe Gonzalez , Maytee Zambrano , y Carmenza Spadafora . «knepublishing.» 6 de Enero de 2018.
<https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/1417/3438#info>.
- Navarro Ugena, Carlos, y Enrique Barbero Pozuelo. «Universidad Carlos III de MAdrid.» 2008. <http://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/elasticidad-y-resistencia-ii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo7.pdf> (último acceso: 2021).
- Rodriguez , Alejandro . «blog.blogmateria.» Enero de 2020.
<https://blog.blogmateria.com/2020/01/hiperelasticidad-modelo-de-ogden.html> (último acceso: 2022).
- Russell C., Hibbeler. *Mecanica de Materiales*. 6. Mexico: Pearson Educacion, 2020.
- Univeresidad Tecnologica Nacional . «<http://www.frlp.utn.edu.ar/>.» 2020.
<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qaplicada/Adhesivos.html> (último acceso: 2021).