

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**EFFECTOS EN PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEBIDO A LA VARIACIÓN DE TIEMPOS DE PERMANENCIA Y RAMPAS DE TEMPERATURAS DURANTE EL CICLO DE CURADO PARA LAMINADOS DE MATRIZ FENÓLICA CON REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**

**NICOLÁS DÍAZ SILVA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS**

**MEXICALI, B. C.**

**MAYO 2013**

## Contenido.

Contenido.....	2
Índice de Tablas.....	4
Índice de Figuras.....	5
1. Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1 Objetivo.....	9
1.2 Hipótesis.....	9
1.3 Metas.....	9
2. Capítulo 2. Marco Teórico.....	10
2.1 Materiales de Ingeniería.....	11
2.1.1 Metales y aleaciones.....	12
2.1.2 Cerámicos, vidrios y vitro-cerámicos.....	12
2.1.3 Polímeros (plásticos).....	13
2.1.4 Semiconductores.....	14
2.1.5 Materiales compuestos.....	14
2.2 Introducción a los materiales compuestos.....	16
2.3 Clasificación de los materiales compuestos.....	16
2.4 Fibras.....	20
2.5 Matriz.....	23
2.5.1 Materiales Termoestables.....	25
2.5.1.1 Resinas Poliéster:.....	25
2.5.1.2 Resinas Epóxicas:.....	25
2.5.1.3 Resinas Fenólicas:.....	25
2.5.1.4 Bismaleimida y Poliimida:.....	27
2.5.2 Materiales Termoplásticos:.....	27
2.6 Pre-Preg – Unidireccional y Bidireccional.....	28
2.7 Definición de un laminado.....	29
2.8 Código de orientación de capas en un laminado.....	30
2.9 Fabricación de laminados.....	31
2.9.1 Técnicas de moldeo de pre-preg.....	32
2.10 Metodología de manufactura.....	33
2.10.1 Fabricación a mano.....	33
2.10.2 Método de material pre-impregnado.....	34
2.10.3 Ventajas del método de pre-preg.....	36
2.10.4 Desventajas del método de pre-preg.....	37
2.10.5 Corte de material pre-preg.....	37
2.11 Procesamiento de materiales compuestos.....	39
2.11.1 Procesamiento en autoclave.....	39
2.11.2 Procesamiento con bolsa de vacío.....	40
2.11.3 Selladores de bolsas.....	41
2.11.4 Calentamiento.....	41
2.11.5 Técnicas de embolsado.....	42
2.12 Maquinado.....	43
2.12.1 Corte y maquinado de material compuesto.....	44
2.12.2 Operaciones de corte.....	45
2.12.3 Corte con Sierra eléctrica de materiales compuestos.....	45

2.12.4	Corte con Herramienta manual (enrutamiento) .....	46
2.13	Pruebas mecánicas en polímeros. ....	47
2.13.1	Prueba de corte. ....	48
2.13.2	Prueba de flexión. ....	48
3.	Capítulo 3. Análisis estadístico y metodología .....	49
3.1	Diagrama de flujo de pruebas. ....	50
3.2	Métodos de prueba del material pre-impregnado. ....	51
3.2.1	Prueba de adherencia del material .....	51
3.2.2	Prueba de flexibilidad del material .....	53
3.2.3	Prueba de contenido de volátiles .....	54
3.2.4	Prueba de contenido de resina sin volátiles. ....	54
3.2.5	Prueba de flujo de resina. ....	55
3.3	Moldeo panel de prueba (laminado). ....	56
3.4	Ciclos de curado propuestos. ....	61
3.5	Maquinado de especímenes de prueba. ....	64
3.6	Métodos de prueba del Laminado. ....	65
3.6.1	Método de prueba de corte con viga corta ASTM D 2344M-00 .....	65
3.6.2	Método de prueba de flexión ASTM D790-10 .....	67
3.6.3	Método de prueba para cálculo de contenido de resina ASTM D 2584-08.....	68
3.6.4	Método de prueba para cálculo de contenido de poros ASTM D 2734-09 .....	69
3.7	Análisis estadístico de datos. ....	70
4.	Capítulo 4 Resultados y discusión.....	71
4.1	Caracterización a nivel pre-preg.....	72
4.1.1	Prueba de adherencia del material (Tack). ....	72
4.1.2	Prueba de flexibilidad del material (Drape). ....	72
4.1.3	Prueba de contenido de volátiles y resina sin volátiles. ....	73
4.1.4	Prueba de flujo de resina. ....	73
4.2	Caracterización a nivel laminado. ....	74
4.2.1	Prueba de corte de material. ....	74
4.2.2	Prueba de flexión. ....	80
4.2.3	Prueba de contenido de resina y poros. ....	86
4.3	Análisis de datos. ....	89
4.3.1	Diagramas de dispersión.....	89
4.3.2	Gráfica de efectos principales.....	94
4.3.3	Prueba de igualdad de varianzas.....	98
4.3.4	Diagrama de caja. ....	101
4.3.5	Análisis de medias.....	105
5.	Conclusiones.....	109
6.	Glosario .....	111
7.	Referencias Bibliográficas.....	113

---

## Índice de Tablas.

<i>Tabla 1 Propiedades de las fibras de Carbono, Vidrio y Kevlar 49 a 20° C.</i> .....	21
<i>Tabla 2 Propiedades específicas de rigidez y resistencia.</i> .....	23
<i>Tabla 3 Comparación entre método moldeo en húmedo y moldeo con material pre-preg.</i> ..	35
<i>Tabla 4 Técnicas de corte de material pre-preg.</i> .....	38
<i>Tabla 5. Tipos de herramientas recomendadas para corte en materiales compuestos.</i> .....	45
<i>Tabla 6. Tabla de resultados para la prueba de adherencia.</i> .....	72
<i>Tabla 7. Tabla de resultados para la prueba de flexibilidad.</i> .....	72
<i>Tabla 8. Tabla de resultados para prueba de contenido de volátiles y resina sin volátiles.</i>	73
<i>Tabla 9. Tabla de resultados para flujo de resina.</i> .....	73
<i>Tabla 10. Tabla de resultados para esfuerzo al corte Interlaminar ciclo de curado A.</i> .....	74
<i>Tabla 11. Tabla de resultados para esfuerzo al corte Interlaminar ciclo de curado B.</i> .....	76
<i>Tabla 12. Tabla de resultados para esfuerzo al corte Interlaminar ciclo de curado C.</i> .....	78
<i>Tabla 13. Tabla de resultados para esfuerzo a la flexión ciclo de curado A.</i> .....	80
<i>Tabla 14. Tabla de resultados para esfuerzo a la flexión ciclo de curado B.</i> .....	82
<i>Tabla 15. Tabla de resultados para esfuerzo a la flexión ciclo de curado C.</i> .....	84
<i>Tabla 16. Tabla de resultados para contenido de resina y poros en ciclo de curado A.</i> .....	86
<i>Tabla 17. Tabla de resultados para contenido de resina y poros en ciclo de curado B.</i> .....	87
<i>Tabla 18. Tabla de resultados para contenido de resina y poros en ciclo de curado C.</i> .....	88

## Índice de Figuras.

<i>Figura 1. Resistencias representativas de diversas categorías de materiales. ....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Diversidad de partes de cerámica. ....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. Circuitos integrados para computadoras y otros dispositivos electrónicos. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. El ala en X de un helicóptero está formada con un polímero reforzado con fibra de carbono. ....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5. Clasificación de los materiales compuestos. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6. Configuración esquemática de varios materiales compuestos. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7. Diagramas tensión-deformación de las fibras de carbono, vidrio y Kevlar 49... 22</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8. Base de arma de fuego hecha de PEEK. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9. Rollo Pre-preg Unidireccional y Bi-direccional. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10. Código de orientación de laminado “Short-Hand”. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11. Prueba de vacío en un laminado. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12. Moldeo manual de un laminado de resina fenólica (panel de prueba). ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13. Máquina de corte automático de material pre-preg. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14. Procesamiento de paneles de prueba en Autoclave. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15. Patoles generados en un embolsado con cinta selladora de doble cara. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16. Corte de exceso de material mediante herramienta neumática. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 17. Sierra estacionaria banda de corte de diamante. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 18. Cortador neumático manual con disco de carburo. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 19. Típica curva esfuerzo-deformación para fibras, plásticos y elastómeros. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 20. Especímenes durante prueba de adherencia de material pre-preg. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 21. Espécimen durante prueba de flexibilidad de material pre-preg. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 22. Espécimen de material pre-preg para prueba de contenido de volátiles y contenido de resina sin volátiles. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 23. Espécimen después de una prueba de flujo de resina. ....</i>	<i>55</i>

---

<i>Figura 24. Limpieza placa de aluminio.</i>	56
<i>Figura 25. Colocación Plástico Antiadherente.</i>	57
<i>Figura 26. Moldeo material pre-impregnado.</i>	57
<i>Figura 27. Colocación Peel-ply.</i>	58
<i>Figura 28. Colocación cinta selladora.</i>	58
<i>Figura 29. Colocación termopares.</i>	59
<i>Figura 30. Colocación de material respirador.</i>	59
<i>Figura 31. Colocación puertos de vacío.</i>	60
<i>Figura 32. Prueba de vacío.</i>	60
<i>Figura 33. Diagrama ciclo curado A.</i>	61
<i>Figura 34. Diagrama ciclo curado B.</i>	62
<i>Figura 35. Diagrama ciclo curado C.</i>	63
<i>Figura 36. Diagrama maquinado de panel de prueba.</i>	64
<i>Figura 37. Espécimen colocado en accesorio para prueba de corte.</i>	66
<i>Figura 38. Espécimen colocado en accesorio para prueba de flexión.</i>	67
<i>Figura 39. Especímenes colocados en crisoles dentro de la mufla.</i>	68
<i>Figura 40. Especímenes después de la prueba de contenido de resina.</i>	69
<i>Figura 41. Arreglo de pruebas para caracterización a nivel laminado.</i>	70
<i>Figura 42. Gráfica de prueba mecánica ASTM D2344 para ciclo de curado A.</i>	75
<i>Figura 43. Gráfica de prueba mecánica ASTM D2344 para ciclo de curado B.</i>	77
<i>Figura 44. Gráfica de prueba mecánica ASTM D2344 para ciclo de curado C.</i>	79
<i>Figura 45. Gráfica de prueba mecánica ASTM D790 para ciclo de curado A.</i>	81
<i>Figura 46. Gráfica de prueba mecánica ASTM D790 para ciclo de curado B.</i>	83
<i>Figura 47. Gráfica de prueba mecánica ASTM D790 para ciclo de curado C.</i>	85
<i>Figura 48. Diagrama de dispersión de SBS vs % Resina.</i>	89

---

<i>Figura 49. Diagrama de dispersión de SBS vs % Poros.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 50. Diagrama de dispersión de Flex vs % Resina.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 51. Diagrama de dispersión de Flex vs % Poros. ....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 52. Diagrama de dispersión de % Poros vs % Resina. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 53. Gráfica de efectos principales para SBS.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 54. Gráfica de efectos principales para Flex. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 55. Gráfica de efectos principales para %Resina. ....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 56. Gráfica de efectos principales para %Poros. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 57. Prueba de igualdad de varianzas para SBS.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 58. Prueba de igualdad de varianzas para FLEX.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 59. Prueba de igualdad de varianzas para %Resina. ....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 60. Prueba de igualdad de varianzas para %Poros.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 61. Diagrama de cajas para SBS. ....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 62. Diagrama de cajas para FLEX. ....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 63. Diagrama de cajas para %Resina.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 64. Diagrama de cajas para %Poros. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 65. Análisis de media para SBS.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 66. Análisis de media para FLEX. ....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 67. Análisis de media para %Resina.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 68. Análisis de media para %Poros. ....</i>	<i>108</i>

# Capítulo 1. Introducción

En la actualidad los productos fabricados de materiales compuestos han encontrado una gama de aplicaciones muy amplia dentro de las diferentes industrias, como aeroespacial, automotriz y naval que han tomado ventaja del peso reducido para obtener vehículos más eficientes en combustible y disminuir emisiones. Uno de los principales problemas en el proceso de manufactura de materiales compuestos para uso aeroespacial es el alto índice de piezas defectuosas al final del proceso de curado de los mismos, si bien es cierto, la demanda se incrementa con el paso del tiempo, originando la necesidad de optimizar nuestros procesos disminuyendo los defectos en las piezas (De-laminaciones, arrugas en la superficie, etc.) (Ver **Glosario**). Debido a lo anterior, se desea desarrollar un análisis de las variables críticas en un ciclo de curado en que nos permita observar cómo es que afectan estas variables a las propiedades mecánicas del mismo y a la obtención de un laminado de buena calidad.

### **1.1 Objetivo.**

Analizar el efecto físico y mecánico que tienen las rampas de temperatura, temperatura de permanencia y tiempo durante un ciclo de curado.

### **1.2 Hipótesis.**

Las variables críticas para obtener un buen laminado de material compuesto durante su curado son el tiempo y la temperatura, al proponer rampas amigables y rampas agresivas será posible observar una diferencia a nivel laminado el cual afecta directamente a las propiedades mecánicas del mismo.

### **1.3 Metas.**

- Realizar un análisis a nivel panel de prueba con diversos ciclos de curado.
- Caracterización mecánica y físicamente, bajo normas ASTM, los materiales curados a diferentes ciclos.
- Estudiar la porosidad de los materiales curados a diferentes ciclos.
- Realizar un estudio de contenido de volátiles y resina del material pre-impregnado.

## **Capítulo 2. Marco Teórico**

## 2.1 Materiales de Ingeniería.

Existen varias formas de clasificar a los materiales de ingeniería, una de ellas consiste en describirlos en 5 grandes grupos:

1. Metales y aleaciones.
2. Cerámicos, vidrios y vitro-cerámicos.
3. Polímeros (plásticos).
4. Semiconductores.
5. Materiales compuestos.

Los diferentes grupos descritos anteriormente poseen diferentes características tanto en su estructura como en sus propiedades. Por ejemplo, la diferencia en la resistencia de cada tipo de material se describe en la **Figura 1.**<sup>[2]</sup>

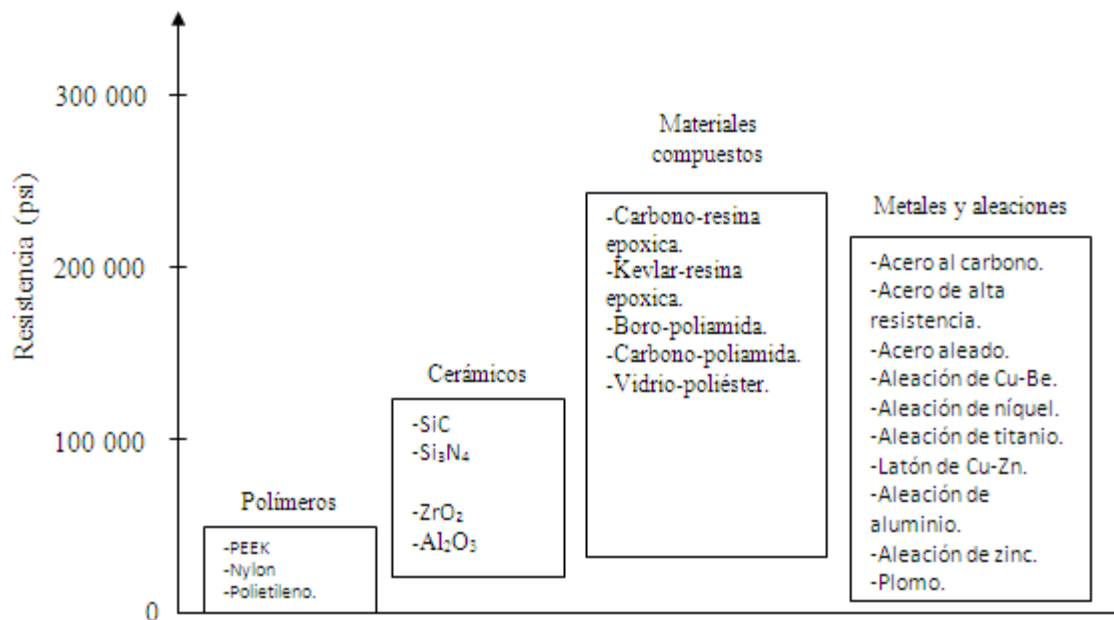


Figura 1. Resistencias representativas de diversas categorías de materiales.

### ***2.1.1 Metales y aleaciones***

Las aleaciones ferrosas, basadas en aleaciones hierro-carbono, incluyen los aceros al bajo carbono, los aceros aleados y para herramientas, los aceros inoxidable y los hierros fundidos. Estos son los materiales más ampliamente utilizados en el mundo. <sup>[2]</sup>.

Las aleaciones no ferrosas (es decir, aleaciones de elementos distintos al hierro) incluyen, pero no están limitados a, aleaciones base aluminio, cobre, níquel, cobalto, zinc, metales preciosos (como Pt, Au, Ag, Pd) y otros metales (por ejemplo, Nb, Ta, W). <sup>[2]</sup>.

En general, los metales poseen buena conductividad eléctrica y térmica, poseen una alta resistencia, rigidez, ductilidad o formabilidad y una buena resistencia a choques térmicos. <sup>[2]</sup>.

### ***2.1.2 Cerámicos, vidrios y vitro-cerámicos***

Los materiales cerámicos se pueden definir como materiales cristalinos inorgánicos, se utilizan en la actualidad para fabricar ladrillos, vajillas, artículos sanitarios, refractarios (materiales resistentes al calor) y abrasivos. En general debido a la presencia de porosidad, no conducen bien el calor y deben calentarse a altas temperaturas para que se fundan. Este tipo de materiales cerámicos son resistentes, duros y poseen gran resistencia a la compresión, sin embargo, son muy frágiles. <sup>[2]</sup>.

Dentro de los cerámicos se encuentran aquellos denominados “cerámicos avanzados”, los cuales se obtienen a partir de la refinación de cerámicos naturales y con procesos especiales. Ver **Figura 2**. <sup>[2]</sup>.



Figura 2. Diversidad de partes de cerámica.

### ***2.1.3 Polímeros (plásticos)***

Los polímeros son materiales orgánicos comunes. Se producen con un proceso llamado polimerización. <sup>[2]</sup>.

Un polímero es un material constituido al combinar varios monómeros o unidades. Los polímeros son materiales que consisten de moléculas gigantes o macromoléculas en cadena con pesos moleculares promedios de 10,000 a más de 1, 000,000 g/mol y que se forman al unir muchos monómeros o unidades mediante el enlace químico <sup>[2]</sup>.

La mayoría de los polímeros, sólidos o líquidos, son orgánicos basados en el carbono; sin embargo, también pueden ser inorgánicos (por ejemplo siliconas basadas en una red Si-O) <sup>[2]</sup>.

Dentro de sus aplicaciones se encuentran los chalecos antibalas, discos compactos (CD), cuerdas, ropa, entre muchas aplicaciones más. <sup>[2]</sup>.

### 2.1.4 *Semiconductores*

Los semiconductores base silicio, germanio y arseniuro de galio, como los que se usan en las computadoras y en electrónica (Ver **Figura 3.**), son parte de una clase más amplia, la de los materiales electrónicos. La conductividad eléctrica de los materiales semiconductores es intermedia entre la de los aisladores cerámicos y los conductores metálicos. Los semiconductores han activado la era de la información. En algunos de ellos, se pueden controlar el valor de la conductividad, lo que permite usarlos en dispositivos electrónicos como transistores, diodos y circuitos integrados [2].



Figura 3. Circuitos integrados para computadoras y otros dispositivos electrónicos.

### 2.1.5 *Materiales compuestos*

Los materiales compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para dar una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera. Los materiales compuestos se pueden seleccionar para obtener combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad [2].

Con materiales compuestos se pueden obtener materiales ligeros, resistentes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, fabricación de herramientas de corte duras pero resistentes al choque, que se romperían de no alear esos materiales. Como ejemplo de materiales compuestos se encuentran entre otros equipos deportivos como bicicletas, palos de golf, raquetas de tenis, etc. (Ver **Figura 4.**) <sup>[2]</sup>.



Figura 4. El ala en X de un helicóptero está formada con un polímero reforzado con fibra de carbono.

## 2.2 Introducción a los materiales compuestos.

Un material compuesto resulta de la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material. El material compuesto, tiene como objetivo tanto el obtener propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando aisladamente, como aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material. <sup>[3]</sup>.

Las propiedades que suelen ser de interés en estos materiales son:

- Resistencia Mecánica.            - Rigidez.
- Resistencia a la corrosión.   - Resistencia a la abrasión.
- Peso.                                - Resistencia a la fatiga.
- Aislamiento térmico.           - Aislamiento acústico.

## 2.3 Clasificación de los materiales compuestos.

Existe tal variedad de materiales compuestos que resulta difícil realizar una clasificación de aceptación general sobre todo teniendo en cuenta que cualquier clasificación si bien ayuda a resaltar aspectos comunes también oculta otros. La primera cuestión es acordar con respecto a qué factor se va a realizar la clasificación. Dado que la mayoría de los materiales compuestos fabricados lo han sido para mejorar propiedades mecánicas tales como resistencia, rigidez, tenacidad o propiedades a alta temperatura, parece razonable realizar la clasificación sobre el mecanismo que produce ésta mejora, el cual depende en gran medida de la geometría del refuerzo que se introduce dentro de un material base que se denomina matriz, siendo preciso inicialmente realizar la distinción entre fibra y partícula. Una fibra se distingue porque una dimensión, su longitud, es mucho mayor que las otras dos (las características de la sección transversal). El resto de los refuerzos están agrupados como partículas pudiendo ser esféricos, cúbicos, laminares o irregulares. <sup>[3]</sup>

En los compuestos de partícula, el refuerzo puede tener objetivos diferentes. En general, y a diferencia de lo que sucede en los compuestos de fibras, las partículas no

tienden a absorber una parte importante de la carga que soporta el material compuesto por lo que apenas si se mejora la resistencia del material base que forma la matriz. (Ver **Figura 5**).<sup>[3]</sup>

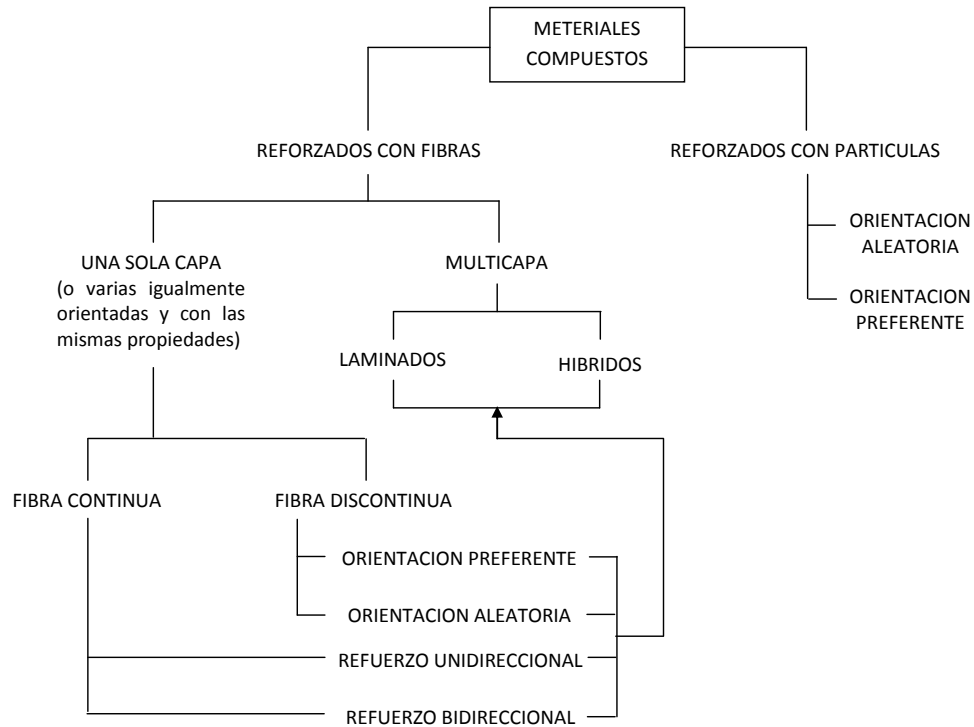


Figura 5. Clasificación de los materiales compuestos.

El refuerzo con partículas es, sin embargo, ampliamente usado para mejorar ciertas propiedades de los materiales bases que forman las matrices tales como la conductividad térmica y eléctrica, comportamiento a alta temperatura, reducir fricción, aumentar resistencia a la abrasión, maquinabilidad, dureza, etc., y en ciertos casos simplemente para reducir el costo de fabricación. Como ejemplo de estos fines puede citarse la inclusión del plomo en el acero y de aleaciones de cobre para mejorar su maquinabilidad. El plomo es también un lubricante natural en cojinetes hechos de aleaciones de cobre. Partículas de metales frágiles como el tungsteno, el cromo y el molibdeno son incorporados en metales dúctiles para mejorar sus propiedades a alta temperatura sin alterar sensiblemente su tenacidad a temperatura ambiente. Partículas inorgánicas son muy usadas para mejorar ciertas propiedades de los plásticos como la dureza.<sup>[3]</sup>

El uso de partículas en forma de láminas delgadas resulta atractivo por impartir de manera natural propiedades idénticas en todas las direcciones de un plano, lo que no resulta inmediato con el uso de fibras (Ver **Figura 6**). Adicionalmente, cuando las láminas se sitúan paralelas pueden alcanzar una participación en el volumen total del compuesto muy superior al caso de fibras y partículas con otra forma. Como ejemplo de aplicaciones de un compuesto de láminas delgadas puede citarse el uso de láminas de mica en aplicaciones de aislamiento térmico o eléctrico. Las láminas de aluminio son comúnmente empleadas en pinturas y capas de recubrimientos, orientándose paralelas a la capa. <sup>[3]</sup>.

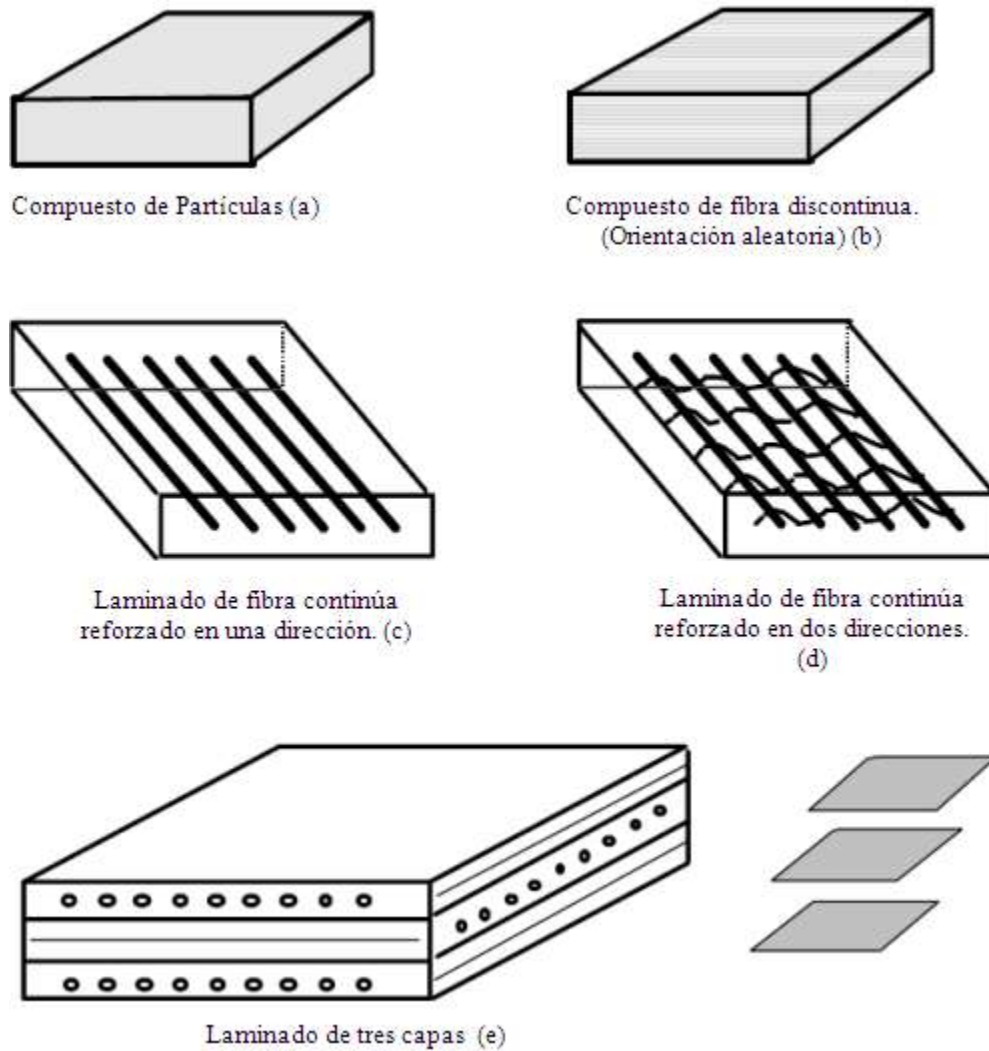


Figura 6. Configuración esquemática de varios materiales compuestos.

Los materiales compuestos reforzados con fibra, la otra gran rama de la clasificación, van a constituir en lo que sigue el objetivo de mayor interés, por sus aplicaciones en base a sus excelentes propiedades mecánicas. Experimentalmente se comprueba que la resistencia real de la mayoría de los materiales es sensiblemente inferior a la que teóricamente debería poseer por el tipo de estructura que el material tiene. La razón de esta discrepancia está en la existencia de imperfecciones en el material, de manera que cualquier acción encaminada a la reducción de éstas tiene un efecto beneficioso sobre la resistencia. En particular, las grietas que aparecen en sentido perpendicular a la dirección de la carga son particularmente negativas para la resistencia, estando ésta controlada en tales situaciones por tenacidad a fractura. Esto explica que un filamento de un material no polimérico exhiba una resistencia a la tracción en el sentido del filamento muy superior al mismo material pero con dimensiones del mismo orden en las tres direcciones, dado que se reduce la aparición de defectos en el filamento debido a las pequeñas dimensiones de la sección transversal. En el caso de los materiales poliméricos, es la orientación de la estructura molecular la responsable de la resistencia y rigidez.<sup>[3]</sup>

Sin embargo, las fibras, debido principalmente a las pequeñas dimensiones de la sección transversal, no son directamente usables en las aplicaciones ingenieriles. Son por ello embebidas en matrices para formar los materiales compuestos reforzados con fibras. La matriz une las fibras transfiriendo la carga (sobre todo en el caso de fibras discontinuas o cortas) y las protege contra agentes exteriores así como frente al daño derivado de su uso y manipulación.<sup>[3]</sup>

Los compuestos de fibras pueden de forma amplia clasificarse en compuestos de una sola capa o multicapa. En realidad los compuestos de una sola capa están generalmente formados también por múltiples capas, llamadas láminas, pero teniendo todas las mismas propiedades y orientación por lo que el laminado (resultante de la unión de varias láminas) se suele llamar de una capa, dado que sus propiedades y su modelo de análisis no se diferencia en nada del caso de una sola lámina. En general, los materiales compuestos que se usan en la mayoría de las aplicaciones estructurales están formados por diferentes láminas, dado que el espesor de cada una de ellas (del orden de 0,1 mm) hace inviable su uso aislado. Cuando todas las láminas son del mismo material (misma fibra y matriz y

volumen relativo de ambos), si bien con orientaciones diferentes debido a las necesidades de diseño, el material compuesto recibe el nombre de laminado, siendo la situación más común en Ingeniería. Dada la definición de laminado, la clasificación que afecta a las láminas (o laminados de una sola capa) afecta también a los laminados.<sup>[3]</sup>

El nombre de laminado híbrido se reserva para el caso de que las láminas sean de diferentes materiales constituyentes. Por ejemplo que unas láminas sean de fibra de vidrio y resina epoxy y otras de fibra de carbono y resina epoxy. Es posible, aunque no usual, que en una misma lámina se mezclen dos tipos diferentes de fibra. Laminados híbridos se han usado con éxito para la mejora de ciertas propiedades. Así, los laminados de fibra de carbono y matriz epoxy mejoran significativamente su resistencia al impacto cuando se introduce una pequeña cantidad de fibras de vidrio, con la ventaja adicional del bajo coste de éstas en comparación con las fibras de carbono.<sup>[3]</sup>

## 2.4 Fibras

Las fibras que son específicamente utilizadas para uso en la industria aeroespacial son clasificadas como materiales compuestos avanzados. Su tipo, su clasificación, su tamaño, y las propiedades mecánicas pueden ser optimizados cuando son utilizadas en conjunto con una matriz (resina) la cual soporta y transfiere de manera efectiva las cargas desde una fibra a otra.<sup>[1]</sup>

Las más usadas son las de carbono, vidrio, boro (en menor medida) y las orgánicas (Registradas como Kevlar). Las fibras de carbono tienen un diámetro de 7 a 8  $\mu\text{m}$  y sus propiedades dependen del grado de perfección de la orientación de los planos de las capas de grafito que deben estar orientadas paralelamente al eje de la fibra.<sup>[3]</sup>

Las fibras de carbono son frágiles y muestran una recuperación elástica del 100% cuando se someten a esfuerzos inferiores a los de rotura. Lógicamente las propiedades transversales de las fibras son muy inferiores a las longitudinales. Uno de los mayores problemas de las fibras de carbono es la variabilidad de sus propiedades, condicionadas en gran medida por su longitud ya que al aumentar ésta aumenta también la posibilidad de

existencia de un defecto. En lo que se refiere a las fibras de vidrio, se han usado muchas combinaciones de vidrios minerales. Todas tienen como base sílice ( $\text{SiO}_2$ ) con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio. (Ver **Tabla 1**).<sup>[3]</sup>

El vidrio E es el más usado por sus buenas propiedades de resistencia, rigidez, eléctricas y de desgaste. El C tiene una mayor resistencia a la corrosión química, pero es más caro y de menor resistencia. El S es también más caro que el E pero es más rígido y más resistente a la temperatura. El diámetro de las fibras de vidrio oscila entre 8 y 15  $\mu\text{m}$ . A diferencia de las fibras de carbono, las fibras de vidrio son isotrópicas, consecuencia directa de la estructura tridimensional de la red del vidrio. La resistencia a la rotura del vidrio viene en gran medida condicionada por el daño superficial que pueden sufrir al rozar entre sí durante su manipulación. Por ello se les suele aplicar una capa protectora que adicionalmente puede generar una unión química entre la superficie del vidrio y la matriz, creando una interface de alta resistencia.<sup>[3]</sup>

Propiedades	Unidades	Carbono Base PAN Tipo I	Carbono Base PAN Tipo II	Vidrio E	Kevlar 49 Poliamida
Diámetro	$\mu\text{m}$	7.0-9.7	7.6-8.6	8-14	11.9
Densidad	$10^3 \text{ kgm}^{-3}$	1.95	1.75	2.56	1.45
Módulo de Young $E_{11}$	GPa	390	250	76	125
Módulo de Young $E_{22}$	GPa	12	20	76	
Resistencia a la tracción	GPa	2.2	2.7	1.4-2.5 (típica) 3.5 (estirada recientemente)	2.8-3.6
Alargamiento de rotura	%	0.5	1.0	1.8-3.2	2.2-2.8
Coefficiente de dilatación térmica (0 a 100 C)	$10^{-6} \text{ C}^{-1}$	-0.5 a -1.2 (paralelo) 7-12 (radial)	-0.1 a -0.5 (paralelo) 7-12 (radial)	4.9	-2 (paralelo) 59 (radial)
Conductividad térmica (paralela al eje de la fibra)	$\text{W m}^{-1} \text{ C}^{-1}$	105	24	1.04	0.04

Tabla 1 Propiedades de las fibras de Carbono, Vidrio y Kevlar 49 a 20° C.

Las fibras orgánicas se fundamentan en la alta resistencia y rigidez teórica que se puede obtener de polímeros completamente alineados. Los valores reales se ven reducidos por los alineamientos imperfectos, los pliegues de las cadenas y por el valor finito de la longitud de la cadena. Al igual que sucede en las fibras de carbono, las fibras orgánicas tienen propiedades transversales muy inferiores a las longitudinales. De las fibras orgánicas, la más conocida y usada es la Kevlar de la que existen dos modelos, Kevlar 29 y 49, siendo éste último el de mejores prestaciones, aunque ninguno de los dos tiene

resistencia apreciable a compresión axial (ver **Figura 7**) . Sólo la fibra de Kevlar presenta una cierta ductilidad en la rotura con estrechamiento local en la zona de fractura. Desde el punto de vista de las propiedades absolutas puede decirse que la fibra de Kevlar es la más resistente y la de carbono la más rígida, siendo la de vidrio la menos resistente y la menos rígida, aunque la más barata. Dado que una de las razones del uso de los materiales compuestos es su bajo peso, es también interesante comparar entre sí los valores de resistencia y rigidez de las fibras en relación a la densidad (ver **la Tabla 2**).<sup>[3]</sup>

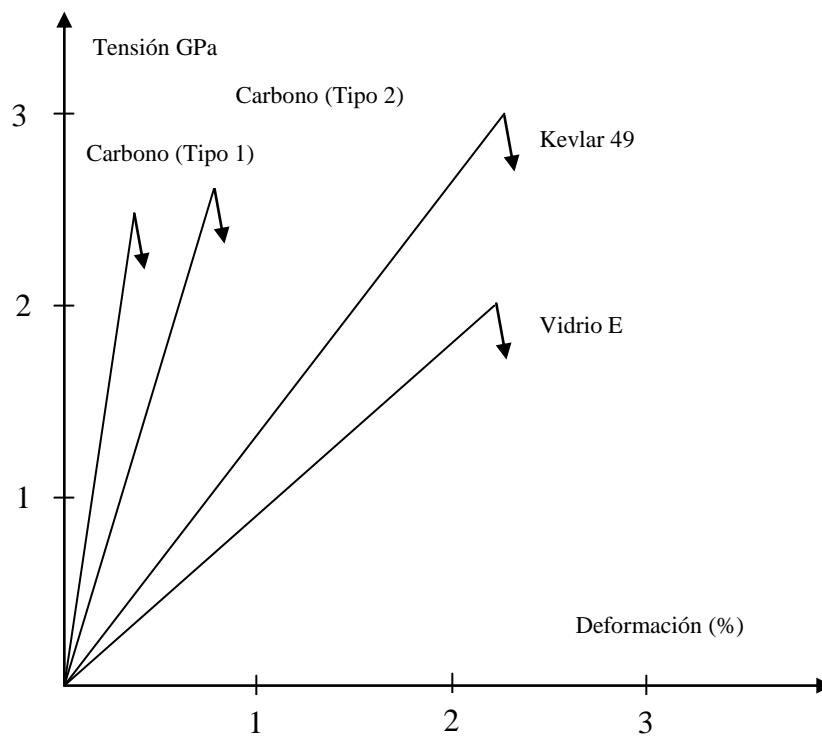


Figura 7. Diagramas tensión-deformación de las fibras de carbono, vidrio y Kevlar 49.

MATERIAL	Módulo de elasticidad E (GPa)	Resistencia a la tracción (Gpa)	Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia Especifica $\sigma_w/\rho$	Modulo Especifico E/ $\rho$
Fibras					
Vidrio-E	72.4	2.1	2.54	0.826	28.5
Vidrio-S	85.5	2.1	2.48	0.846	34.5
Grafito (Modulo alto)	390.0	2.1	1.90	1.1	205
Grafito (alta Resistencia a la tracción)	240.0	2.5	1.90	1.3	126
Boro	385.0	2.8	2.63	1.1	146
Sílice	72.4	5.8	2.19	2.65	33
Tungsteno	414.0	4.2	19.30	0.22	21
Berilio	240.0	1.3	1.83	0.71	131
Kevlar-49	130.0	2.8	1.50	1.87	87
Materiales convencionales					
Acero	210.0	0.34-2.1	7.8	0.043-0.27	26.9
Aluminio aleado	70.0	0.14-0.62	2.7	0.052-0.23	25.9
Vidrio	70.0	0.7-2.1	2.5	0.28-0.84	28.0
Tungsteno	350.0	1.1-4.1	19.30	0.057-0.21	18.1
Berilio	300.0	0.7	1.83	0.38	164

Tabla 2 Propiedades específicas de rigidez y resistencia.

## 2.5 Matriz.

La matriz en un material compuesto realiza dos papeles muy importantes. El primero es el de transferir las cargas al refuerzo y en segundo lugar protege el refuerzo de los efectos del medio ambiente. <sup>[1]</sup>

Existen esencialmente tres clases de material matriz- polímeros orgánicos, metales y cerámicos. Los materiales compuestos que son utilizados en la industria aeroespacial son de matriz polimérica. La selección del material matriz depende de la temperatura máxima de servicio considerada para su aplicación. Las matrices poliméricas son utilizadas a un máximo de 315 °C (600 °F) de exposición continua, dependiendo de sus características químicas. Entre los metales, la mayoría de las aleaciones de aluminio son utilizadas hasta 260 °C (500 °F) de exposición continua, con un corto plazo de capacidad de exposición hasta 343 °C (650 °F). Los cerámicos son capaces de soportar temperaturas que exceden los 1093 °C (2000 °F). <sup>[1]</sup>

De las tres categorías de matrices, las matrices poliméricas son las de más baja densidad teniendo como resultado los compuestos más ligeros. Por lo tanto, cuando la aplicación del mismo tiene una temperatura de servicio menor a los límites de temperatura,

estos generalmente son la mejor opción. Otra consideración respecto a la selección del material matriz para un compuesto son los requerimientos de procesamiento del mismo. <sup>[1]</sup>

La matriz puede ser considerada como material termoestable y material termoplástico:

- Los materiales termoestables son aquellos que requieren un ciclo de curado, a temperaturas elevadas o temperatura ambiente sobre un periodo de tiempo para formarse. <sup>[1]</sup>
- Los Termoplásticos por otra parte ya vienen sólidos, estos pueden ser formados o reformados con la adición de calor y presión. Teóricamente estos pueden ser formados y reformados muchas veces a comparación de los materiales termoestables que solo pueden ser formados una vez. <sup>[1]</sup>

Ambos materiales "termoplásticos" y "termoestables" son constituidos por cadenas moleculares. Mientras que las cadenas moleculares de los materiales termoestables son interconectadas con enlaces químicos (llamados entrecruzamientos) los materiales termoplásticos no. Debido a que hay diferencia en su estructura química, los materiales termoplásticos y termoestables tienen propiedades únicas. Aunque los materiales termoestables no puedan ser refundidos debido a los entrecruzamientos de sus cadenas, los termoplásticos si pueden. <sup>[1]</sup>

## **2.5.1 Materiales Termoestables.**

### **2.5.1.1 Resinas Poliéster:**

Por muchos años, los poliésteres han dominado el mercado como material compuesto reforzado con fibra de vidrio. Ejemplos de la mayoría de las aplicaciones de poliéster reforzado incluyen, cascos de barcos, cabinas para baño y tinas (spas), sistemas de aire acondicionado, ductos para aplicación automotriz, carrocería de automóviles, entre otros. Las resinas poliéster son generalmente las matrices de costo más bajo para un compuesto, como consecuencia de su amplia gama de usos. Sin embargo, debido a su baja capacidad de resistencia a la temperatura, baja resistencia al desgaste y bajas propiedades físicas comparadas con otras resinas, su uso en materiales compuestos avanzados es limitado.<sup>[1]</sup>

### **2.5.1.2 Resinas Epóxicas:**

La resina epóxica es la más común de las matrices con aplicación de material compuesto avanzado, además de tener una amplia gama de aplicaciones. Los epóxicos desempeñan este gran papel por su excelente adhesión, fuerza, baja contracción, protección de corrosión, versatilidad en procesamiento y muchas otras propiedades. Las resinas epóxicas proveen una buena adhesión con el refuerzo o con la superficie de otro material.<sup>[1]</sup>

Las aplicaciones de alto rendimiento de uso aeroespacial utilizan material llamado “pre-preg” en el cual las fibras son pre-impregnadas con resina. Las fibras pueden ser unidireccionales o tejidas. Su temperatura de servicio está en el rango de 121 a 177 °C (250 a 350 °F).<sup>[1]</sup>

### **2.5.1.3 Resinas Fenólicas:**

Las resinas fenólicas son limitadas pero de uso importante como material compuesto. Los fenólicos han sido utilizados durante muchos años como un todo, aplicaciones tales como apagadores eléctricos, cajas de conexiones, partes de automóvil moldeadas, manijas e inclusive bolas de billar. Su principal uso como resina reforzada con fibra son ductos de aire, alas y aletas de cohetes.<sup>[1]</sup>

El catalizador utilizado y la proporción de formaldehído con fenol determinan el tipo de resina que se produce. Las resinas fenólicas las cuales reaccionan con un catalizador ácido más formaldehído con fenol (proporción molar 0.9:1) son denominados novolacs y para aquellos que son preparados mediante el uso de un catalizador alcalino más formaldehído con fenol (proporción molar 0.9:1) son conocidos como resoles. Para ambos tipos de resinas se utiliza entre un 37 a 52% de solución en agua de formaldehído.<sup>[7]</sup>

#### ***2.5.1.3.1 Diferencias entre resinas Novolac y Resole.***

Novolac y Resole son productos de fenol y formaldehído, los cuales son conocidos como “resina fenólica”. Las diferencias entre Novolac y Resole, son las siguientes:<sup>[6]</sup>

- Novolac es producido utilizando exceso de fenol con un catalizador ácido mientras que el Resole utiliza exceso de formaldehído con un catalizador alcalino.<sup>[6]</sup>
- Comúnmente el Novolac es proveído de manera sólida, mientras que el Resole la mayoría de las veces es proveído en solución (utilizando agua o alcohol como solvente).<sup>[6]</sup>
- El Novolac no se cura por sí solo, requiere de un agente de curado extra, mientras que el Resole se cura por sí solo sin un catalizador adicional.<sup>[6]</sup>
- El Novolac tiene un largo periodo de vida útil, mientras que el Resole está limitado a tener un periodo de vida menor a 1 año.<sup>[6]</sup>

#### ***2.5.1.3.2 Propiedades de resinas fenólicas.***

Las resinas fenólicas ofrecen muchas propiedades útiles, tales como alta resistencia mecánica, estabilidad térmica y mecánica a largo plazo, excelente resistencia al fuego, baja generación de humo (debido a su estructura aromática), y una excelente capacidad de aislamiento térmico. Las resinas curadas exhiben una temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) de > 150 °C (302 °F). Las resinas fenólicas son ampliamente utilizados como material pre-impregnado en fibra para el proceso de moldeo manual.<sup>[6]</sup>

Las resinas fenólicas muestran tener una excelente estabilidad dimensional con un uso constante en un intervalo de temperatura de 180 a 200 °C (356 a 392 °F), así como una excelente resistencia a los productos químicos, la humedad y el calor; teniendo un comportamiento favorable contra el fuego y humo. La consideración predominante en el uso de resinas fenólicas como una matriz en materiales compuestos reforzados con fibra es el comportamiento que tiene contra el fuego. Los materiales compuestos de base fenólica tienen un mejor rendimiento bajo condiciones de fuego comparado con resinas epóxicas o vinil ester. Esto es debido a su capacidad de ignición retardada junto con una baja liberación de calor, baja generación de humo con poca o ninguna emisión de gases tóxicos, y la capacidad para proporcionar una retención significativa de resistencia (70%) a temperaturas de servicio de 300 °C (572 °F) durante 1 a 2 horas. Debido a esto los materiales compuestos de base fenólica son adecuados para su uso en aplicaciones críticas en donde la seguridad de los pasajeros en casos de incendio sea lo más importante.<sup>[6]</sup>

#### ***2.5.1.4 Bismaleimida y Poliimida:***

Las resinas bismaleimidadas (BMI) poseen muchas de las características que tienen las epóxicas, como manejo razonable, relativamente fácil de procesar y excelentes propiedades como material compuesto. Estos son superiores a los epóxicos en usos máximos de temperatura, teniendo un servicio de temperatura de 200 °C a 220 °C (392 °F a 428 °F) o mayor.<sup>[1]</sup>

Las resinas poliamidas están disponibles con una temperatura de servicio de 260 °C (500 °F) o más. Diferente a los BMI las poliamidas cuando son curadas generan una reacción de condensación, la cual libera volátiles durante el mismo. Esto genera un problema significativo debido a que causa porosidad en el laminado.<sup>[1]</sup>

#### ***2.5.2 Materiales Termoplásticos:***

Estas resinas generalmente tienen capacidades térmicas y mecánicas más allá de los termoplásticos convencionales y, en algunos casos, mejor que el poliéster y los epóxicos. La mejora de la tenacidad o resistencia al impacto es otro atributo sobre los materiales

termoestables. Los termoplásticos de alto rendimiento son usualmente más costosos. Entre los más importantes se encuentra: el Poliéster éter cetona (PEEK) y moléculas relacionadas (ver **Figura 8**). El desarrollo de estos termoplásticos de alto rendimiento es un área de investigación actualmente.<sup>[1]</sup>



Figura 8. Base de arma de fuego hecha de PEEK.

## 2.6 Pre-Preg – Unidireccional y Bidireccional.

El pre-preg (fibra impregnada con resina) unidireccional como su nombre lo indica, está constituido por el material que contiene los filamentos orientados en una sola dirección, por otra parte el pre-pre bi-direccional contiene fibras corriendo en dirección de 0 grados (dirección de pie) y 90 grados (dirección de trama), (ver **Figura 9**).<sup>[1]</sup>

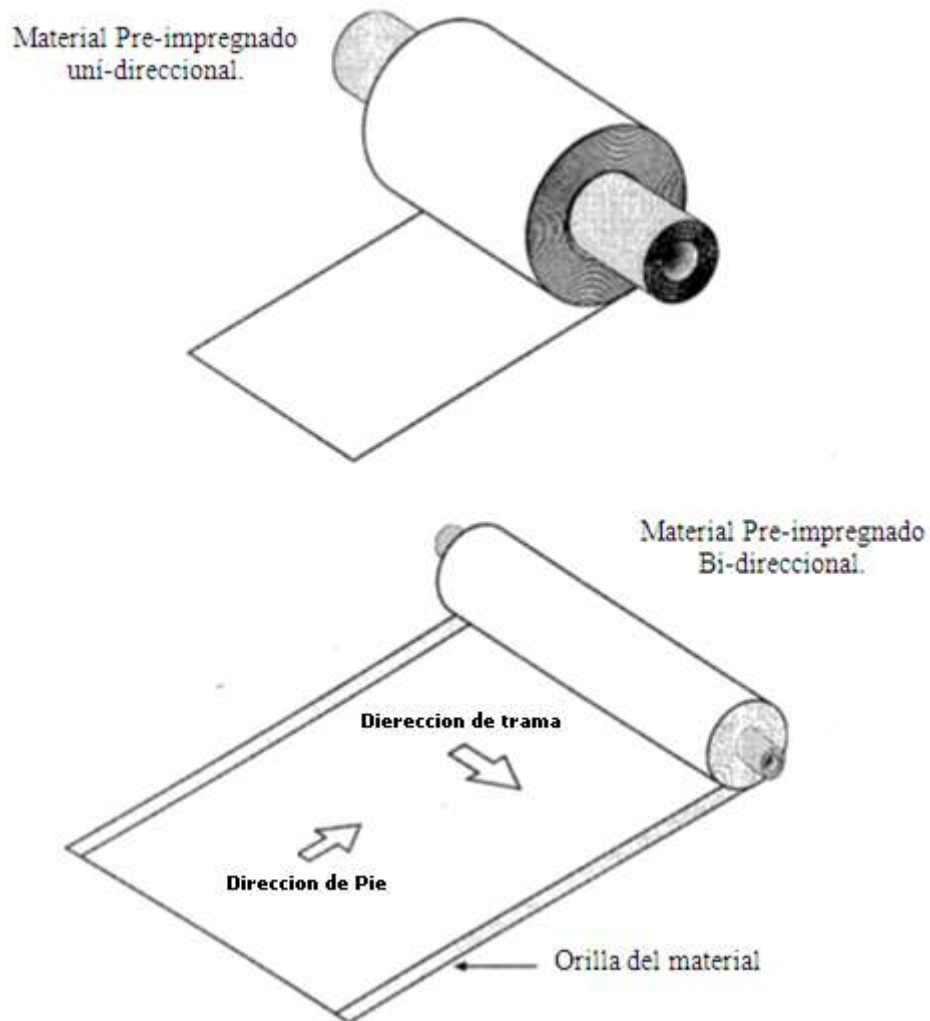


Figura 9. Rollo Pre-preg Unidireccional y Bi-direccional.

## 2.7 Definición de un laminado.

Un laminado estructural es diseñado para tener un acomodo de capas (Lay-up) de pre-pre específico, o arreglo de capas, esto basado en el criterio de diseño impuesto en el mismo. La orientación de las capas es la parte más importante de un laminado, una incorrecta colocación de las capas afectaría estructuralmente la propiedad de la parte y sería causa de rechazo. <sup>[1]</sup>

## 2.8 Código de orientación de capas en un laminado.

Para análisis de ingeniería y otras aplicaciones existe un código de orientación de laminado llamado “taquigrafía” o su expresión en inglés “shorthand” (ver **Figura 10**). [26]

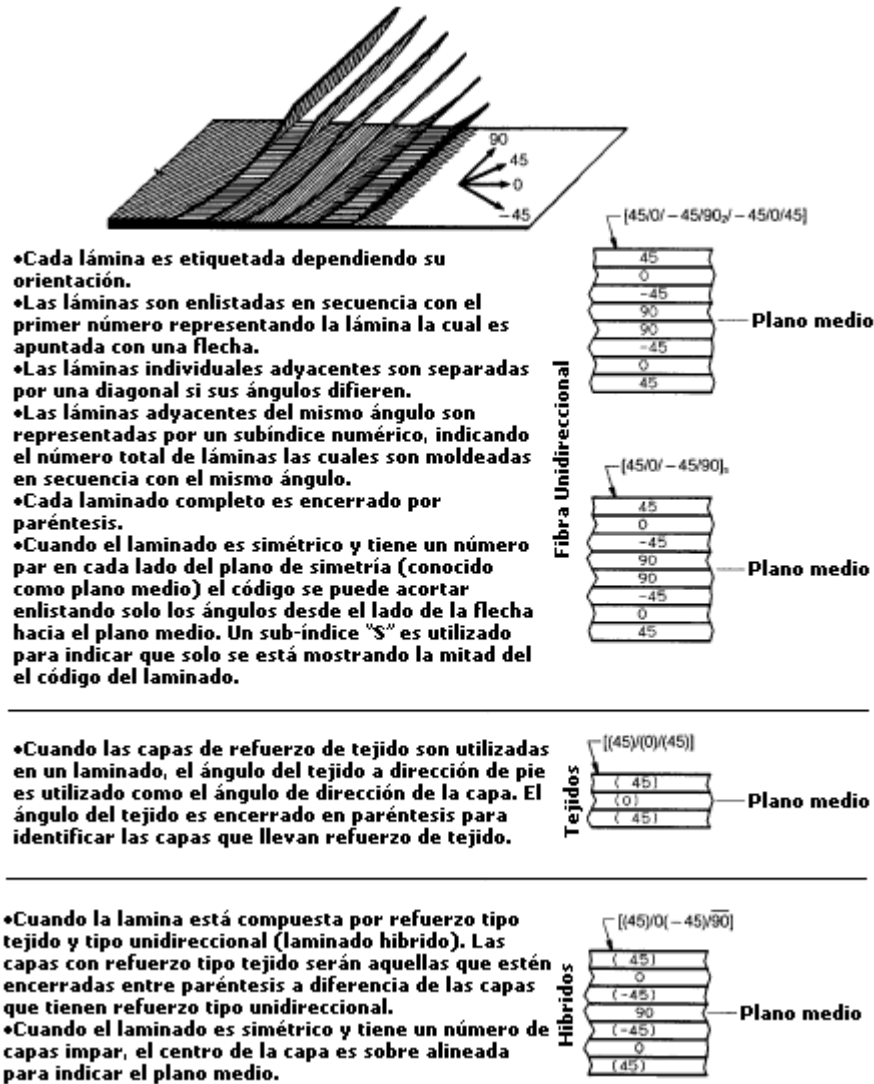


Figura 10. Código de orientación de laminado “Short-Hand”.

## 2.9 Fabricación de laminados.

Los laminados de partes estructurales pueden ser fabricados utilizando diferentes procesos. La mayoría de los laminados estructurales son fabricados utilizando pre-pregs (fibra impregnada con resina). El material pre-impregnado es inicialmente cortado y moldeado en un cuarto limpio. Estos laminados son sometidos a vacío durante un periodo de tiempo entre un determinado número de capas moldeadas (su expresión en inglés "Debulked").<sup>[1]</sup>

Una operación típica de este tipo (Debulking) consistiría en aplicar vacío al laminado durante un rango de 5 a 15 min, estas operaciones dependen de la geometría de la parte y el espesor; sin embargo estas operaciones son comúnmente utilizadas en los laminados cada tercera o quinta capa. La intención es sacar volátiles contenidos en el laminado y la compactación de capas.<sup>[33]</sup>

El laminado moldeado es embolsado en el cuarto limpio (se conoce como bolsa de vacío), la intención del embolsado es el mantener el vacío en la parte para la eliminación de volátiles, compactación de las capas así como el evitar la contaminación del laminado. Posteriormente se coloca dentro del Horno o Autoclave.<sup>[1]</sup>

Una vez iniciado el proceso de moldeo colocando la primera capa en el molde, se debe revisar para el caso del material pre-impregnado, que todas las burbujas de aire sean trabajadas de tal manera que se eliminen de la capa moldeada, para este tipo de actividad se pueden utilizar palas plásticas (ver **Figura 11**).<sup>[1]</sup>

Es importante revisar que el laminado esté correctamente embolsado antes de ser colocado dentro del horno o autoclave, como por ejemplo:

- Prueba de vacío: consiste en conectar un medidor de vacío al laminado (embolsado) el cual a su vez está conectado a una fuente de vacío, posteriormente se elimina esa fuente de vacío y se mide la pérdida de vacío que llegue a tener el laminado en un periodo de tiempo determinado. Un flujo razonable de pérdida de vacío es de 1 a 3

pulgadas por minuto. En caso de que la pérdida de vacío sea inaceptable, se procede a una reparación del embolsado o en su defecto al reemplazo del mismo. <sup>[1]</sup>

- Colocación del termopar en el laminado: Las lecturas del termopar así como el sellado del mismo dentro de la bolsa de vacío debe de ser verificado. <sup>[1]</sup>



Figura 11. Prueba de vacío en un laminado.

### ***2.9.1 Técnicas de moldeo de pre-preg.***

Es esencial que el material pre-impregnado de aplicación estructural contenga una buena calidad en sus propiedades de flexibilidad y adherencia (por su nombre en inglés “drape” y “tack”, respectivamente). <sup>[1]</sup>

La adherencia (Tack), debería de ser lo suficientemente adecuada para adherir el material pre-impregnado al molde y sobre las capas anteriormente moldeadas aplicando una ligera presión sobre la capa a moldear. La propiedad de flexibilidad, es la propiedad del material pre-impregnado el cual lo hace lo suficientemente suave para permitir que el material se amolde a la superficie del molde. <sup>[1]</sup>

Las propiedades de Adherencia y flexibilidad del material pre-impregnado son modificadas dependiendo de las condiciones locales de fabricación. Idealmente, la sensibilidad de temperatura y humedad son minimizadas en cuartos limpios (contienen control de aire acondicionado y presión positiva). La presión positiva en el cuarto limpio es

mantenida por filtros, la presión debe de ser lo suficientemente alta para prevenir la entrada de partículas al cuarto limpio.<sup>[1]</sup>

Otra buena práctica como método de moldeo, es el de cortar en tiras el material pre-impregnado en aquellas partes de geometría compleja y donde se puedan generar arrugas. Es importante que en aquellas áreas de la parte moldeada donde se manejen altos valores de stress, se generen patrones de material pre-impregnado en donde las uniones no deben de coincidir, se recomienda realizar un traslape de 0.5 in (1.3 cm).<sup>[1]</sup>

## **2.10 Metodología de manufactura.**

Los métodos de manufactura de materiales elegidos por sus propiedades mecánicas especiales son contruidos sobre el principio de la optimización de propiedades de esos materiales. Por lo tanto siempre se ha comprometido la elección del tipo de manufactura contra las propiedades mecánicas. En la mayoría de las aplicaciones en la industria aeroespacial esta tendencia continuará, y es responsabilidad del fabricante el entender los métodos de manufactura para maximizar las características de las propiedades mecánicas.<sup>[1]</sup>

El paso principal en la manufactura de laminados de material compuesto reforzado con fibra es el “arreglo de capas” (por su expresión en inglés “Lay up”), el cual consiste en colocar capas de material (lámina de material) sobre otras capas con una determinada orientación, el cual posteriormente es curado (polimerización de la resina o matriz del material para formar una unión permanente entre las fibras y entre las láminas).<sup>[1]</sup>

### **2.10.1 Fabricación a mano.**

Es la técnica más simple, y probablemente una de las primeras en utilizarse para hacer estructuras de material compuesto, también llamada “moldeo” (por su expresión en inglés “Lay up”), moldeo en húmedo o laminación. En este método, la fibra es saturada con resina líquida y moldeada (capa sobre capa) hasta obtener un espesor deseado. Este método es utilizado mayormente en poliéster con fibra de vidrio, también algunas partes hechas de fibra de vidrio con resina epóxica (ver **Figura 12**).<sup>[1]</sup>

Otra manera en la que el material puede ser trabajado es en forma pre-impregnada, normalmente el material pre-impregnado es producido en empresas dedicadas exclusivamente a la fabricación de este tipo de material, su manufactura permite un control cuidadoso de contenido de resina y fibra. Los materiales pre-impregnados son utilizados en partes en las que el rendimiento es crítico. [1]

En ambos métodos (moldeado en húmedo y moldeado con material pre-impregnado), las capas son colocadas en una forma superficial (molde) a mano. La aplicación de presión es algo que normalmente se hace por medio de rodillos, pala de goma. También se utiliza embolsado en vacío para remover aire que pudiera quedar atrapado y proveer una mejor uniformidad. El curado puede realizarse a temperatura ambiente o a elevadas temperaturas. [1]

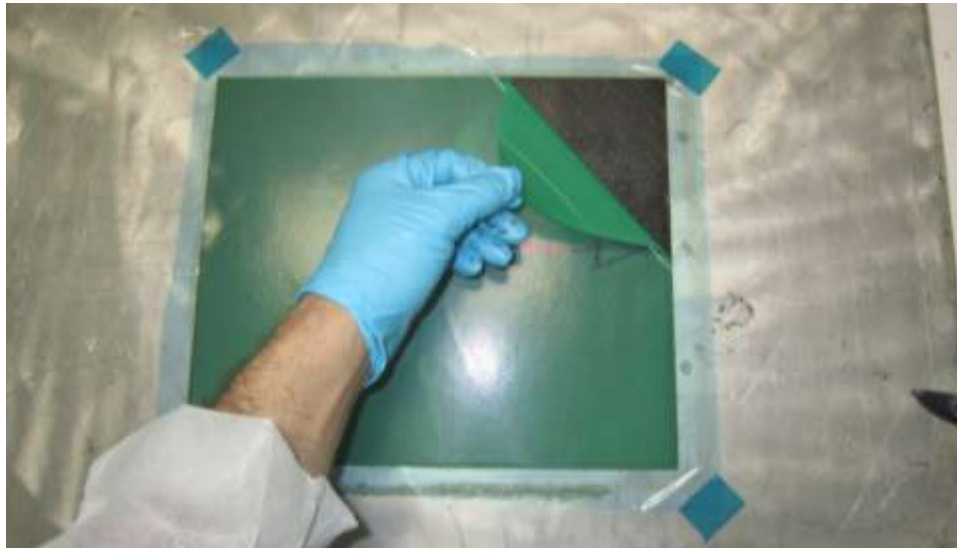


Figura 12. Moldeo manual de un laminado de resina fenólica (panel de prueba).

### ***2.10.2 Método de material pre-impregnado.***

El método de material pre-impregnado puede, en algunos aspectos, ser visto como una extensión del método de moldeo en húmedo. En el material pre-impregnado las fibras están colocadas unidireccionalmente o bidireccionalmente, impregnadas inicialmente con resina. El método de material pre-impregnado es mucho más preciso que el método de moldeo en húmedo (ver **Tabla 3**), sin embargo el método de material pre-impregnado

requiere embolsado de vacío y curado en horno o autoclave. En el método de material pre-impregnado, el pre-preg, el cual es suministrado en rollos normalmente de 12 a 60 pulgadas de ancho (30 cm a 152 cm ancho).<sup>[1]</sup>

Método de moldeo por impregnación directa	Método de moldeo con material pre-impregnado
No se necesitan curados con Horno	Mejor control de contenido de resina.
Solo cierto tipo de resinas pueden ser utilizadas por este método.	La distribución de la resina por unidad de área es estrictamente controlada.
La porosidad es común en laminados creados bajo este método.	Los problemas de salud y de seguridad asociados con resinas liquidas o solventes son mínimos.
Las propiedades mecánicas son bajas en comparación con otro método de manufactura.	Equipo de curado es necesario (Autoclave, Hornos de vacío).

Tabla 3 Comparación entre método moldeo en húmedo y moldeo con material pre-preg.

El material pre-impregnado utilizado para moldeo manual requiere de una ligera adherencia (por su expresión en inglés “Tack”) con la finalidad de que las capas no resbalen sobre otras capas durante el moldeo y para mantener su posición en el molde. El material pre-impregnado debería también ser flexible (por su expresión en inglés “Drape”) al molde de esta manera las formas complejas pueden ser trabajadas, estas dos propiedades son dependientes de la matriz del material (resina). El pre-preg bidireccional (tejido) es generalmente utilizado en contornos complejos por su habilidad de conformarse al molde. El tramado en la tela puede ser un factor significativo para dicha propiedad.<sup>[1]</sup>

A pesar de que el contenido de resina en el laminado es controlado durante su fabricación, el contenido de resina del material pre-impregnado influye en la adherencia y el hecho de ser conformable así como en la resistencia del laminado. En diversos sistemas de material pre-preg, el contenido de resina del material es más alto que el que es deseado en la parte final. Esto requiere que el exceso de resina sea removido en algún punto durante el proceso de manufactura. Al remover el exceso de resina facilita remover el aire que se

puede encontrar atrapado en el laminado y volátiles el cual fluye junto con el exceso de resina. Es esencial que esto ocurra porque puede generar poros en el laminado el cual tiene un efecto severo en la propiedad de esfuerzo de corte. Como una guía, la propiedad de fuerza de corte entre láminas se reduce aproximadamente 7% por cada 1% de poros presentes hasta un máximo de 4% de contenidos de poros. Un valor aceptable de porosidad de laminados es 0.5% o menos. <sup>[1]</sup>

Tradicionalmente el contenido de resina en un material pre-impregnado esta dado como porcentaje en peso, mientras que el contenido de resina en partes terminadas esta dado en porcentaje en volumen. La explicación para esto es simple ya que cuando el material pre-preg es fabricado, el porcentaje en peso de resina es fácil de medir y controlar. Mientras que el porcentaje de volumen de resina es preferentemente utilizado en laminados terminados porque está relacionado directamente a las propiedades mecánicas. La mayoría de los laminados hechos en la industria aeroespacial en la actualidad están hechos aproximadamente de 60% contenido en volumen de fibra. <sup>[1]</sup>

Durante la manufactura del material pre-impregnado, la resina es parcialmente curada (con un 30% de entrecruzamiento de las moléculas del polímero) e impregnada a la fibra. Si el material pre-impregnado (pre-preg) se dejara a temperatura ambiente en el estante, la reacción en la resina puede continuar y la resina se vuelve menos flexible (debido a la reticulación del polímero). Una vez que la resina se vuelve menos flexible, esta ya no tiene una buena adherencia, por lo cual no se puede unir a las demás capas de material pre-impregnado al momento de moldear un componente o parte. <sup>[34]</sup>

### ***2.10.3 Ventajas del método de pre-preg.***

- La cantidad de resina es controlada de una manera más precisa. <sup>[1]</sup>
- La distribución de resina por unidad de área es estrictamente controlada durante el proceso de manufactura del pre-preg. <sup>[1]</sup>
- Problemas asociados de salud y seguridad con resinas líquidas o solventes son eliminados. <sup>[1]</sup>

- Los problemas de baja eficiencia puede ser reducidos utilizando maquinaria automática para algunas partes.<sup>[1]</sup>
- Estos métodos ofrecen una mejor definición en la parte, alto contenido de fibra, y una mejor consolidación que en el método de moldeo húmedo.<sup>[1]</sup>

#### ***2.10.4 Desventajas del método de pre-preg.***

- Este método es lento y muy laborioso comparado con métodos automáticos.<sup>[1]</sup>
- Hay un alto grado de rechazos en partes debido a procedimientos de embolsado defectuoso.<sup>[1]</sup>
- Es difícil el embolsar formas complejas.<sup>[1]</sup>
- El equipo de curado es costoso.<sup>[1]</sup>
- Los ciclos de curados tienden a ser extensos.<sup>[1]</sup>

#### ***2.10.5 Corte de material pre-preg.***

El corte de material pre-impregnado (pre-preg), antes de ser moldeado, es el primer paso en la fabricación de partes en materiales compuestos. Los recursos utilizados para corte de material pre-preg caen en cinco categorías básicas: manual, cuchillo alternativo, laser de gas, wáter jet y dados de corte. El corte manual de material pre-preg es el método más simple y el menos costoso. Este método requiere plantillas de corte (hechas de hierro o aluminio). El operador marca la plantilla en el pre-preg y corre una navaja de corte alrededor de la plantilla. El uso de laser con dióxido de carbono para corte de material pre-preg no es muy amplio, el haz de luz se enfoca bajo un punto pequeño y causa calentamiento en la zona enfocada, el área superficial de corte por lo generar está hecha de aluminio, unas de sus ventajas es que hace del área de trabajo un área libre de ruido y comfortable (ver **Tabla 4**).<sup>[1]</sup>

Técnica	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Manual	Flexible, tiempo de preparación limitado, económico.	Lento, tedioso, dedicación por parte del operador, requiere el uso de plantillas, difícil de cortar capas múltiples.	Fibra de vidrio B-Ep, Gr-Ep y Kv-Ep.
Corte Automático	Controlado por computadora, cortes limpios, se puede cortar hasta 20 capas con una exactitud de $\pm 0.030$ in (0.76 mm).	Ofrece menor exactitud comparado con el método con láser o wáter jet, la herramienta de corte tiende a retener resina con el uso diario.	Corte de material compuesto no curado.
Laser	Corta B-Ep a 540 in/min (330 mm/seg), control a computadora.	Costo alto en consumo de energía, número limitado de capas de corte, requiere protección en ojos para poder trabajar este método.	Corte de material compuesto no curado.
Water Jet	No genera polvo, corte múltiple de capas hasta 40 capas, controlado por computadora.	Ligera absorción de material en material no curado.	Corte de material compuesto no curado.
Corte con dados de acero	No genera polvo, corte múltiple de capas, no hay zona afectadas por calor durante el corte especialmente en las esquinas, cortes limpios.	Cambios de diseño de patrones requieren cambios en los dados de corte.	Corte de material compuesto no curado.

Tabla 4 Técnicas de corte de material pre-preg.

Existen aplicaciones limitadas para corte de material pre-preg utilizando la técnica con water-jet. Este método requiere la aplicación de agua a presión a través de un orificio pequeño la cual produce un corte el cual es controlado por medio de una computadora generando un patrón de corte predeterminado. La absorción de humedad en el pre-preg ha sido una preocupación pero aún no se ha demostrado que tenga un efecto significativo (ver **Figura 13**).<sup>[1]</sup>



Figura 13. Máquina de corte automático de material pre-preg.

## 2.11 Procesamiento de materiales compuestos.

### 2.11.1 *Procesamiento en autoclave.*

Durante el proceso de curado de materiales compuestos o adhesivos en muchos de los ensambles, la mayoría de las veces una presión mayor que la del vacío es necesaria (103.42 Kpa a 689.48 Kpa (15 psi a 100 psi) o mayor para materiales termoestables). Esta presión se puede utilizar si el procesamiento de curado es por medio de una autoclave (ver **Figura 14**). Presión positiva puede ser agregada durante el curado bajo vacío para crear una presión acumulativa o la presión de vacío puede ser liberada para permitir el hecho de sólo tener presión positiva aplicada en la parte. La presión positiva se lleva a cabo mediante el bombeo de gas comprimido dentro de la cámara de curado de la autoclave. Dentro de esta cámara se encuentra disponible las conexiones de los termopares y puertos de vacío.<sup>[1]</sup>

Durante el proceso de curado con autoclave, se aplica presión y calor a la pieza para obtener la consolidación de las capas moldeadas. El curado con autoclave es el método más común utilizado para la fabricación de partes estructurales hechas de material compuesto en la industria aeroespacial. El proceso de autoclave es un proceso económico para la

fabricación de partes de alta calidad. Una de sus principales desventajas es el alto costo de adquisición de este tipo de equipo y alto costo por uso recurrente.<sup>[1]</sup>



Figura 14. Procesamiento de paneles de prueba en Autoclave.

### ***2.11.2 Procesamiento con bolsa de vacío.***

El proceso de bolsa de vacío es mediante la utilización de una bolsa especial (para hacer vacío) o bolsa de silicón la cual cubre la parte moldeada, al cubrir la parte podemos aplicar vacío y evacuar el aire atrapado dentro del laminado (presión atmosférica). El uso de bolsa de vacío como técnica de consolidación es amplio y el segundo comparado con el curado con autoclave. La limitación principal del procesamiento con bolsa de vacío es la presión que se le aplica a la parte, el proceso de autoclave tiene la flexibilidad de aplicar una presión mayor la cual es requerida para tener una mejor consolidación de capas en la mayoría de los materiales en la ingeniería.<sup>[1]</sup>

La bolsa de vacío debe de ser capaz de remover los volátiles durante el curado en un horno de convección y ser lo suficientemente resistente para soportar una presión de una atmosfera el cual es un valor adecuado para la mayoría de los materiales.<sup>[1]</sup>

Los requerimientos para un embolsado apropiado son:

- La bolsa debe de estar sellada.<sup>[1]</sup>
- La bolsa debe de ser uniforme para aplicar presión durante el curado.<sup>[1]</sup>
- La bolsa no debe de presentar fugas durante el curado.<sup>[1]</sup>
- Un buen puerto de vacío debe de ser colocado para remover el aire que se encuentra entre la parte y la bolsa.<sup>[1]</sup>

Principalmente, dos métodos de embolsado se encuentran en uso. El método más común utilizado es el de la utilización de bolsas desechables hechas de nylon o kapton de películas de poliamida. El otro método se refiere a la utilización de bolsas de silicón reusables. A continuación se enlistan las ventajas y desventajas de estos dos métodos:

- Una bolsa reusable usualmente es moldeada a una configuración predeterminada teniendo un tiempo de trabajo menor.<sup>[1]</sup>
- Una bolsa de embolsado desechable requiere un trabajo extensivo a mano el cual consta de remover arrugas y prevenir efectos de “puente” el cual puede ser causa de poros en algunas de las áreas del laminado.<sup>[1]</sup>
- Una bolsa reusable requiere ser colocada en el molde mediante la aplicación de un tape de sellado especial.<sup>[1]</sup>
- Las bolsas de vacío son más susceptibles a fugas por ruptura.<sup>[1]</sup>

### ***2.11.3 Selladores de bolsas.***

Los selladores de bolsa son utilizados para mantener el vacío y presión en la bolsa sin presenciar fugas durante el ciclo de curado.<sup>[1]</sup>

### ***2.11.4 Calentamiento***

La mayoría de los procesos con bolsa de vacío son curados en hornos. Diferentes tipos de tamaño de hornos son utilizados para curar la mayoría de materiales compuestos termoestables y adhesivos. Todos los hornos son de convección mediante la circulación de aire caliente, el calentamiento se da mediante la utilización de gas o resistencias eléctricas,

cada horno es monitoreado mediante un sistema de adquisición el cual genera la gráfica de curado (tiempo, temperatura).<sup>[1]</sup>

### ***2.11.5 Técnicas de embolsado.***

Para el proceso de bolsa de vacío, las bolsas son utilizadas para evacuar el aire que se encuentra en el laminado y generar una presión atmosférica requerida para la compactación de las capas sobre el molde. Para el proceso de autoclave, la bolsa de vacío sirve para contener los gases compactados durante el curado (volátiles).<sup>[1]</sup>

A continuación se enlistan los requerimientos para la aplicación de presión en un laminado:

- Consolidación de capas sucesivas.<sup>[1]</sup>
- Asegurar la impregnación total de resina en la fibra.<sup>[1]</sup>
- Eliminación de poros causados por volátiles, aire atrapado o reacción química del producto.<sup>[1]</sup>
- Reducción de contenido excesivo de resina en el laminado.<sup>[1]</sup>

Durante el embolsado es necesario asegurarnos que la parte no contenga fugas, cuando una bolsa de vacío es colocada en una herramienta (molde), el aire que queda atrapado entre la bolsa y la herramienta es evacuado. El termopar es colocado en las esquinas de la herramienta.<sup>[1]</sup>

Se le coloca un cinta selladora de doble cara a la bolsa de vacío la cual es colocada sobre la parte previamente cubierta con un material llamado respirador, la función de este material es transmitir el vacío en toda la parte y contener la resina que fluye durante el curado. Una vez colocada la cinta selladora de doble cara sobre la bolsa, ésta se adhiere al perímetro de la herramienta, en caso de que la bolsa sea de un mayor tamaño al área cubierta se generar un dobles de la misma (patoles, orejas) (ver **Figura 15**).<sup>[1]</sup>

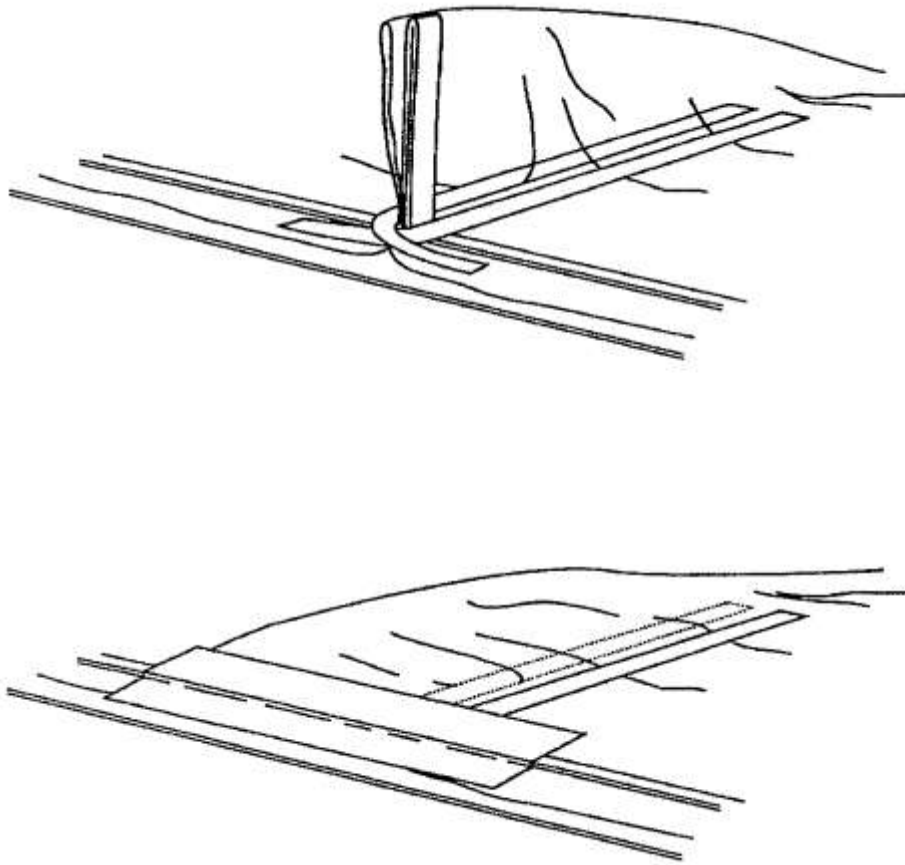


Figura 15. Patoles generados en un embolsado con cinta selladora de doble cara.

## 2.12 Maquinado.

Técnicas de maquinado para materiales compuestos han sido desarrolladas para su uso en la industria aeroespacial. Sin embargo, alguna de las metodologías de maquinado aún están siendo refinadas para obtener una reducción and costos.<sup>[1]</sup>

Corte, acabado y ensamble de los materiales compuestos son consideraciones importantes que se deben tomar. En alguno de los procesos, el daño potencial o debilitación del laminado (separación de capas del laminad, fibras deshilachadas) es algo en donde se debe de tener mucho cuidado para mantener la integridad del material.<sup>[1]</sup>

El equipo y procedimientos utilizados en corte, taladrado y maquinado en materiales compuestos, difiere de los metales y plásticos. Los materiales compuestos pueden ser cortados fácilmente con cortes con disco abrasivo (ver **Figura 16**).<sup>[1]</sup>

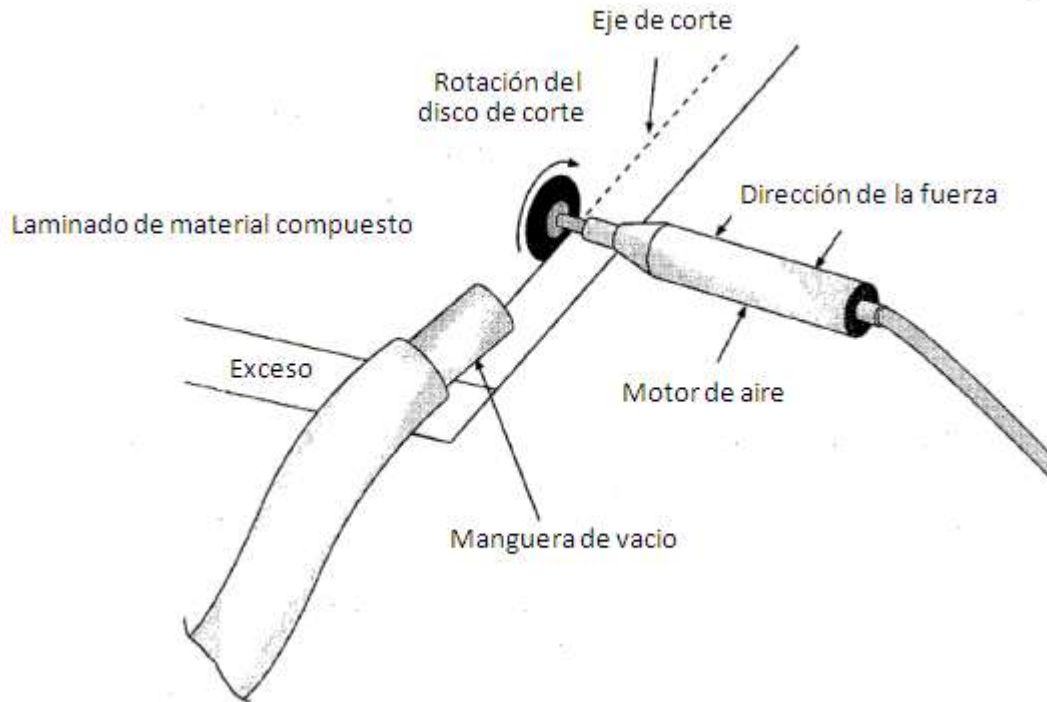


Figura 16. Corte de exceso de material mediante herramienta neumática.

### 2.12.1 Corte y maquinado de material compuesto.

Técnicas y herramientas únicas son requeridas para corte y maquinado de materiales compuestos. En objetivo general para obtener un apropiado corte y buen acabado en orificios son:

- No delaminación de superficies que pueda detectarse visualmente.<sup>[1]</sup>
- No decoloración en la superficie (causa de sobrecalentamiento).<sup>[1]</sup>
- Acabado superficial de 250  $\mu$ -in.<sup>[1]</sup>
- En caso de tener fibras alrededor de un orificio maquinado, estas no deben de exceder un 25% del diámetro del orificio de largo.<sup>[1]</sup>

Para cumplir con estos tipos de requerimientos especializados la herramienta debe de permitir el control de la velocidad. Para la mayoría de las aplicaciones la perforación de un laminado requiere de dos operaciones. Cuando se utiliza una pistola para perforar al laminado es necesario utilizar un refrigerante o cuando este se hace en seco es necesario tener un sistema de vacío para contener el polvo generado. <sup>[1]</sup>

### 2.12.2 Operaciones de corte.

Al momento de realizar una operación de corte se debe de tomar en cuenta qué tipo de herramienta se va a utilizar para obtener buenos resultados. Estas herramientas de corte pueden variar desde herramientas convencionales de alta velocidad hasta herramientas con disco de diamante. Toda operación de maquinado de material compuesto produce polvo, estas operaciones se deben de realizar en áreas apropiadas con equipo de protección personal apropiado (ver **Tabla 5**). <sup>[1]</sup>

Operación de corte	Equipo	Tipo de cortador	Velocidad	
			Superficie ft/min	Superficie m/min
Corte en line recta	Cortador de mano. Disco abrasivo. Mesa corte con sierra.	Sierra circular de diamante	2000 a 12000	610 a 3660
Perfilado (irregular)	Banda de sierra.	Navaja de sierra.	1000 a 2000	305 a 610
	Cortador manual.	Disco de diamante.	1000 a 6500	305 a 1980
		Disco de carburo	1000 a 6000	305 a 1980
	Perforadora manual	Disco abrasivo	400 a 2400	122 a 732
Chaflán	Manual	Abrasivo	N/A	N/A
Acabado Final	Manual	Lija	N/A	N/A

Tabla 5. Tipos de herramientas recomendadas para corte en materiales compuestos.

### 2.12.3 Corte con Sierra eléctrica de materiales compuestos.

El corte de sierra radial provee un corte rápido y preciso el cual puede ser hecho mediante herramientas estacionarias o portátiles. El problema principal de este tipo de herramienta es que para cortes lineales causa de laminaciones. El corte con sierra de banda tiene la ventaja de cortar en base a un contorno sin embargo la calidad de las esquinas es

poca y se le debe de dar un proceso de acabado final (ver **Figura 17**). Durante el corte de los laminados es muy importante la sujeción de la parte ya que con esto se evitan vibraciones las cuales pueden causar de laminaciones.<sup>[1]</sup>



Figura 17. Sierra estacionaria banda de corte de diamante.

#### ***2.12.4 Corte con Herramienta manual (enrutamiento)***

El enrutamiento es una operación de corte de contorno la cual puede ser realizada mediante equipo manual o automático. La diferencia básica acerca de utilizar este método en diferentes tipos de laminado es el tipo de herramienta de corte (disco). Por ejemplo, para materiales con matriz epóxica y refuerzo de fibra de carbono se recomienda utilizar cortadores de diamante o carburo, la velocidad de corte es alrededor de 13000 a 21000 rpm (ver **Figura 18**).<sup>[1]</sup>



Figura 18. Cortador neumático manual con disco de carburo.

## 2.13 Pruebas mecánicas en polímeros.

Los polímeros son materiales con un alto peso molecular que pudiera exhibir el comportamiento mecánico de una fibra, plástico, o elastómero (ver **Figura 19**).<sup>[5]</sup>

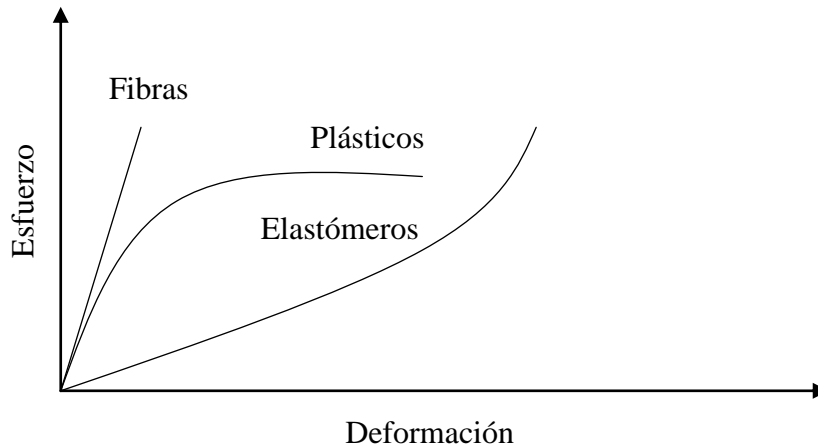


Figura 19. Típica curva esfuerzo-deformación para fibras, plásticos y elastómeros.

El uso de un polímero como un elastómero, un plástico o una fibra depende del esfuerzo relativo de sus enlaces intermoleculares y geometría estructural. Los polímeros no cristalinos los cuales están constituidos por enlaces intermoleculares débiles son usualmente elastómeros a temperaturas por arriba de su temperatura de transición vítrea. En contraste los polímeros con enlaces de hidrogeno fuertes y la posibilidad de alta cristalinidad se pueden convertir en fibras.<sup>[5]</sup>

Las propiedades mecánicas pueden ser afectadas por el peso molecular. La mayoría de los fabricantes de materiales proveen una serie de materiales con diversos pesos moleculares. Los materiales con alto peso molecular tienen altas viscosidades y bajos puntos de fusión. Cuando el peso molecular es bajo, el esfuerzo mecánico aplicado tiende a deslizar las moléculas unas sobre otras y separarlos. Con un aumento continuo en el peso molecular, la fuerza de atracción entre las moléculas se hace más grande, y la resistencia mecánica empieza a mejorar.<sup>[5]</sup>

La caracterización ingenieril de propiedades para materiales compuestos reforzados con fibras es un tema complejo debido a que son materiales anisotropicos y carecen de

homogeneidad. En términos de propiedades mecánicas, los materiales compuestos son evaluados por un número de métodos de prueba específicamente diseñados.<sup>[5]</sup>

### ***2.13.1 Prueba de corte.***

Para este tipo de prueba aplican la siguiente serie de estándares:

- ASTM D2344, “Standard Test Method for Apparent Interlaminar Shear Strength of Parallel Fiber Composites by Short-Beam Method”.<sup>[4]</sup>
- SACMA SRM 8R-94, “Apparent Interlaminar Shear Strength of Oriented Fiber-Resin Composites by the Short-Beam Method”.<sup>[4]</sup>
- ASTM D5379, “Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method”.<sup>[4]</sup>

En esta ocasión nos enfocaremos en el método de prueba ASTM D2344, este método de prueba es comúnmente conocida como (SBS), la intención de la prueba es de cuantificar la fuerza de corte entre las láminas que conforman el laminado de un material compuesto (fibras paralelas).<sup>[4]</sup>

### ***2.13.2 Prueba de flexión.***

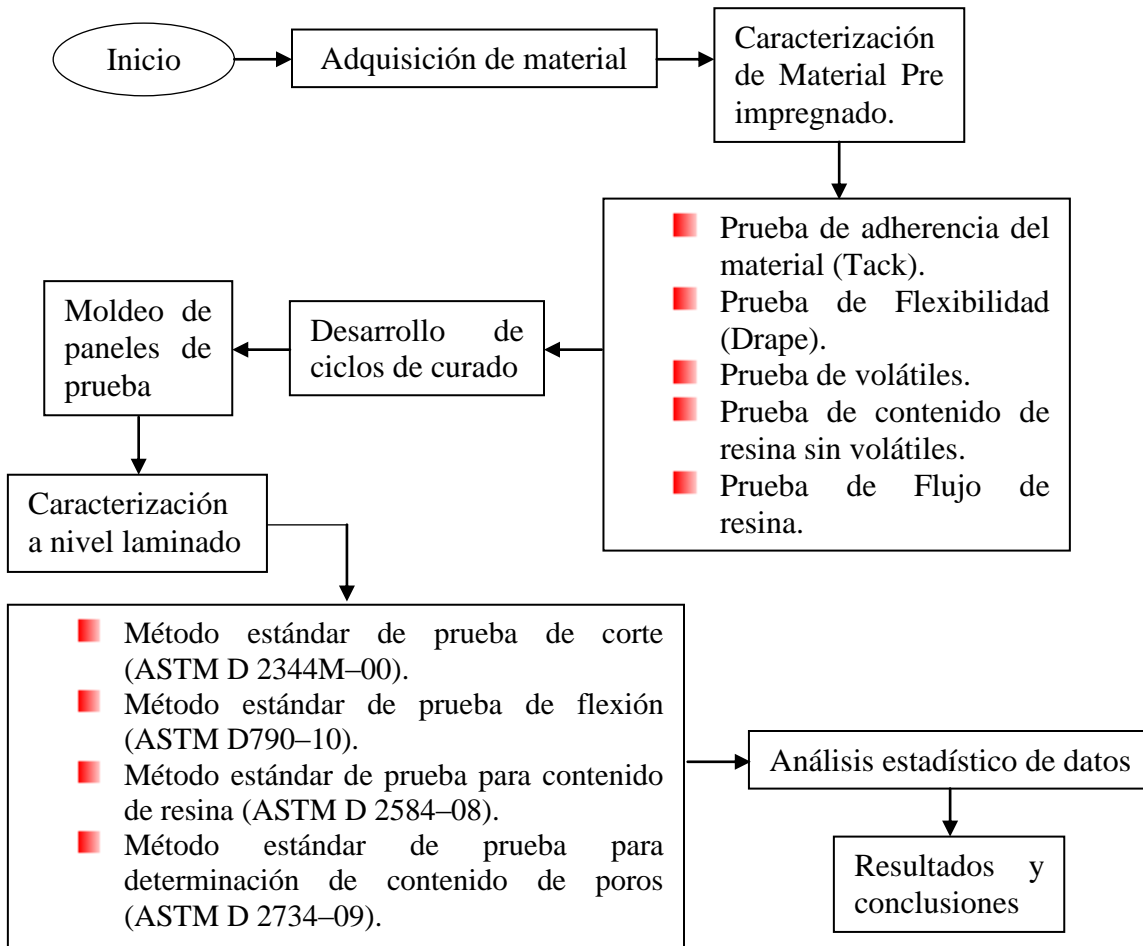
Este tipo de prueba esta descrita en el estándar:

- ASTM D790, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.”<sup>[4]</sup>

Para fines de esta investigación se utilizara dicho estándar el cual fue escrito originalmente para plásticos, posteriormente fue modificado y aprobado para su aplicación en materiales compuestos. La información que se puede obtener con estos métodos de prueba es el esfuerzo en las fibras, fuerza de flexión y modulo de flexión.<sup>[4]</sup>

# **Capítulo 3. Análisis estadístico y metodología**

### 3.1 Diagrama de flujo de pruebas.



## 3.2 Métodos de prueba del material pre-impregnado.

El material a caracterizar es fibra de vidrio con resina fenólica, para realizar la caracterización del material pre-impregnado nos apoyaremos con las siguientes pruebas:

- Prueba de adherencia del material (Tack).
- Prueba de flexibilidad (Drape).
- Prueba de volátiles.
- Prueba de contenido de resina sin volátiles.
- Prueba de Flujo de resina.

### 3.2.1 Prueba de adherencia del material

Consiste en asegurar que el material se adhiera entre el laminado sin deslizarse, el siguiente método es un método propuesto durante este análisis.

Los especímenes hechos de material pre-preg deberán tener una geometría de 7.5 cm de largo por 2.5 cm de ancho (3 in de largo por 1 in de ancho), la prueba se debe de realizar bajo condiciones de humedad y temperatura controladas a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $68\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 4\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) y 50 a 70 % de humedad relativa.

Durante la prueba se moldea cada espécimen el cual consta de dos capas de material, la dirección de orientación de la fibra a cero grados es paralela al largo del espécimen, una muestra de cinco especímenes serán suficientes para determinar un nivel de adherencia del material. Terminado el moldeo de los especímenes se deja al menos 30 min en posición vertical, posterior a esto en base al criterio obtenido durante el análisis se asigna un nivel de adherencia (ver **Figura 20**).

Niveles de adherencia.

- Nivel 1: Este nivel se asigna cuando se considera que el material moldeado presentó una dificultad al moldeo (acartonado) o mostró un deslizamiento o no adhesión entre capas.
- Nivel 2: Este nivel se asigna cuando se considera que el material moldeado presentó una ligera facilidad al amoldarse así como baja transferencia de resina al ser moldeado.
- Nivel 3: Este nivel se asigna cuando se considera que el material moldeado presentó una ligera adhesión entre capas pero no fue capaz de mantenerse adherido durante 30 min.
- Nivel 4: Este nivel se asigna cuando se considera que el material moldeado presentó una buena adhesión entre capas y fue capaz de mantenerse adherido durante 30 min o más.
- Nivel 5: Este nivel se asigna cuando se considera que el material moldeado no tuvo transferencia de resina a los guantes al ser moldeado.
- Nivel 6: Este nivel se asigna cuando se considera que el material moldeado tuvo transferencia de resina a los guantes al ser moldeado así como una alta adherencia del mismo presentando una gran viscosidad.



Figura 20. Especímenes durante prueba de adherencia de material pre-preg.

### 3.2.2 Prueba de flexibilidad del material

Consiste en asegurar que el material pueda ser moldeado en superficies irregulares sin que el mismo tenga daños significativos en su estructura, el siguiente método es un método propuesto durante este análisis.

Los especímenes hechos de material pre-preg deberán tener una geometría de 7.5 cm de largo por 5 cm de ancho (3 in de largo por 2 in de ancho), la prueba se debe de realizar bajo condiciones de humedad y temperatura controladas a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $68\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 4\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) y 50 a 70 % de humedad relativa.

Durante la prueba se enrolla un espécimen alrededor de un tubo sólido de aluminio de 0.635 cm (0.25 in) de diámetro, la dirección 0 de las fibras deben de correr en línea perpendicular al tubo de aluminio, después de 15 segundos de haber enrollado el espécimen este es desenrollado (ver **Figura 21**). Posteriormente se inspecciona en la superficie del material si existe evidencia de grietas, arrugas, traslapos, o desgarres, en caso de tener los defectos mencionados anteriormente en la superficie; si éstos se presentan de las orillas del material a 0.33 cm hacia el centro no será causa de rechazo.

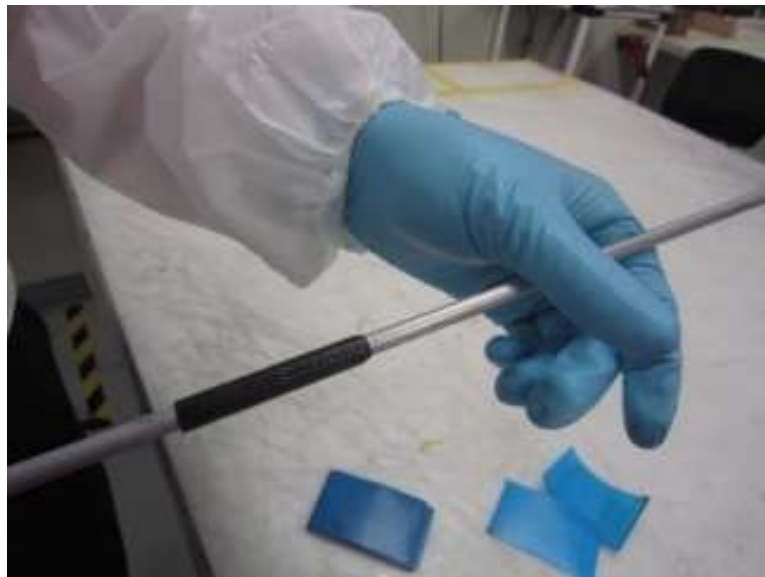


Figura 21. Especímen durante prueba de flexibilidad de material pre-preg.

### 3.2.3 Prueba de contenido de volátiles

Consiste en pesar por separado en una balanza analítica 3 especímenes de 10 cm de ancho por 10 cm de largo de material pre-preg (4 in de largo por 4 in de ancho), posteriormente se colocan dentro de un horno convencional a  $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $320\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) durante 10 min. La diferencia de pesos antes y después de ser colocado en el horno entre el peso de la muestra antes de ser colocada en el horno multiplicado por cien es el porcentaje de contenido de volátiles (ver **Figura 22**).

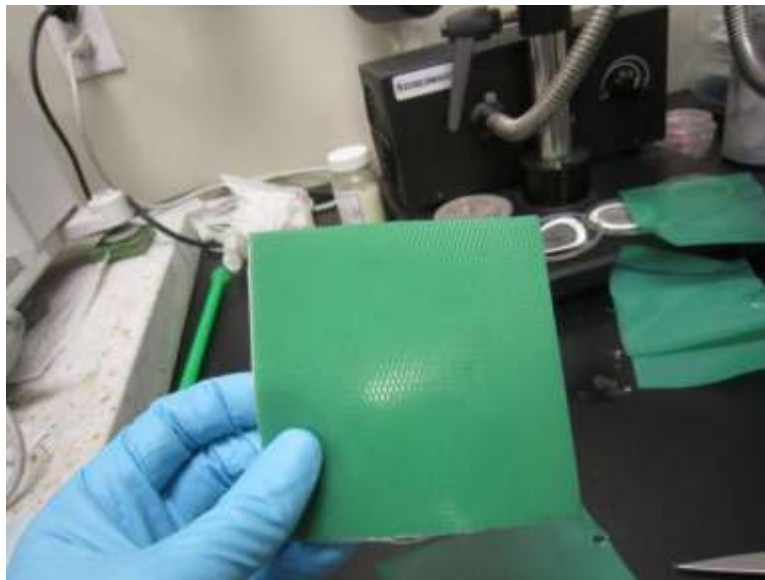


Figura 22. Espécimen de material pre-preg para prueba de contenido de volátiles y contenido de resina sin volátiles.

### 3.2.4 Prueba de contenido de resina sin volátiles.

Consiste en pesar por separado en una balanza analítica 3 especímenes de 10 cm de ancho por 10 cm de largo de material pre-preg (4 in de largo por 4 in de ancho), con volátiles removidos acorde al párrafo 3.1.3, posteriormente se colocan dentro de una mufla a  $538\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 28\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $1000\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) durante 1 hora. La diferencia de pesos antes y después de ser colocado en la mufla entre el peso de la muestra antes de ser colocada en la mufla multiplicado por cien es el porcentaje de contenido de resina sin volátiles.

### 3.2.5 Prueba de flujo de resina.

Consiste en moldear tres especímenes el cual será constituido de cuatro capas de pre-preg con orientación de fibra balanceada y simétrica. Cada espécimen será colocado entre dos capas de plástico antiadherente resistente a altas temperaturas. Posteriormente se precalientan los platos de compresión a  $130\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $266\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) bajo una compresión de 6.89 Kpa (15 psi), una vez alcanzada la compresión se deja curar a compresión y temperatura constante durante 10 minutos. Terminando de curarse se retira el espécimen junto con el plástico antiadherente así como el exceso de resina en los lados. La diferencia en peso de las muestra antes de ser curada y después de ser curada, dividida entre el peso de la muestra antes de ser curada multiplicado por cien es el porcentaje de flujo de resina (ver **Figura 23**).



Figura 23. Espécimen después de una prueba de flujo de resina.

### 3.3 Moldeo panel de prueba (laminado).

El panel de prueba consta de doce capas de material pre-impregnado el cual es moldeado con una orientación balanceada y simétrica (mismo número de fibras en el eje de 0 grados y mismo número de fibras en el eje de 90 grados), el panel se moldeará bajo condiciones de humedad y temperatura controladas a  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  ( $68\text{ °F} \pm 4\text{ °F}$ ) y 50 a 70 % de humedad relativa. El material pre-preg debe de ser moldeado en una superficie plana con acabado 2d. A continuación se muestra una secuencia grafica del proceso de moldeo de paneles de prueba:

Paso 1: Limpieza de placa de aluminio con una franela y alcohol isopropílico (ver **Figura 24**).



Figura 24. Limpieza placa de aluminio.

Paso 2: Colocación de plástico antiadherente en la placa (ver **Figura 25**).



Figura 25. Colocación Plástico Antiadherente.

Paso 3: Moldeo de material pre-impregnado (ver **Figura 26**).



Figura 26. Moldeo material pre-impregnado.

Paso 4: Colocación de material peel-ply (ver **Figura 27**).

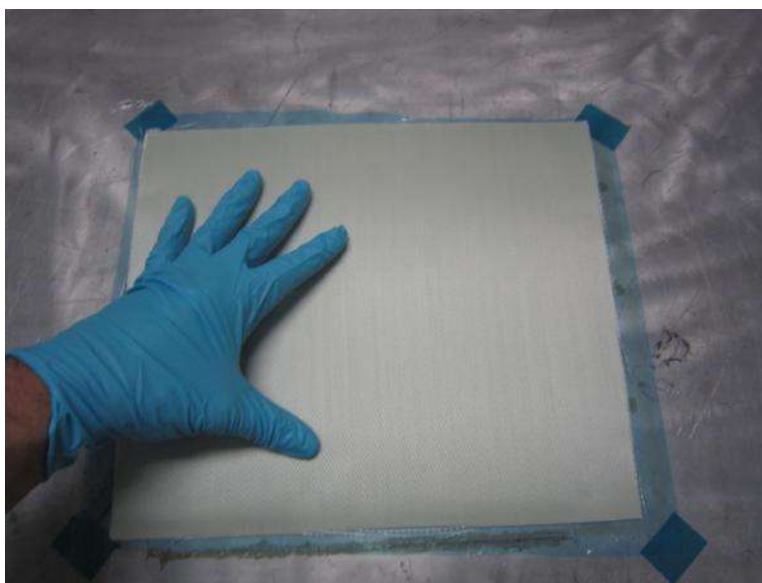


Figura 27. Colocación Peel-ply.

Paso 5: Colocación de cinta selladora alrededor de material pre-impregnado, tipo cuadro (ver **Figura 28**).

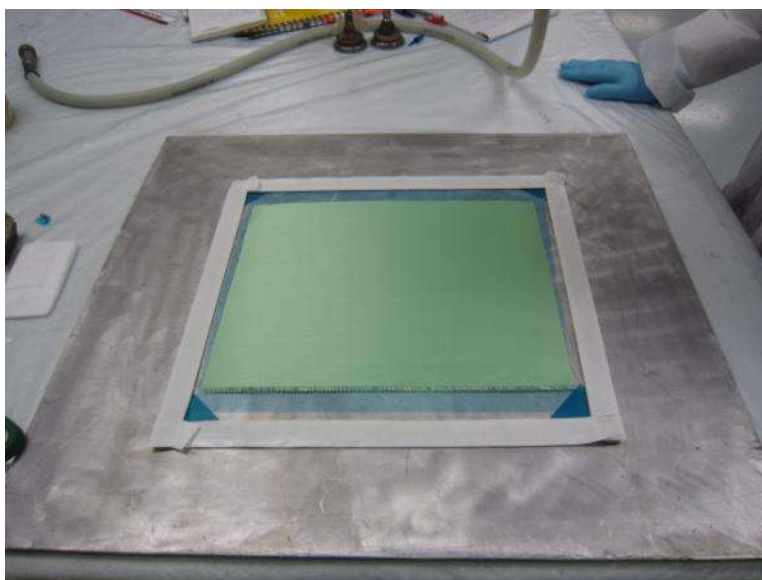


Figura 28. Colocación cinta selladora.

Paso 6: Colocación de plástico perforado sobre marco de cinta selladora y colocación de termopares tipo J (ver **Figura 29**).

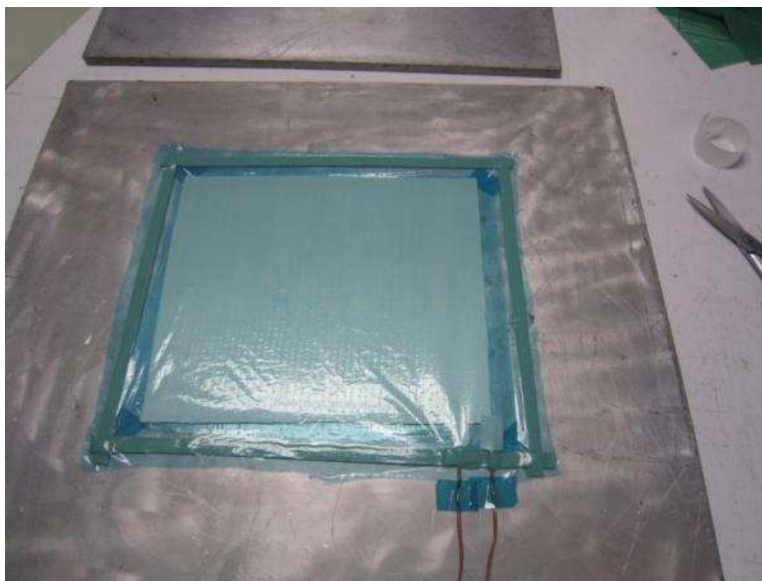


Figura 29. Colocación termopares.

Paso 7: Colocación de material respirador, doble capa (ver **Figura 30**).

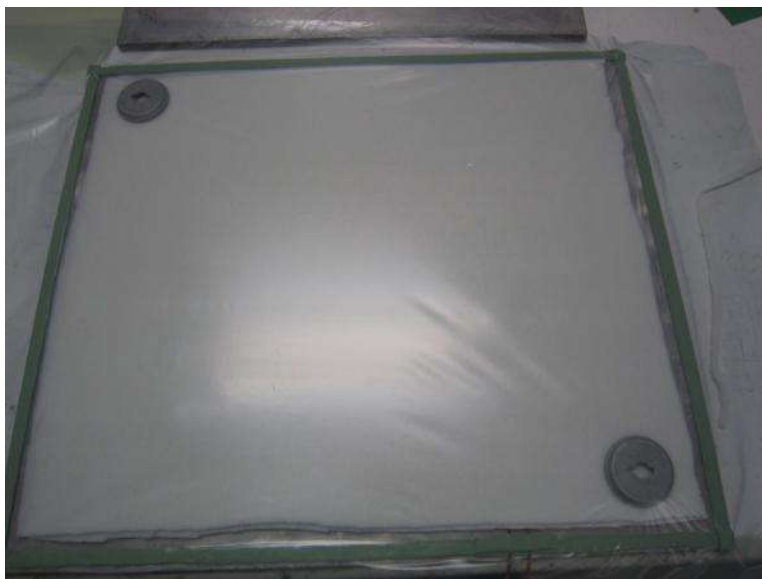


Figura 30. Colocación de material respirador.

Paso 8: Colocación de puertos de vacío (ver **Figura 31**).



Figura 31. Colocación puertos de vacío.

Paso 9: Prueba de vacío (ver **Figura 32**).

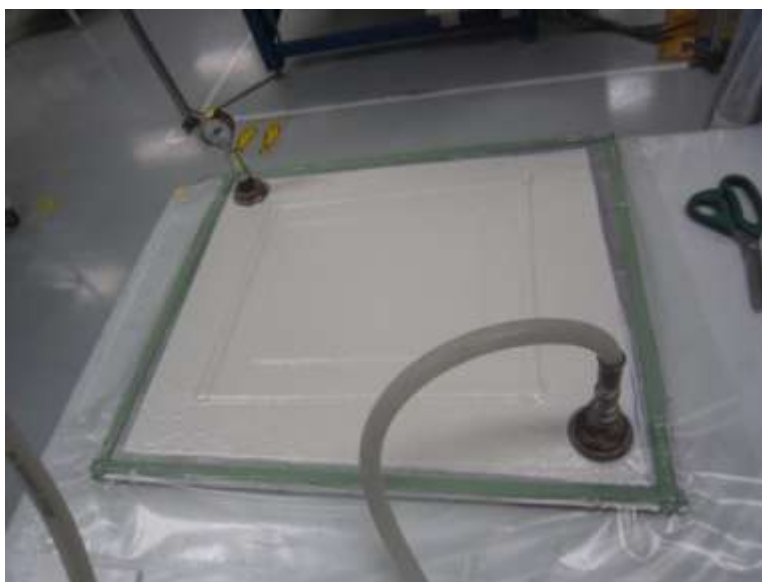


Figura 32. Prueba de vacío.

### 3.4 Ciclos de curado propuestos.

Se propusieron 3 diferentes ciclos de curado con diferentes rampas de calentamiento y tiempo de permanencia, clasificados como ciclos de curado A, B y C.

Ciclo de curado A (ver **Figura 33**):

- **Segmento #1:** Ir de temperatura ambiente a  $88\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $190\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $1.39\text{ °C/min} +0.55\text{ °C/min} / -0.28\text{ °C/min}$  ( $2.5\text{ °F/min} +1\text{ °F/min} / -0.5\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $88\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $190\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 60 min.
- **Segmento #2:** Ir de  $88\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  a  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $190\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$  a  $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $1.39\text{ °C/min} +0.55\text{ °C/min} / -0.28\text{ °C/min}$  ( $2.5\text{ °F/min} +1\text{ °F/min} / -0.5\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 60 min.
- **Segmento #3:** Ir de  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  a  $93\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$  a  $200\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $-1.94\text{ °C/min} +0.55\text{ °C/min} / -0.84\text{ °C/min}$  ( $-3.5\text{ °F/min} +1\text{ °F/min} / -1.5\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $200\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 5 min.
- Dejar enfriar a  $24\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $75\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ).

Nota: Durante todo el proceso de curado el panel de prueba estará a vacío completo a  $-85\text{ Kpa} + 11.5/ -11.5$  ( $-25\text{ in Hg}, +3.5 / -3.5$ ).

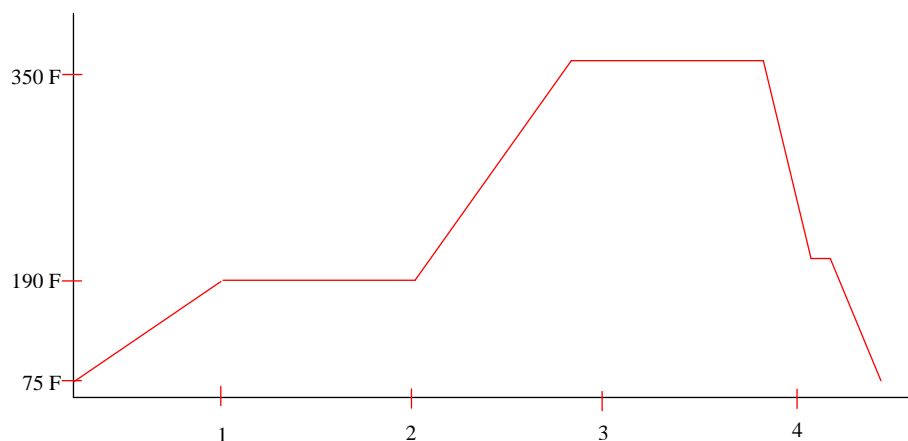


Figura 33. Diagrama ciclo curado A.

Ciclo de curado B (ver **Figura 34**):

- **Segmento #1:** Ir de temperatura ambiente a  $115\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $240\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $1.11\text{ °C/min} + 1.11\text{ °C/min} - 0.56\text{ °C/min}$  ( $2\text{ °F/min} + 2\text{ °F/min} - 1\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $115\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $240\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 60 min.
- **Segmento #2:** Ir de  $115\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  a  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $240\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$  a  $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $2.22\text{ °C/min} + 0.55\text{ °C/min} - 1.11\text{ °C/min}$  ( $4\text{ °F/min} + 1\text{ °F/min} - 2\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 120 min.
- **Segmento #3:** Ir de  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  a  $121\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$  a  $250\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $-1.94\text{ °C/min} + 0.55\text{ °C/min} - 0.84\text{ °C/min}$  ( $-3.5\text{ °F/min} + 1\text{ °F/min} - 1.5\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $121\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $250\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 5 min.
- Dejar enfriar a  $23.89\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $75\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ).

Nota: Durante todo el proceso de curado el panel de prueba estará a vacío completo a  $-85\text{ Kpa} + 11.5/ -11.5$  ( $-25\text{ in Hg}$ ,  $+3.5 / -3.5$ ).

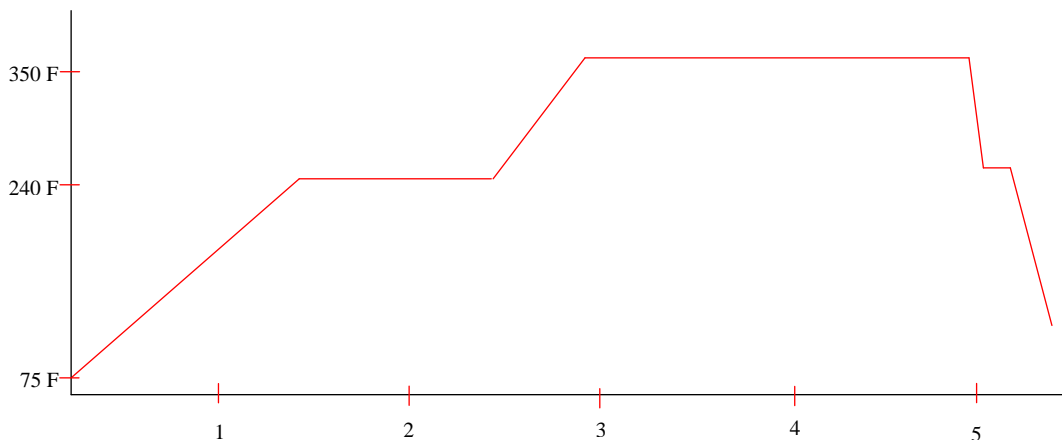


Figura 34. Diagrama ciclo curado B.

Ciclo de curado C (ver **Figura 35**):

- **Segmento #1:** Ir de temperatura ambiente a  $80\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $175\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $1.66\text{ °C/min} + 0.56\text{ °C/min} - 0.55\text{ °C/min}$  ( $3\text{ °F/min} + 1\text{ °F/min} / -1\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $80\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $175\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 60 min.
- **Segmento #2:** Ir de  $80\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  a  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $175\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$  a  $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $1.66\text{ °C/min} + 0.56\text{ °C/min} - 0.55\text{ °C/min}$  ( $3\text{ °F/min} + 1\text{ °F/min} / -1\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 60 min.
- **Segmento #3:** Ir de  $177\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  a  $93\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $350\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$  a  $200\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) con una rampa de temperatura de  $-1.94\text{ °C/min} + 0.55\text{ °C/min} - 0.84\text{ °C/min}$  ( $-3.5\text{ °F/min} + 1\text{ °F/min} / -1.5\text{ °F/min}$ ).
- Permanecer en  $93\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $200\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ) durante 5 min.
- Dejar enfriar a  $24\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  ( $75\text{ °F} \pm 10\text{ °F}$ ).

Nota: Durante todo el proceso de curado el panel de prueba estará a vacío completo a  $-85\text{ Kpa} + 11.5 / -11.5$  ( $-25\text{ in Hg}$ ,  $+3.5 / -3.5$ ).

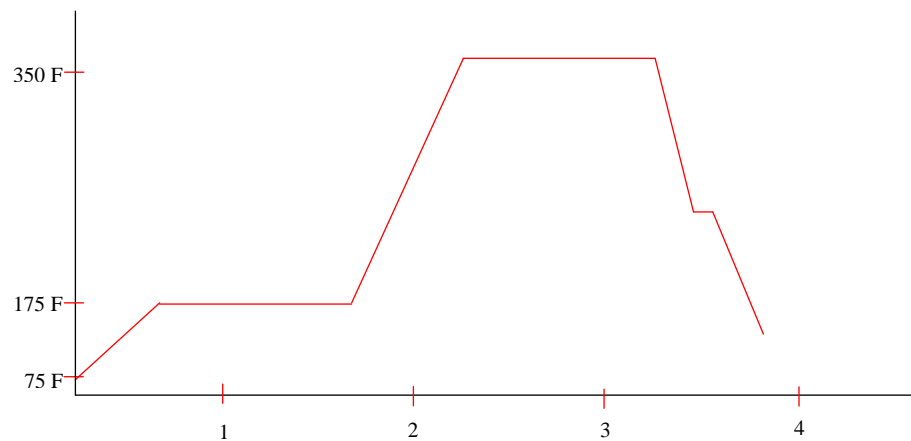


Figura 35. Diagrama ciclo curado C.

### 3.5 Maquinado de especímenes de prueba.

El panel será maquinado con una herramienta manual de disco de diamante, posteriormente se llegará a dimensión requerida mediante el uso de una maquina pulidora y lija #240. Se generarán dos paneles por ciclo de curado y cada panel será maquinado en base al siguiente diagrama (ver **Figura 36**).

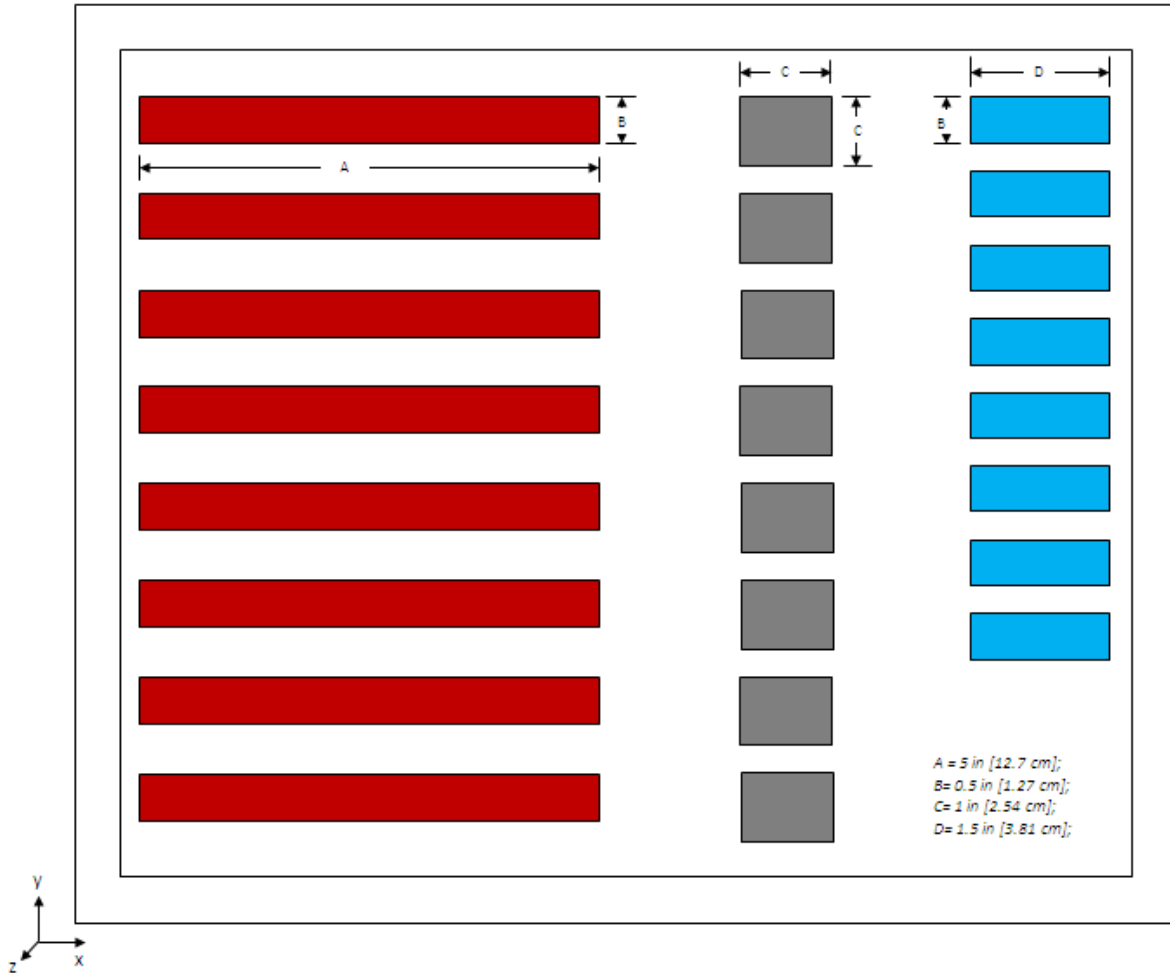


Figura 36. Diagrama maquinado de panel de prueba.

La dirección en “x” hace referencia a la dirección de las fibras a 0 grados, la dirección en “y” hace referencia a la dirección de las fibras a 90 grados y la dirección en “z” hace referencia al espesor del espécimen (constante a  $\approx 2.54 \text{ mm [0.1 in]}$ ).

Geometría de especímenes acorde a las normas ASTM:

- Prueba de flexión (ASTM D790): 12.7 cm x 1.27 cm x espesor (5 in x 0.5 in x espesor).
- Prueba de corte (ASTM D2344): 3.81 cm x 1.27 cm x espesor (1.5 in x 0.5 in x espesor).
- Prueba de contenido de resina (ASTM D2584): 2.54 cm x 2.54 cm x espesor (1 in x 1 in x espesor).
- Prueba de contenido de poros (ASTM D2734): 2.54 cm x 2.54 cm x espesor (1 in x 1 in x espesor).

En nuestro caso manejamos un laminado de 12 capas este genera un espesor de  $\approx 2.54$  mm [0.1 in].

### **3.6 Métodos de prueba del Laminado.**

Para realizar la caracterización del laminado nos apoyaremos con las siguientes pruebas:

- Método estándar de prueba para resistencia en viga corta de materiales compuestos de matriz polimérica y sus laminados (ASTM D 2344M-00).
- Método estándar de prueba propiedades de flexión de plásticos no reforzados y reforzados y aislantes eléctricos (ASTM D790-10).
- Método estándar de prueba para pérdida por ignición de resina curada con refuerzo (ASTM D 2584-08).
- Método estándar de prueba para determinación de contenido de poros en plásticos reforzados (ASTM D 2734-09).

#### ***3.6.1 Método de prueba de corte con viga corta ASTM D 2344M-00***

El espécimen se coloca en una base con dos soportes, el mismo es sometido a carga en su punto medio mediante un soporte de carga, la separación que existe entre espécimen es cuatro veces el valor del espesor del espécimen (ver **Figura 37**).



Figura 37. Espécimen colocado en accesorio para prueba de corte.

La fuerza al corte se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F^{abs} = 0.75 \frac{P_m}{b \times h}$$

Donde;

$F^{abs}$  = Fuerza al corte, MPa (psi).

$P_m$  = Carga máxima observada durante la prueba, N (lbf).

$b$  = Ancho del espécimen, mm (in).

$h$  = Espesor del espécimen, mm (in).

### 3.6.2 Método de prueba de flexión ASTM D790–10

El espécimen se coloca en una base con dos soportes, el mismo es sometido a carga en su punto medio mediante un soporte de carga a 1.27 mm/min (0.05 in/min), la separación que existe entre espécimen es 16 veces el valor del espesor del espécimen (ver **Figura 38**):



Figura 38. Especimen colocado en accesorio para prueba de flexión.

El esfuerzo a la flexión se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2$$

Donde;

$\sigma_f$  = esfuerzo a la flexión, MPa (psi).

$P$  = Carga en un punto dado en la curva de carga – deflexión, N (lbf).

$L$  = Distancia de separación entre los soportes base, mm (in).

$b$  = ancho del espécimen probado, mm (in).

$d$  = Espesor del espécimen probado, mm (in).

### 3.6.3 Método de prueba para cálculo de contenido de resina ASTM D 2584-08

El espécimen de 2.5 cm x 2.5 cm (1 in x 1 in) se coloca en un crisol el cual es calentado en una mufla hasta 565 C (1050 F) durante 3 horas, se deja enfriar en un desecador y posteriormente se pesa, la diferencia en peso antes y después, dividido entre el peso inicial multiplicado por 100, es el porcentaje de resina en el laminado (ver **Figuras 39 y 40**):



Figura 39. Especímenes colocados en crisoles dentro de la mufla.

El contenido de resina se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$W_{\%} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Donde;

$W_{\%}$  = Porcentaje en peso de resina (%).

$W_1$  = Peso del espécimen (gramos).

$W_2$  = Peso del residuo (gramos).

### 3.6.4 Método de prueba para cálculo de contenido de poros ASTM D 2734-09

La densidad de la resina, refuerzo y el compuesto es calculado por separado. El contenido de resina es medido mediante ASTM D2584-08.

El contenido de poros se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V = 100 - M_d \left( \frac{r}{d_r} + \frac{g}{d_g} \right)$$

Donde;

$V$  = Porcentaje en volumen de contenido de poros (%).

$M_d$  = Densidad medida ( $\text{g/cm}^3$ ).

$r$  = Porcentaje en peso de la resina (%).

$g$  = Porcentaje en peso de la fibra (%).

$d_r$  = Densidad de la resina ( $\text{g/cm}^3$ ).

$d_g$  = Densidad de la fibra ( $\text{g/cm}^3$ ).



Figura 40. Especímenes después de la prueba de contenido de resina.

### 3.7 Análisis estadístico de datos.

Se analizará el efecto en propiedades mecánicas y físicas entre los tres diferentes ciclos de curado propuestos, para realizar este análisis se utilizarán las siguientes herramientas estadísticas:

- Diagrama de dispersión.
- Gráfica de efectos principales.
- Prueba de igualdad de varianzas.
- Diagramas de caja.
- Análisis de medias.

El arreglo de las pruebas para la caracterización a nivel laminado será desarrollado de la siguiente manera (ver **Figura 41**).

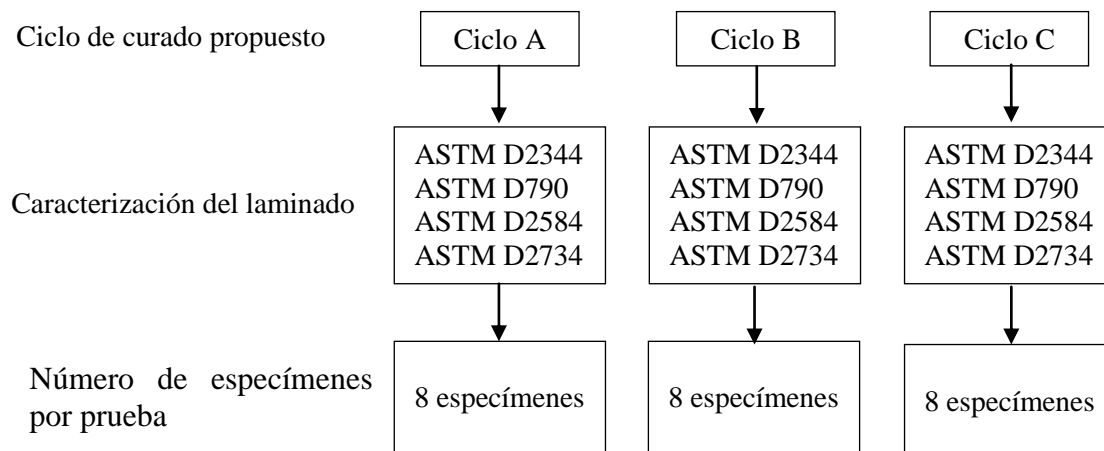


Figura 41. Arreglo de pruebas para caracterización a nivel laminado.

# Capítulo 4 Resultados y discusión

## 4.1 Caracterización a nivel pre-preg.

### 4.1.1 Prueba de adherencia del material (Tack).

En la siguiente tabla se puede observar que el material presentó una adherencia nivel 6 lo que significa que el material moldeado tuvo transferencia de resina a los guantes al ser moldeado así como una alta adherencia del mismo presentando una gran viscosidad. Esto no significa que el material no sea aceptable, sin embargo para fines de comodidad en moldeo un nivel 6 no es el nivel deseado (ver **Tabla 6**).

Prueba de adherencia del material pre-preg.		Nivel Adherencia						
		Espécimen #	1	2	3	4	5	6
Caracterización de material pre-preg.		1						X
		2						X
		3						X
		4						X
		5						X

Tabla 6. Tabla de resultados para la prueba de adherencia.

### 4.1.2 Prueba de flexibilidad del material (Drape).

Los resultados obtenidos para la prueba de flexibilidad del material pre-impregnado muestran que el material puede ser moldeado sin presentar fisuras, arrugas, traslapes o desgarres en la fibra (ver **Tabla 7**).

		Flexibilidad								
		Espécimen #	Fisura		Arruga		Traslape		Desgarre	
			Pasa	Falla	Pasa	Falla	Pasa	Falla	Pasa	Falla
Material Pre-preg	1	X		X		X		X		
	2	X		X		X		X		
	3	X		X		X		X		
	4	X		X		X		X		
	5	X		X		X		X		

Tabla 7. Tabla de resultados para la prueba de flexibilidad.

### 4.1.3 Prueba de contenido de volátiles y resina sin volátiles.

En base a los resultados obtenidos se puede observar que el material presentó un promedio de 4 % en contenido de volátiles y 37.4% en contenido de resina, para este tipo de material el contenido de volátiles debe de estar en un rango de 3-7 %, con un contenido de resina de 38%. Nuestros resultados muestran que estamos en los rangos correspondientes (ver **Tabla 8**).

Material Pre-preg			No. Espécimen		
			1	2	3
Contenido de volátiles y resina.	Peso Prepreg con resina	gr	5.144	5.1575	5.1194
	Peso prepreg calentado	gr	4.9122	4.953	4.9056
	Peso pre-preg sin resina	gr	3.0747	3.0953	3.0662
	Contenido de volatiles	%	4.51%	3.97%	4.18%
	Contenido de resina	%	37.41%	37.51%	37.50%

Tabla 8. Tabla de resultados para prueba de contenido de volátiles y resina sin volátiles.

### 4.1.4 Prueba de flujo de resina.

En lo que respecta a los resultados de flujo de resina de material, se obtiene que el material a una temperatura de 130 °C (266 °F) fluye un 14.5% de su resina, este tipo de prueba se implementó para el desarrolló de los ciclos de curados propuestos (ver **Tabla 9**).

Material Pre-preg	Espécimen #1	Espécimen #2	Espécimen #3
Peso inicial (gr)	19.6868	19.8414	19.4914
Peso final (gr)	17.4446	16.2394	16.7486
Flujo Resina (%)	11.39	18.15	14.07

Tabla 9. Tabla de resultados para flujo de resina.

## 4.2 Caracterización a nivel laminado.

### 4.2.1 Prueba de corte de material.

En la siguiente tabla se puede observar que el material presentó un promedio de esfuerzo al corte Interlaminar de 37.46 MPa (5.43 Kpsi), con un coeficiente de variación de 3.31%, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 10** y **Figura 42**).

ASTM D2344-00/06		Esfuerzo al Corte Interlaminar							
Ciclo de Curado	A	Identificación del Material	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica						
		Identificación del Panel	A-3						
		Fecha de Prueba	10-Marzo-13						
Norma	ASTM D2344-00/06	Espacio entre Soportes del Espécimen (In)	0.41325						
Identificación del Espécimen	Ancho		Espesor		Carga Máxima		Esfuerzo		Modo de Falla
	In	cm	In	cm	Lbf	Kgf	Kpsi	MPa	
SBS-73F-1	0.4830	1.2268	0.0915	0.2324	325.894	147.8255	5.5306	38.1324	Flexure
SBS-73F-2	0.4985	1.2662	0.0920	0.2337	342.469	155.3439	5.6005	38.6143	Flexure
SBS-73F-3	0.5025	1.2764	0.0915	0.2324	341.954	155.1103	5.5779	38.4585	Flexure
SBS-73F-4	0.4895	1.2433	0.0925	0.2350	326.640	148.1639	5.4105	37.3043	Flexure
SBS-73F-5	0.5055	1.2840	0.0920	0.2337	313.484	142.1963	5.0555	34.8567	Flexure
SBS-73F-6	0.5085	1.2916	0.0920	0.2337	336.689	152.7221	5.3977	37.2161	Flexure
SBS-73F-7	0.5095	1.2941	0.0915	0.2324	345.189	156.5777	5.5533	38.2889	Flexure
SBS-73F-8	0.5010	1.2725	0.0920	0.2337	328.180	148.8624	5.3401	36.8189	Flexure
<b>Promedio</b>	0.4998	1.2694	0.0919	0.2334	332.5624	150.8503	5.4333	37.4613	
<b>Desviación Estándar</b>	0.0093	0.0235	0.0004	0.0009	10.8597	4.9260	0.1797	1.2387	
<b>Coefficiente de Variación</b>	1.8541	1.8541	0.3848	0.3848	3.2655	3.2655	3.3066	3.3066	

Tabla 10. Tabla de resultados para esfuerzo al corte Interlaminar ciclo de curado A.

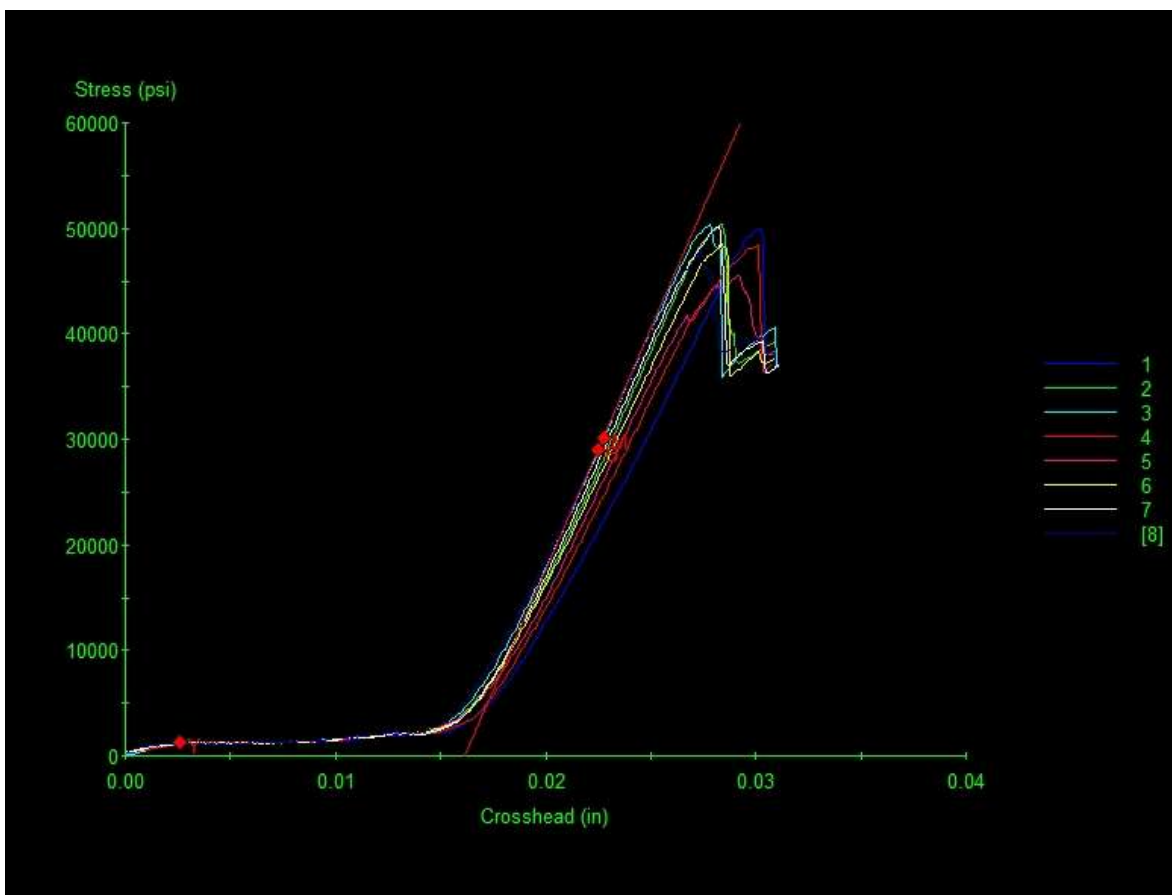


Figura 42. Gráfica de prueba mecánica ASTM D2344 para ciclo de curado A.

En base a los resultados obtenidos para la muestra de especímenes correspondientes al ciclo de curado B, se puede observar que el material presentó un promedio de esfuerzo al corte Interlaminar de 34.52 MPa (5.501 Kpsi) con un coeficiente de variación de 4%, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 11** y **Figura 43**).

<b>ASTM D2344-00/06</b>				<b>Esfuerzo al Corte Interlaminar</b>					
<b>Ciclo de Curado</b>	B			<b>Identificación del Material</b>	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica				
<b>Norma</b>	ASTM D2344-00/06			<b>Identificación del Panel</b>	B-1				
				<b>Fecha de Prueba</b>	16-Marzo-13				
				<b>Espacio entre Soportes del Espécimen (In)</b>	0.4075				

<b>Identificación del Espécimen</b>	<b>Ancho</b>		<b>Espesor</b>		<b>Carga Máxima</b>		<b>Esfuerzo</b>		<b>Modo de Falla</b>
	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>Lbf</b>	<b>Kgf</b>	<b>Kpsi</b>	<b>MPa</b>	
<b>SBS-73F-1</b>	0.4985	1.2662	0.0905	0.2299	293.365	133.0704	4.8770	33.6259	Flexure
<b>SBS-73F-2</b>	0.5010	1.2725	0.0905	0.2299	300.935	136.5041	4.9779	34.3216	Flexure
<b>SBS-73F-3</b>	0.4990	1.2675	0.0910	0.2311	297.052	134.7428	4.9063	33.8280	Flexure
<b>SBS-73F-4</b>	0.4945	1.2560	0.0905	0.2299	285.050	129.2987	4.7771	32.9371	Flexure
<b>SBS-73F-5</b>	0.4950	1.2573	0.0905	0.2299	288.407	130.8214	4.8285	33.2915	Flexure
<b>SBS-73F-6</b>	0.5025	1.2764	0.0900	0.2286	307.680	139.5636	5.1025	35.1807	Flexure
<b>SBS-73F-7</b>	0.5010	1.2725	0.0905	0.2299	319.318	144.8426	5.2820	36.4183	Flexure
<b>SBS-73F-8</b>	0.5000	1.2700	0.0905	0.2299	319.674	145.0041	5.2985	36.5321	Flexure
<b>Promedio</b>	0.4989	1.2673	0.0905	0.2299	301.4351	136.7310	5.0062	34.5169	
<b>Desviación Estándar</b>	0.0029	0.0073	0.0003	0.0007	13.1706	5.9742	0.2008	1.3847	
<b>Coefficiente de Variación</b>	0.5755	0.5755	0.2953	0.2953	4.3693	4.3693	4.0115	4.0115	

Tabla 11. Tabla de resultados para esfuerzo al corte Interlaminar ciclo de curado B.

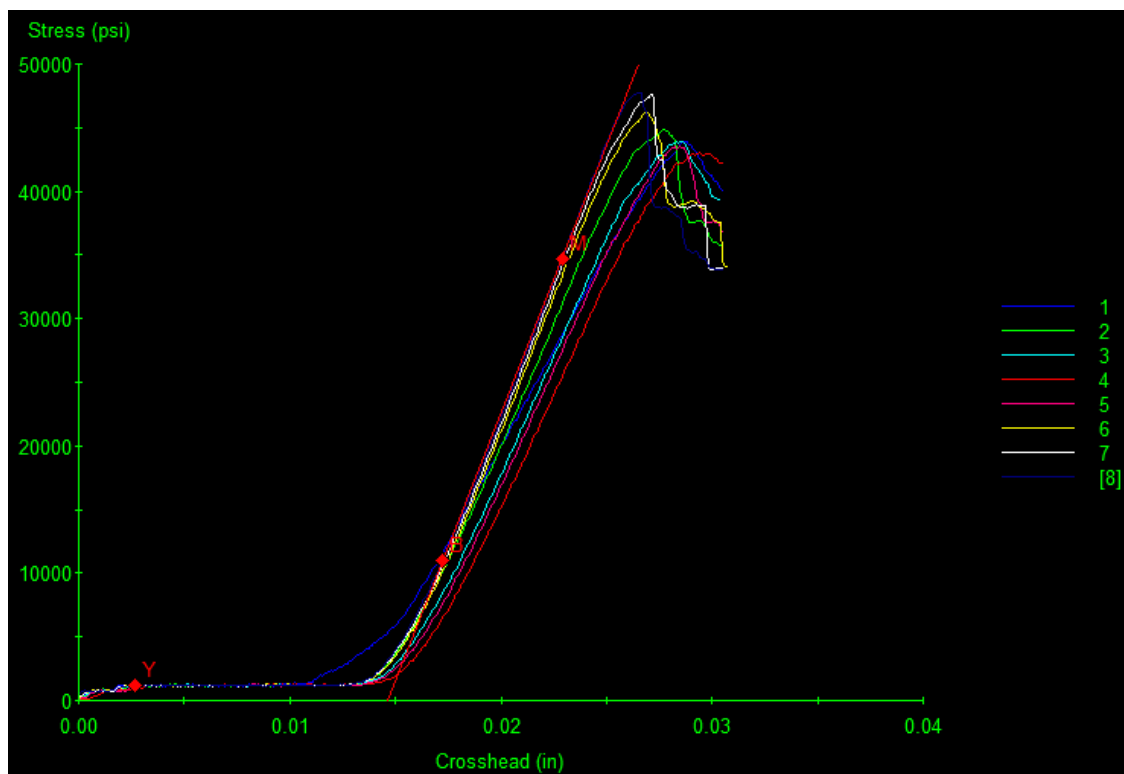


Figura 43. Gráfica de prueba mecánica ASTM D2344 para ciclo de curado B.

En lo que respecta a los resultados obtenidos para el ciclo de curado C, se puede observar que el material presentó un promedio de esfuerzo al corte Interlaminar de 36.15 MPa (5.24 Kpsi), con un coeficiente de variación de 3.3%, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 12 y Figura 44**).

<b>ASTM D2344-00/06</b>				<b>Esfuerzo al Corte Interlaminar</b>					
<b>Ciclo de Curado</b>	C			<b>Identificación del Material</b>	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica				
<b>Norma</b>	ASTM D2344-00/06			<b>Identificación del Panel</b>	C-2				
				<b>Fecha de Prueba</b>	10-Marzo-13				
				<b>Espacio entre Soportes del Espécimen (In)</b>	0.41231				

<b>Identificación del Espécimen</b>	<b>Ancho</b>		<b>Espesor</b>		<b>Carga Máxima</b>		<b>Esfuerzo</b>		<b>Modo de Falla</b>
	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>Lbf</b>	<b>Kgf</b>	<b>Kpsi</b>	<b>MPa</b>	
<b>SBS-73F-1</b>	0.4835	1.2281	0.0915	0.2324	302.075	137.0212	5.1210	35.3083	Flexure
<b>SBS-73F-2</b>	0.5000	1.2700	0.0910	0.2311	333.418	151.2384	5.4959	37.8931	Flexure
<b>SBS-73F-3</b>	0.5010	1.2725	0.0930	0.2362	327.269	148.4492	5.2680	36.3218	Flexure
<b>SBS-73F-4</b>	0.4700	1.1938	0.0915	0.2324	289.390	131.2673	5.0469	34.7974	Flexure
<b>SBS-73F-5</b>	0.4850	1.2319	0.0910	0.2311	313.632	142.2635	5.3296	36.7465	Flexure
<b>SBS-73F-6</b>	0.4980	1.2649	0.0915	0.2324	323.280	146.6398	5.3210	36.6872	Flexure
<b>SBS-73F-7</b>	0.4685	1.1900	0.0915	0.2324	284.887	129.2247	4.9843	34.3658	Flexure
<b>SBS-73F-8</b>	0.4735	1.2027	0.0920	0.2337	312.074	141.5568	5.3729	37.0451	Flexure
<b>Promedio</b>	0.4849	1.2317	0.0916	0.2327	310.7531	140.9576	5.2425	36.1456	
<b>Desviación Estándar</b>	0.0135	0.0344	0.0006	0.0016	17.5425	7.9573	0.1754	1.2092	
<b>Coefficiente de Variación</b>	2.7904	2.7904	0.6994	0.6994	5.6452	5.6452	3.3454	3.3454	

Tabla 12. Tabla de resultados para esfuerzo al corte Interlaminar ciclo de curado C.

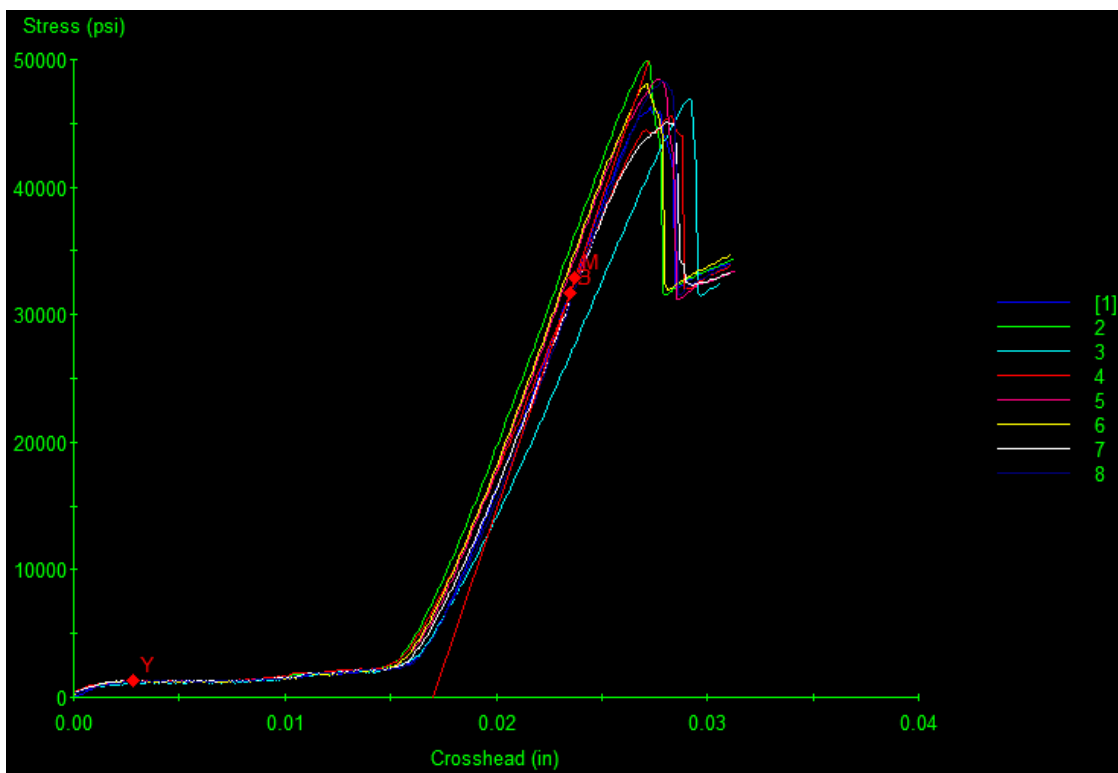


Figura 44. Gráfica de prueba mecánica ASTM D2344 para ciclo de curado C.

### 4.2.2 Prueba de flexión.

En la siguiente tabla se puede observar que el material presentó un promedio de esfuerzo a la flexión de 567.1 MPa (82.24 Kpsi) con un coeficiente de variación de 2.34%, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 13** y **Figura 45**).

ASTM D790-10		Esfuerzo a la Flexión	
Ciclo de Curado	A	Identificación del Material	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica
		Identificación del Panel	A-3
		Fecha de Prueba	10-Marzo-13
Norma	ASTM D790-10	Espacio entre Soportes del Espécimen (In)	1.4830

Identificación del Espécimen	Ancho		Espesor		Carga Máxima		Esfuerzo		Modo de Falla
	In	cm	In	cm	Lbf	Kgf	Kpsi	MPa	
<b>FLEX-73F-1</b>	0.5000	1.2700	0.0925	0.2350	163.890	74.3405	85.3329	588.3533	Flexure
<b>FLEX-73F-2</b>	0.4975	1.2637	0.0925	0.2350	158.387	71.8443	82.8821	571.4555	Flexure
<b>FLEX-73F-3</b>	0.5045	1.2814	0.0930	0.2362	162.150	73.5512	82.7766	570.7281	Flexure
<b>FLEX-73F-4</b>	0.4920	1.2497	0.0935	0.2375	160.550	72.8255	83.1457	573.2730	Flexure
<b>FLEX-73F-5</b>	0.5095	1.2941	0.0920	0.2337	158.523	71.9060	81.8823	564.5621	Flexure
<b>FLEX-73F-6</b>	0.5115	1.2992	0.0925	0.2350	158.169	71.7455	80.5026	555.0493	Flexure
<b>FLEX-73F-7</b>	0.5065	1.2865	0.0935	0.2375	156.743	71.0986	78.8503	543.6570	Flexure
<b>FLEX-73F-8</b>	0.4875	1.2383	0.0930	0.2362	156.306	70.9004	82.5758	569.3436	Flexure
<b>Promedio</b>	0.5011	1.2729	0.0928	0.2357	159.3398	72.2765	82.2435	567.0527	
<b>Desviación Estándar</b>	0.0085	0.0215	0.0005	0.0013	2.6446	1.1996	1.9212	13.2460	
<b>Coefficiente de Variación</b>	1.6888	1.6888	0.5714	0.5714	1.6598	1.6598	2.3359	2.3359	

Tabla 13. Tabla de resultados para esfuerzo a la flexión ciclo de curado A.

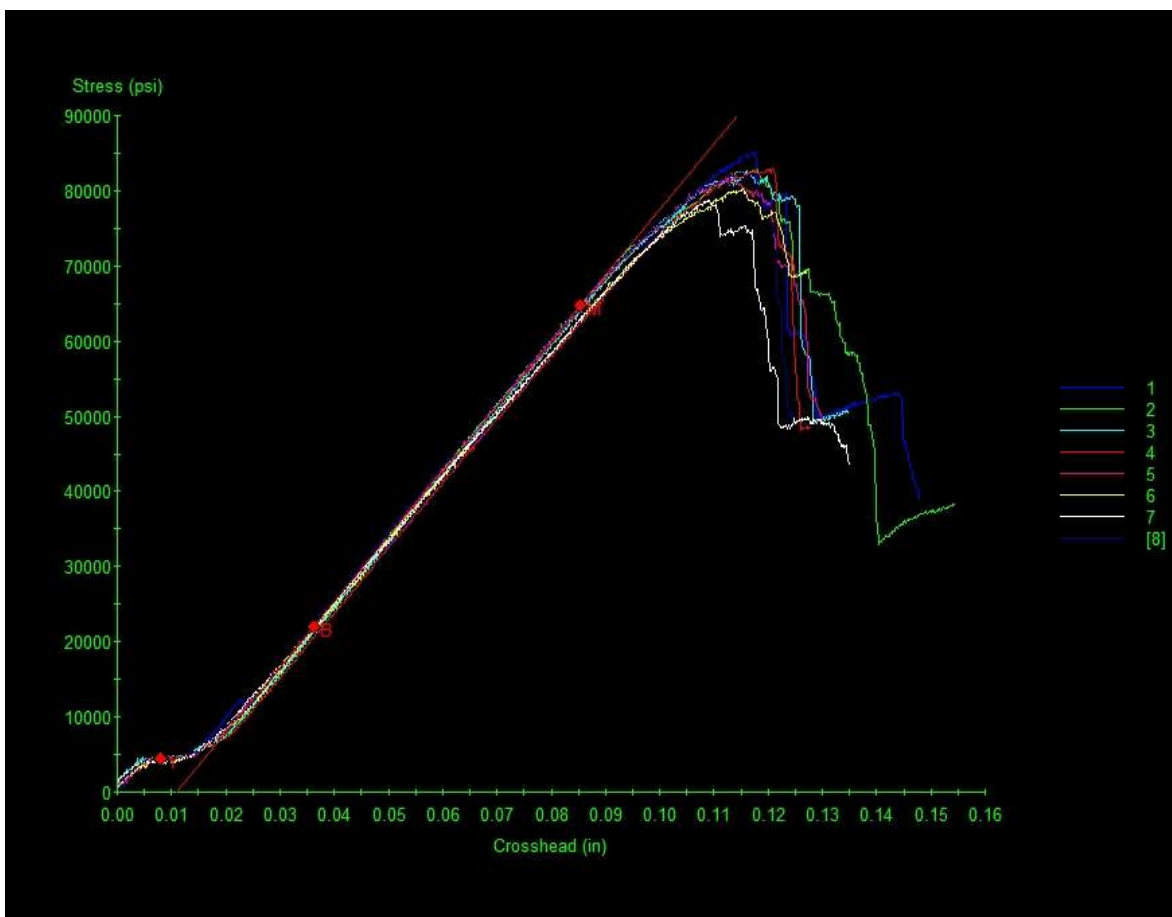


Figura 45. Gráfica de prueba mecánica ASTM D790 para ciclo de curado A.

En base a los resultados obtenidos para la muestra de especímenes correspondientes al ciclo de curado B, se puede observar que el material presentó un promedio de esfuerzo a la flexión de 620.7 MPa (90 Kpsi), con un coeficiente de variación de 5.8%, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 14** y **Figura 46**).

<b>ASTM D790-10</b>				<b>Esfuerzo a la Flexión</b>					
<b>Ciclo de Curado</b>	B			<b>Identificación del Material</b>	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica				
<b>Norma</b>	ASTM D790-10			<b>Identificación del Panel</b>	B-1				
				<b>Fecha de Prueba</b>	16-Marzo-13				
				<b>Espacio entre Soportes del Espécimen (In)</b>	1.4489				

<b>Identificación del Espécimen</b>	<b>Ancho</b>		<b>Espesor</b>		<b>Carga Máxima</b>		<b>Esfuerzo</b>		<b>Modo de Falla</b>
	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>Lbf</b>	<b>Kgf</b>	<b>Kpsi</b>	<b>MPa</b>	
<b>FLEX-73F-1</b>	0.5015	1.2738	0.0910	0.2311	151.1220	68.5489	79.0861	545.2828	Flexure
<b>FLEX-73F-2</b>	0.4955	1.2586	0.0905	0.2299	170.6730	77.4173	91.4009	630.1909	Flexure
<b>FLEX-73F-3</b>	0.5030	1.2776	0.0905	0.2299	173.9100	78.8856	91.7457	632.5683	Flexure
<b>FLEX-73F-4</b>	0.4905	1.2459	0.0905	0.2299	178.0100	80.7453	96.3018	663.9817	Flexure
<b>FLEX-73F-5</b>	0.4980	1.2649	0.0905	0.2299	164.8550	74.7782	87.8419	605.6523	Flexure
<b>FLEX-73F-6</b>	0.4970	1.2624	0.0905	0.2299	173.5520	78.7232	92.6622	638.8873	Flexure
<b>FLEX-73F-7</b>	0.5030	1.2776	0.0905	0.2299	176.8770	80.2314	93.3109	643.3600	Flexure
<b>FLEX-73F-8</b>	0.4970	1.2624	0.0905	0.2299	164.4740	74.6054	87.8153	605.4689	Flexure
<b>Promedio</b>	0.4982	1.2654	0.0906	0.2300	169.1841	76.7419	90.0206	620.6740	
<b>Desviación Estándar</b>	0.0043	0.0108	0.0002	0.0004	8.8469	4.0129	5.2278	36.0449	
<b>Coefficiente de Variación</b>	0.8532	0.8532	0.1952	0.1952	5.2291	5.2291	5.8074	5.8074	

Tabla 14. Tabla de resultados para esfuerzo a la flexión ciclo de curado B.

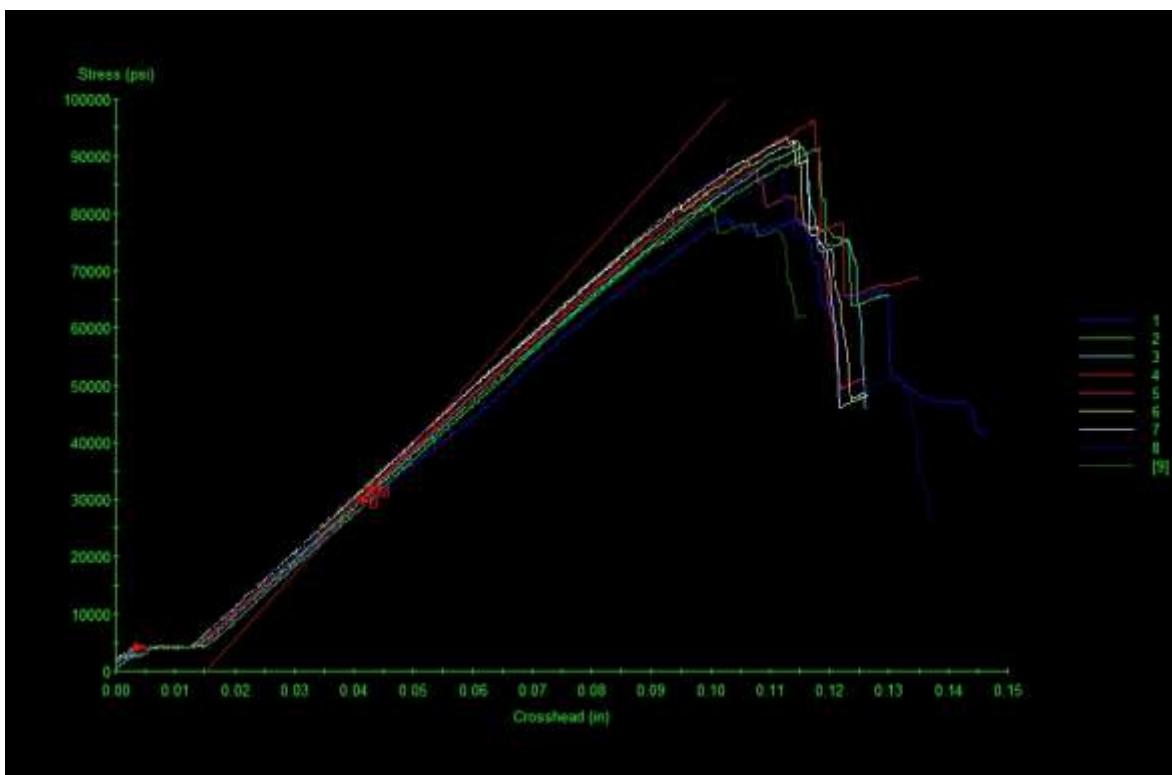


Figura 46. Gráfica de prueba mecánica ASTM D790 para ciclo de curado B.

En lo que respecta a los resultados obtenidos para el ciclo de curado C, se puede observar que el material presentó un promedio de esfuerzo a la flexión de 594.4 MPa (86.2 Kpsi), con un coeficiente de variación de 1.8%, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 15** y **Figura 47**).

<b>ASTM D790-10</b>		<b>Esfuerzo a la Flexión</b>			
<b>Ciclo de Curado</b>	C	<b>Identificación del Material</b>	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica		
<b>Norma</b>	ASTM D790-10	<b>Identificación del Panel</b>	C-2		
		<b>Fecha de Prueba</b>	10-Marzo-13		
		<b>Espacio entre Soportes del Espécimen (In)</b>	1.4690		

<b>Identificación del Espécimen</b>	<b>Ancho</b>		<b>Espesor</b>		<b>Carga Máxima</b>		<b>Esfuerzo</b>		<b>Modo de Falla</b>
	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>In</b>	<b>cm</b>	<b>Lbf</b>	<b>Kgf</b>	<b>Kpsi</b>	<b>MPa</b>	
<b>FLEX-73F-1</b>	0.5055	1.2840	0.0910	0.2311	161.3160	73.1729	84.9154	585.4747	Flexure
<b>FLEX-73F-2</b>	0.5020	1.2751	0.0925	0.2350	163.8760	74.3342	84.0700	579.6458	Flexure
<b>FLEX-73F-3</b>	0.5015	1.2738	0.0930	0.2362	168.2840	76.3336	85.4907	589.4413	Flexure
<b>FLEX-73F-4</b>	0.5049	1.2824	0.0915	0.2324	164.9670	74.8290	85.9929	592.9038	Flexure
<b>FLEX-73F-5</b>	0.4930	1.2522	0.0915	0.2324	163.4230	74.1287	87.2443	601.5320	Flexure
<b>FLEX-73F-6</b>	0.5055	1.2840	0.0920	0.2337	166.6220	75.5797	85.8121	591.6573	Flexure
<b>FLEX-73F-7</b>	0.5060	1.2852	0.0915	0.2324	171.2350	77.6722	89.0662	614.0936	Flexure
<b>FLEX-73F-8</b>	0.5025	1.2764	0.0915	0.2324	166.1800	75.3792	87.0389	600.1158	Flexure
<b>Promedio</b>	0.5026	1.2766	0.0918	0.2332	165.7379	75.1787	86.2038	594.3580	
<b>Desviación Estándar</b>	0.0043	0.0108	0.0007	0.0017	3.0857	1.3997	1.5535	10.7109	
<b>Coficiente de Variación</b>	0.8488	0.8488	0.7093	0.7093	1.8618	1.8618	1.8021	1.8021	

Tabla 15. Tabla de resultados para esfuerzo a la flexión ciclo de curado C.

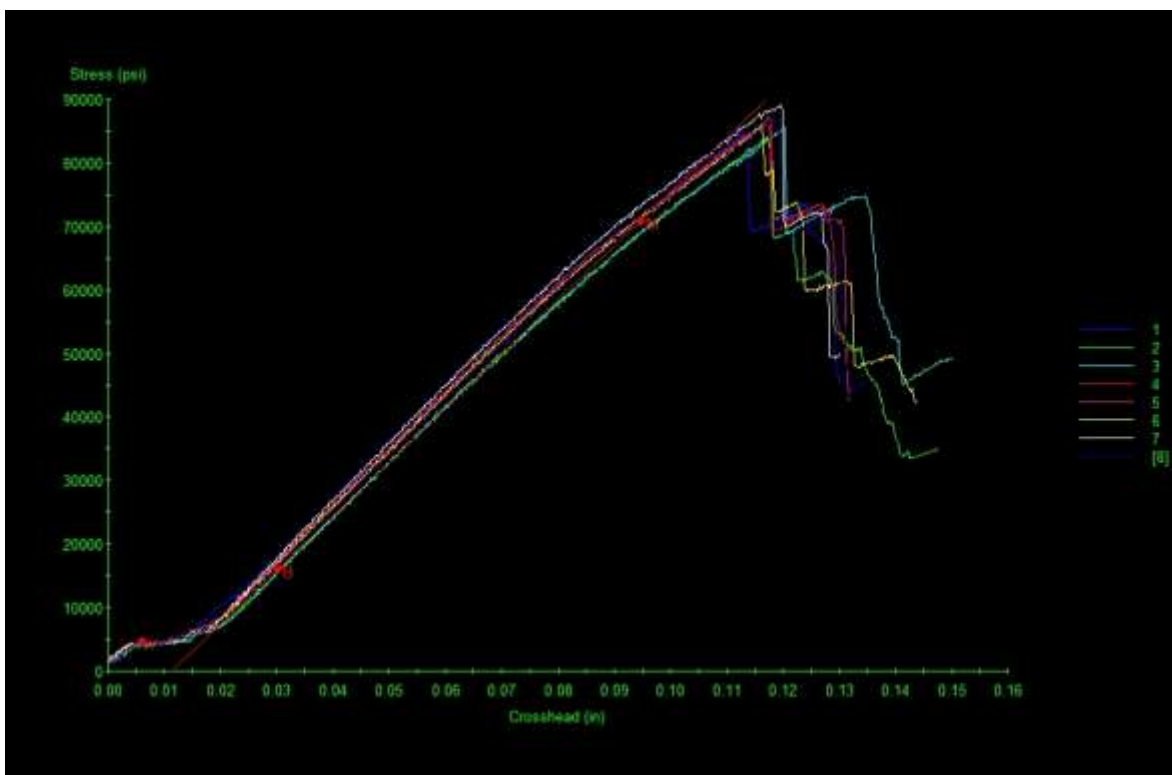


Figura 47. Gráfica de prueba mecánica ASTM D790 para ciclo de curado C.

### 4.2.3 Prueba de contenido de resina y poros.

En la siguiente tabla se puede observar que el material presentó un promedio de contenido de resina de 19.88%, con un porcentaje de poros de 8.658%, en general los especímenes que conforman la muestra no presentan una variación significativa en ellos, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 16**)

<b>ASTM D2584-08/ASTM D2734-09</b>		<b>Contenido de resina y poros</b>	
<b>Ciclo de Curado</b>	A	<b>Identificación del Material</b>	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica
		<b>Identificación del Panel</b>	A-4
		<b>Fecha de Prueba</b>	10-Marzo-13
<b>Espécimen</b>	<b>% Resina</b>	<b>% Fibra</b>	<b>% Poros</b>
1-A	19.8394	80.1606	9.5698
2-A	19.8484	80.1516	8.5457
3-A	19.8866	80.1134	8.7189
4-A	19.9404	80.0596	8.0173
5-A	19.9641	80.0359	8.4477
6-A	19.8366	80.1634	8.7369
7-A	19.8020	80.1980	9.1590
8-A	19.9525	80.0475	8.0687
<b>Promedio</b>	19.8838	80.1163	8.6580
<b>Desviación Estándar</b>	0.0616	0.0616	0.5219
<b>Coefficiente de Variación</b>	0.3096	0.0768	6.0284

Tabla 16. Tabla de resultados para contenido de resina y poros en ciclo de curado A.

En base a los resultados obtenidos de contenido de resina y porcentaje de poros para la muestra de especímenes correspondientes al ciclo de curado B, se puede observar que el material presentó un promedio de contenido de resina de 20.17%, con un porcentaje de poros de 8.15%, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 17**).

<b>ASTM D2584-08/ASTM D2734-09</b>		<b>Contenido de resina y poros</b>		
<b>Ciclo de Curado</b>	B	<b>Identificación del Material</b>	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica	
		<b>Identificación del Panel</b>	B-2	
		<b>Fecha de Prueba</b>	12-Marzo-13	
<b>Especímen</b>	<b>% Resina</b>	<b>% Fibra</b>	<b>% Poros</b>	
1-B	20.1454	79.8546	8.2712	
2-B	20.2114	79.7886	8.5659	
3-B	20.1583	79.8417	8.3005	
4-B	20.2027	79.7973	7.0547	
5-B	20.1039	79.8961	8.0335	
6-B	20.1860	79.8140	8.1885	
7-B	20.2004	79.7996	9.0649	
8-B	20.1531	79.8469	7.6830	
<b>Promedio</b>	20.1702	79.8299	8.1453	
<b>Desviación Estándar</b>	0.0366	0.0366	0.5952	
<b>Coficiente de Variación</b>	0.1813	0.0458	7.3075	

Tabla 17. Tabla de resultados para contenido de resina y poros en ciclo de curado B.

En lo que respecta a los resultados de contenido de resina y porcentaje en poros para el ciclo de curado C, se puede observar que el material presentó un promedio de contenido de resina de 19.78%, con un porcentaje de poros de 8.01, en general los resultados presentan una distribución normal, por lo que se puede descartar algún valor atípico (ver **Tabla 18**).

<b>ASTM D2584-08/ASTM D2734-09</b>		<b>Contenido de resina y poros</b>	
<b>Ciclo de Curado</b>	C	<b>Identificación del Material</b>	Fibra de Vidrio con Resina Fenólica
		<b>Identificación del Panel</b>	C-1
		<b>Fecha de Prueba</b>	14-Marzo-13
<b>Espécimen</b>	<b>% Resina</b>	<b>% Fibra</b>	<b>% Poros</b>
1-C	19.7672	80.2328	8.7753
2-C	19.7711	80.2289	7.9373
3-C	19.7570	80.2430	7.6636
4-C	19.8420	80.1580	8.7536
5-C	19.8066	80.1934	8.1142
6-C	19.7688	80.2312	8.0692
7-C	19.7751	80.2249	6.9562
8-C	19.7361	80.2639	7.8206
<b>Promedio</b>	19.7780	80.2220	8.0113
<b>Desviación Estándar</b>	0.0324	0.0324	0.5885
<b>Coefficiente de Variación</b>	0.1640	0.0404	7.3464

Tabla 18. Tabla de resultados para contenido de resina y poros en ciclo de curado C.

## 4.3 Análisis de datos.

### 4.3.1 Diagramas de dispersión.

En la **Figura 48**, podemos observar la interacción entre el porcentaje de resina y la prueba mecánica de corte (SBS), en base a los resultados mostrados se obtiene un mayor valor promedio de fuerza al corte para el grupo de datos correspondiente a ciclo de curado A (5.4333 Kpsi), el cual contiene un porcentaje de resina promedio de 19.88%. También podemos observar que el ciclo de curado C tiene el valor promedio de porcentaje de resina muy similar al ciclo de curado A, sin embargo su valor promedio de fuerza al corte es menor (5.2425 Kpsi). Respecto al ciclo de curado B, su grupo de datos mostró tener el valor promedio de porcentaje de resina mayor (20.17%) en comparación a los otros dos ciclos de curado, por otra parte este ciclo de curado obtuvo el valor promedio de fuerza al corte más bajo (4.4500 Kpsi).

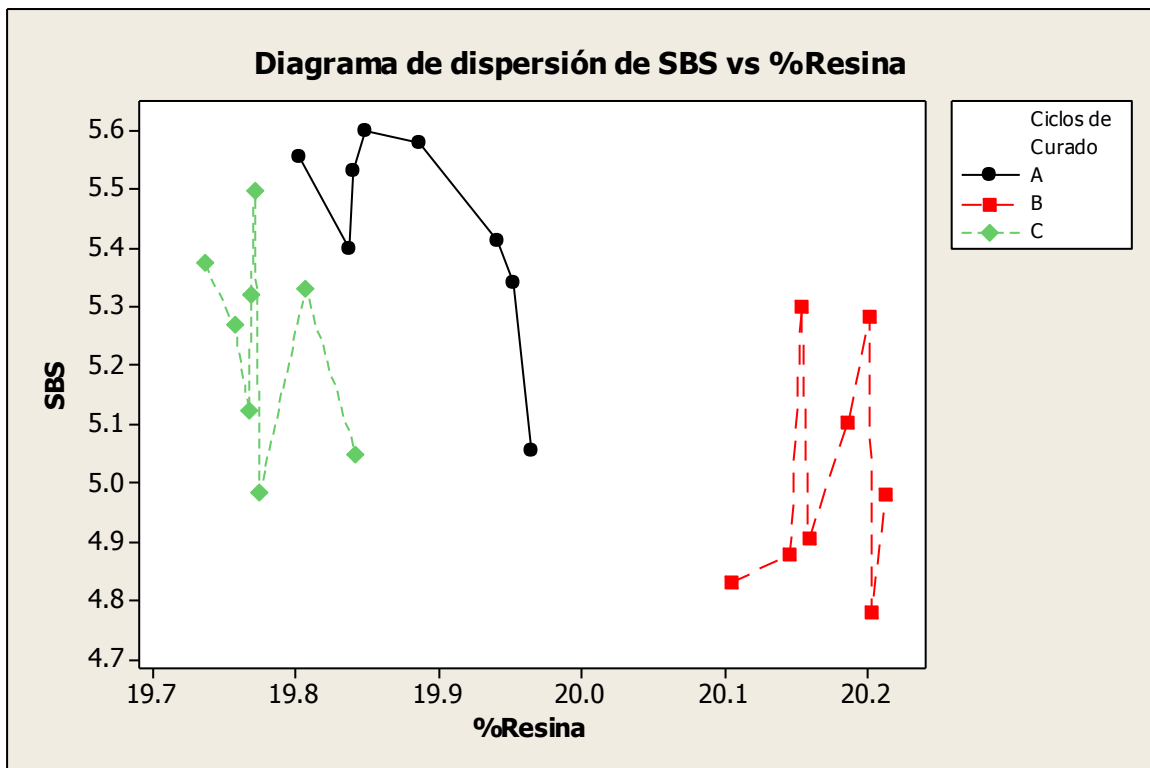


Figura 48. Diagrama de dispersión de SBS vs % Resina.

Analizando la gráfica correspondiente al diagrama de dispersión de SBS vs % Poros (Ver **Figura 49**), podemos observar la interacción entre el porcentaje de poros y la prueba mecánica de corte (SBS), en base a los resultados mostrados se obtiene un mayor valor promedio de fuerza al corte para el grupo de datos correspondiente a ciclo de curado A (5.4333 Kpsi), el cual contiene un porcentaje de poros promedio de 8.6580 %. También podemos ver que el ciclo de curado C tiene el valor promedio de porcentaje de poros más bajo, igual a 8.0113%, sin embargo su valor promedio de fuerza al corte es ligeramente menor (5.2425 Kpsi) al del ciclo de curado A. Respecto al ciclo de curado B, su grupo de datos mostro tener un valor promedio de porcentaje de poros de 8.1453 %, por otra parte este ciclo de curado obtuvo el valor promedio de fuerza al corte más bajo (4.4500 Kpsi).

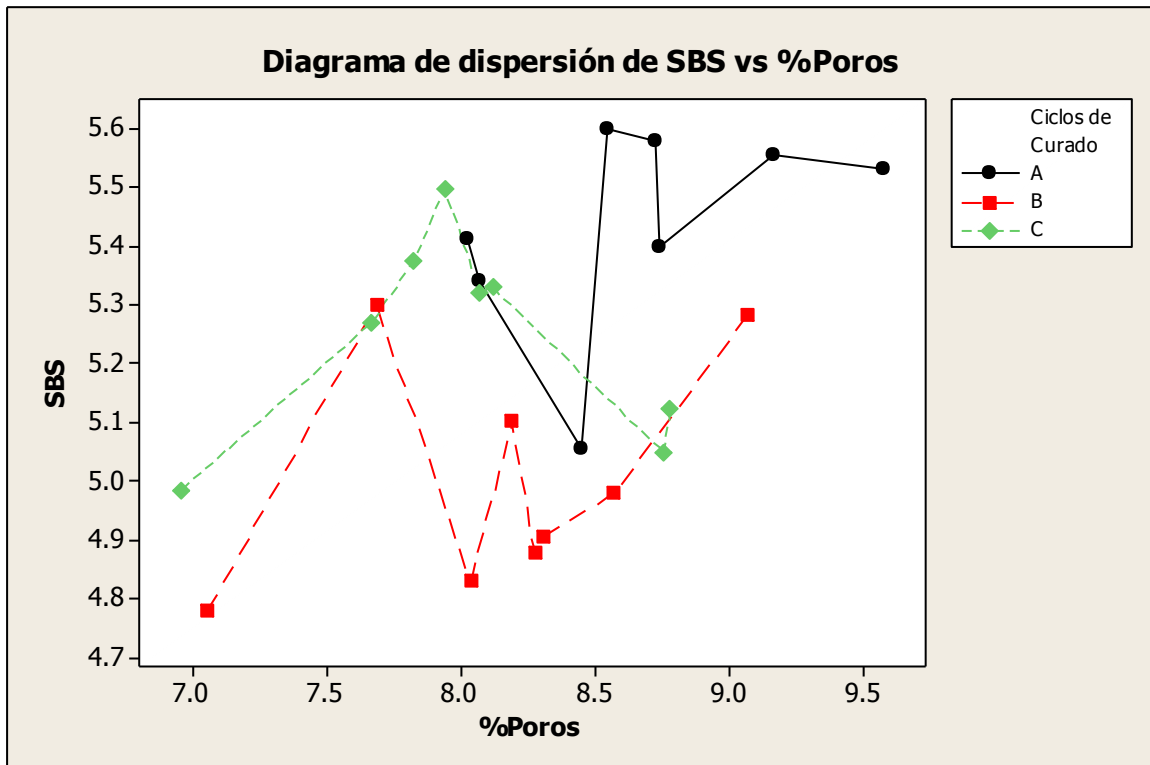


Figura 49. Diagrama de dispersión de SBS vs % Poros.

En base a los resultados mostrados en la **Figura 50**, se obtiene un mayor valor promedio de fuerza a la flexión para el grupo de datos correspondiente a ciclo de curado B (88.9850 Kpsi), el cual contiene un porcentaje de resina promedio de 20.17 %. También podemos ver que el ciclo de curado C y A tienen un valor promedio de porcentaje de resina muy similar, así como su valor promedio de fuerza a la flexión.

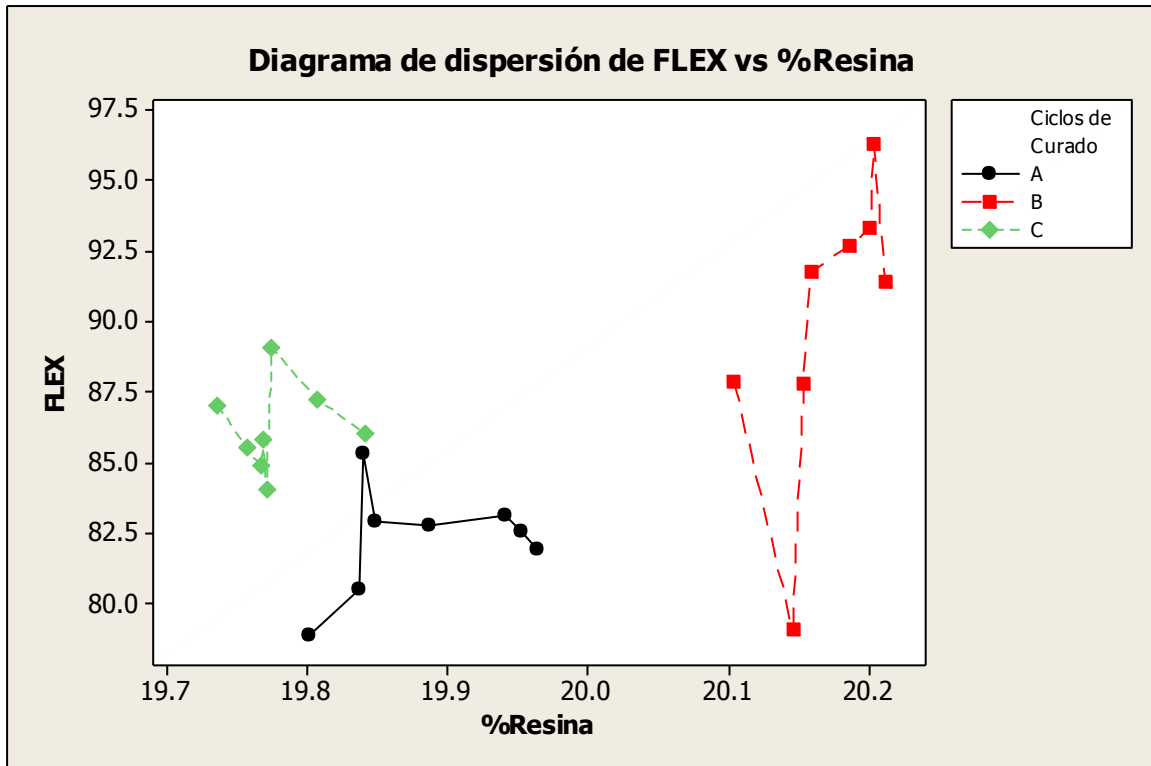


Figura 50. Diagrama de dispersión de Flex vs % Resina.

En la siguiente gráfica (ver **Figura 51**), podemos observar la interacción entre el porcentaje de poros y la prueba mecánica flexión, en base a los resultados mostrados se obtiene un mayor valor promedio de fuerza a la flexión para el grupo de datos correspondiente a ciclo de curado B (88.9850 Kpsi), el cual contiene un porcentaje de porosidad promedio de 8.1453 %. También podemos ver que el ciclo de curado C tiene el valor promedio de porcentaje de poros más bajo, igual a 8.0113%, sin embargo su valor promedio de fuerza a la flexión es ligeramente menor al ciclo de curado B (86.2038 Kpsi). Respecto al ciclo de curado A, su grupo de datos tuvo el valor promedio de porcentaje de poros más alto y el valor promedio de fuerza a la flexión más bajo.

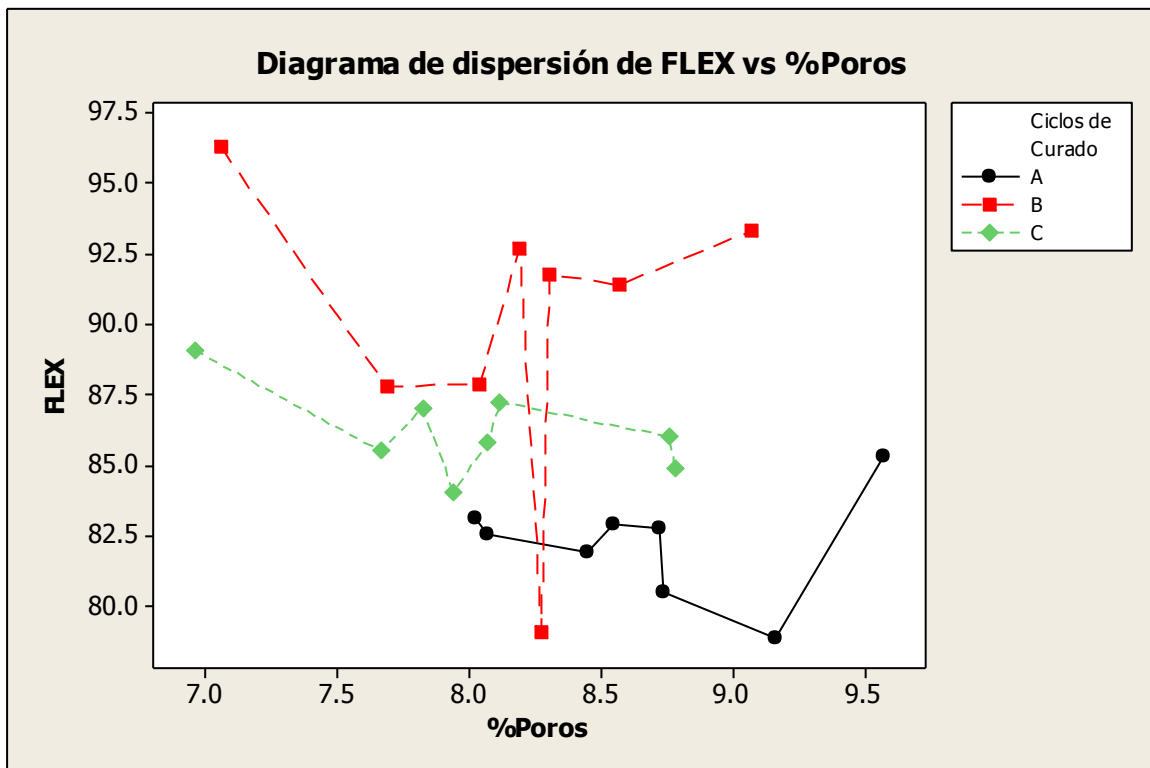


Figura 51. Diagrama de dispersión de Flex vs % Poros.

En la **Figura 52**, podemos observar la interacción entre el porcentaje de poros y el porcentaje de resina, en base a los resultados mostrados se obtiene un mayor valor promedio de porcentaje de resina para el grupo de datos correspondiente a ciclo de curado B (20.1702 %), el cual contiene un porcentaje de poros promedio de 8.1453 %. También podemos ver que el ciclo de curado C tiene el valor promedio de porcentaje de resina más bajo, igual a 8.0113%, sin embargo su valor promedio de porcentaje de poros es ligeramente menor al ciclo de curado B. Respecto al ciclo de curado A, su grupo de datos tuvo el valor promedio de porcentaje de poros más alto con un valor promedio de porcentaje de resina intermedio igual a 19.8838%.

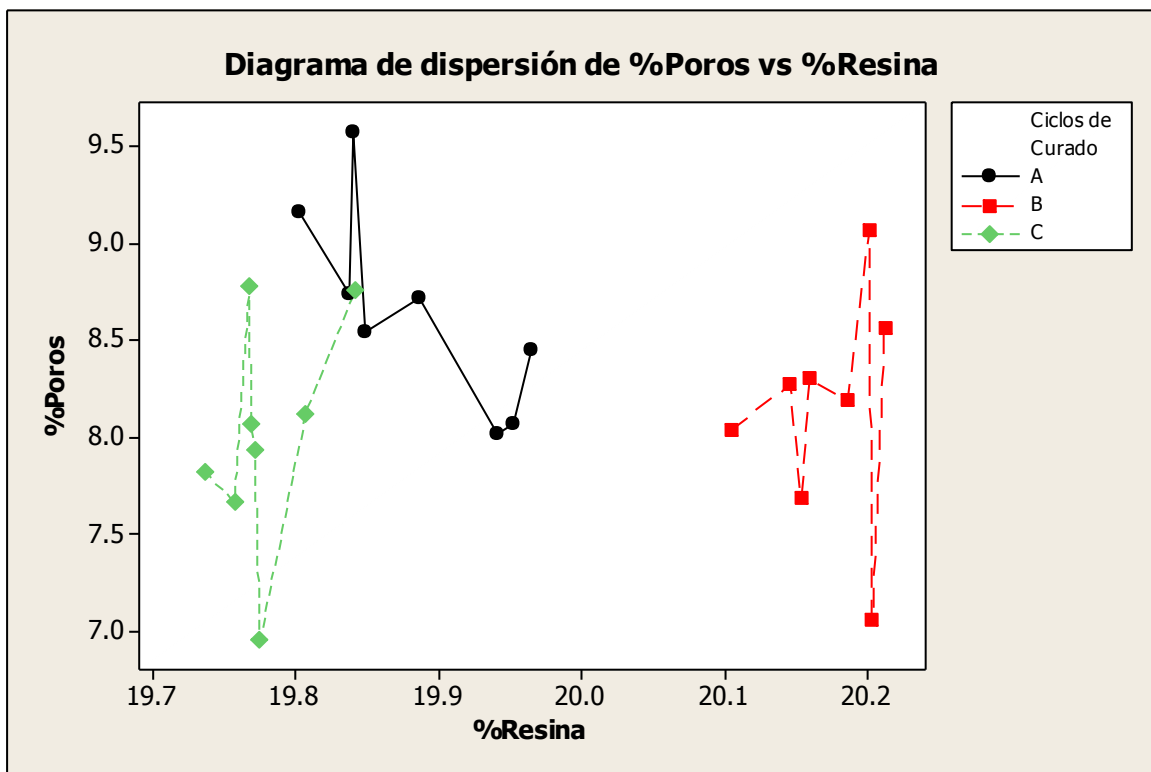


Figura 52. Diagrama de dispersión de % Poros vs % Resina.

### 4.3.2 Gráfica de efectos principales.

En la siguiente gráfica (ver **Figura 53**), podemos observar que el ciclo de curado A se obtuvo el valor promedio de fuerza al corte (SBS) más alto en comparación a los otros dos ciclos presentado una fuerza al corte de 5.4333 Kpsi. El ciclo de curado B presentó el valor más bajo de fuerza al corte igual a 4.4500 Kpsi.

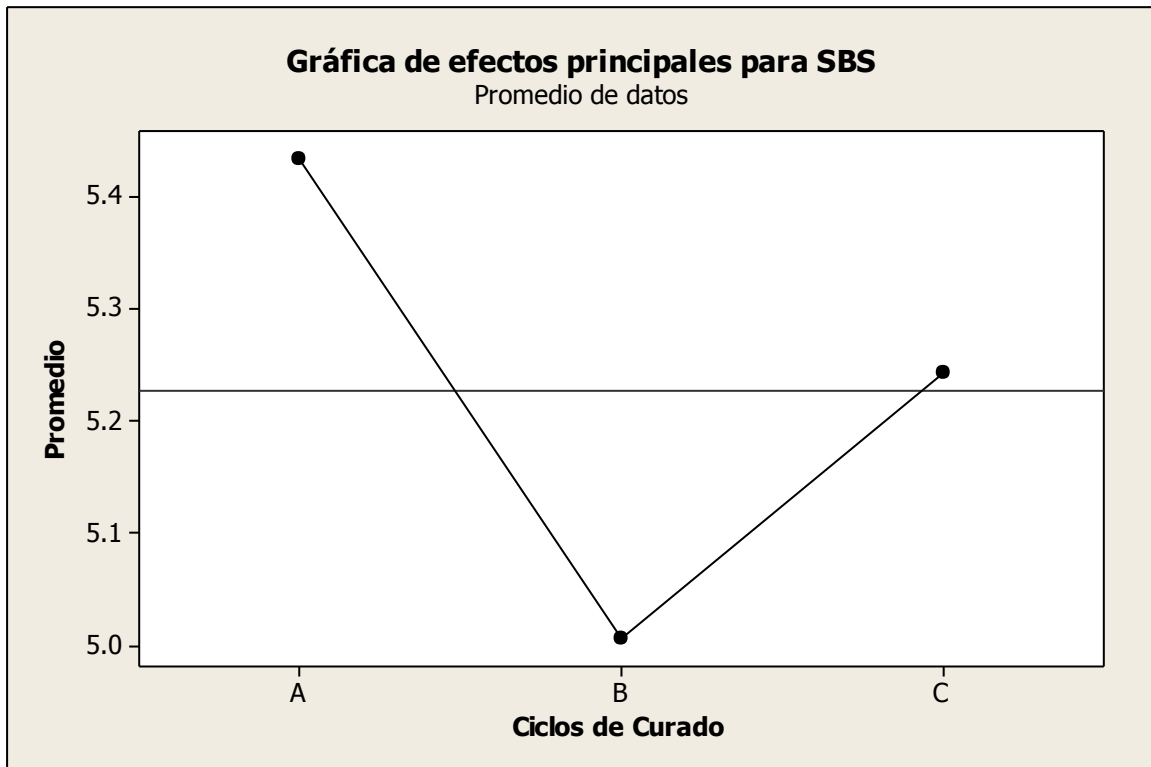


Figura 53. Gráfica de efectos principales para SBS.

En la **Figura 54**, podemos observar que el ciclo de curado B se obtuvo el valor promedio de fuerza a la flexión más alto en comparación a los otros dos ciclos presentado una fuerza a la flexión de 88.9850 Kpsi. El ciclo de curado A presentó el valor más bajo de fuerza a la flexión igual a 82.2435 Kpsi.

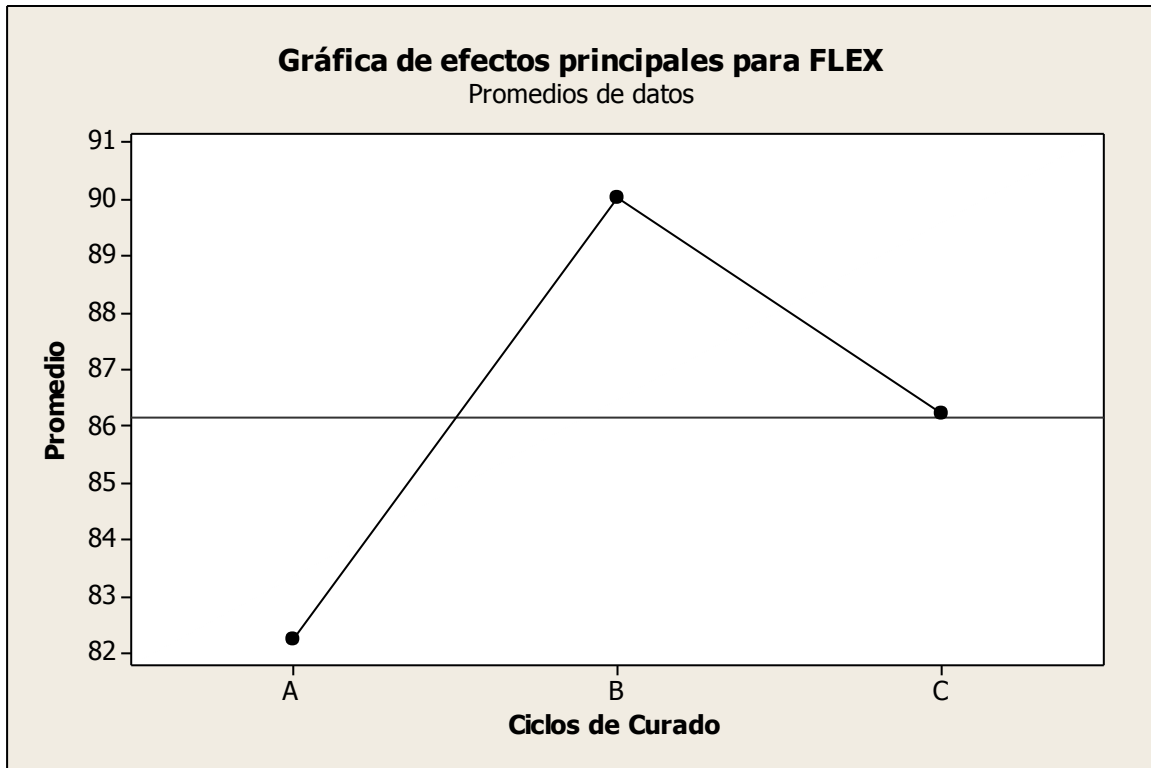


Figura 54. Gráfica de efectos principales para Flex.

En la gráfica mostrada (ver **Figura 55**), podemos observar que el ciclo de curado B se obtuvo el valor promedio de porcentaje de resina más alto en comparación a los otros dos ciclos presentado un valor de porcentaje de resina de 20.1702 %. El ciclo de curado C presentó el valor más bajo de porcentaje de resina igual a 19.7780 %.

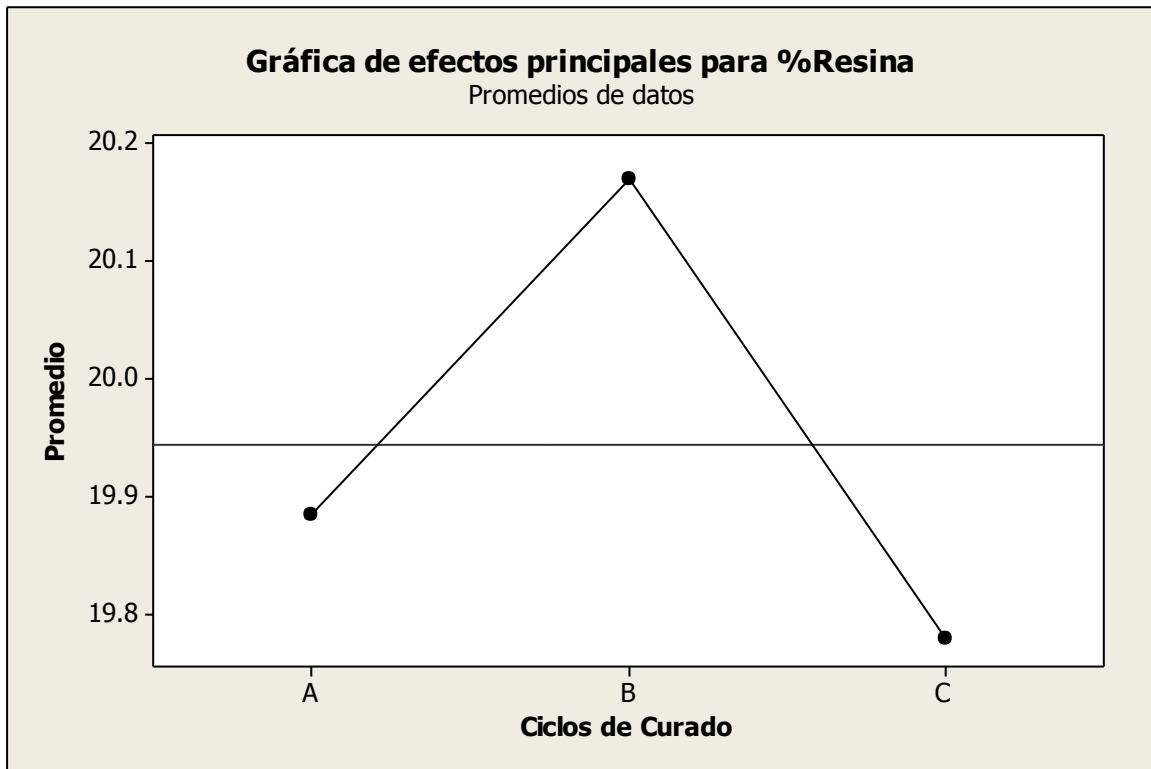


Figura 55. Gráfica de efectos principales para %Resina.

En la **Figura 56**, podemos observar que el ciclo de curado A se obtuvo el valor promedio de porcentaje de poros más alto en comparación a los otros dos ciclos presentado un valor de porcentaje de poros de 8.6580 %. El ciclo de curado C presentó el valor más bajo de porcentaje de poros igual a 8.0113 %.

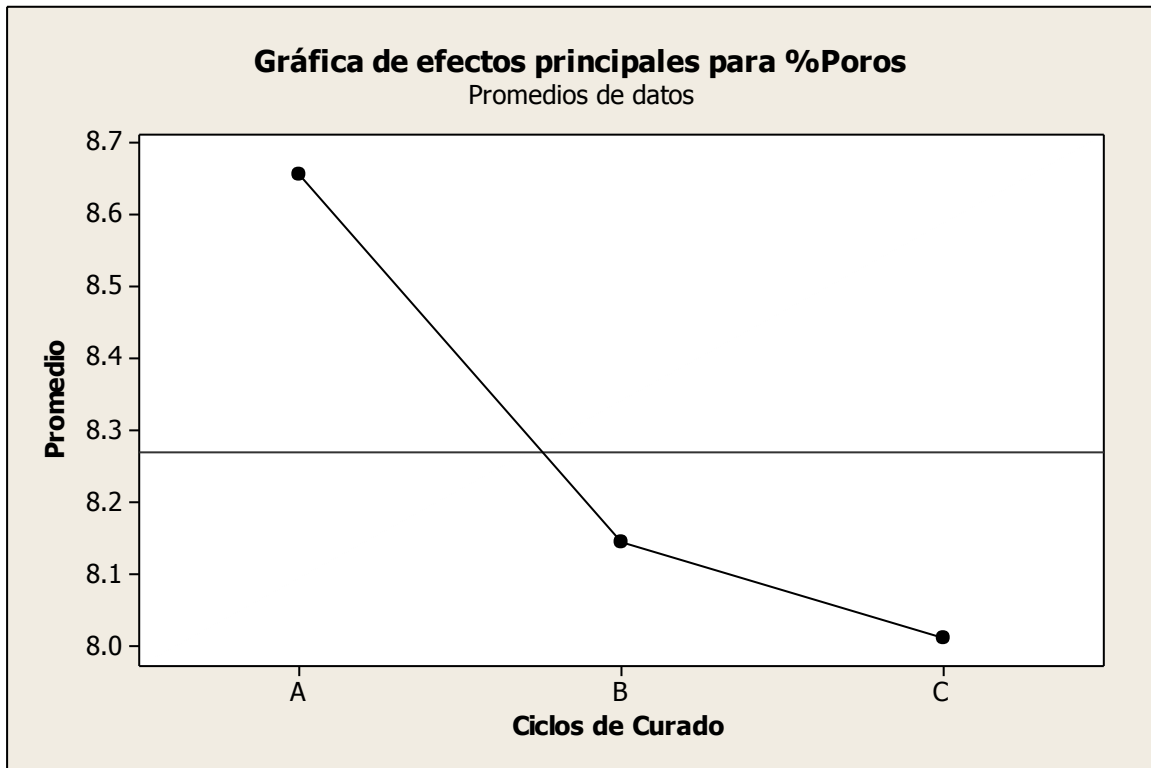


Figura 56. Gráfica de efectos principales para %Poros.

### 4.3.3 Prueba de igualdad de varianzas.

Las pruebas de igualdad de varianza realizadas para los tres diferentes ciclos y los cuatro diferentes factores medidos (prueba al corte, flexión, porcentaje de resina y porcentaje de poros) se realizó para analizar si existe una diferencia significativa entre ciclos y factores, es decir, si entre ciclos estos factores se ven realmente afectados o en caso contrario si entre ciclos no hay un impacto en los factores.

Para la prueba de Levene y Barlett todos los factores obtuvieron un valor P mayor a 0.05, por lo que se llega a la conclusión que para los diferentes ciclos las varianzas respecto a los cuatro diferentes factores medidos son similares y no hay una diferencia significativa entre ciclos que tenga un impacto en sus propiedades mecánicas y físicas (ver **Figuras 57, 58, 59 y 60**).

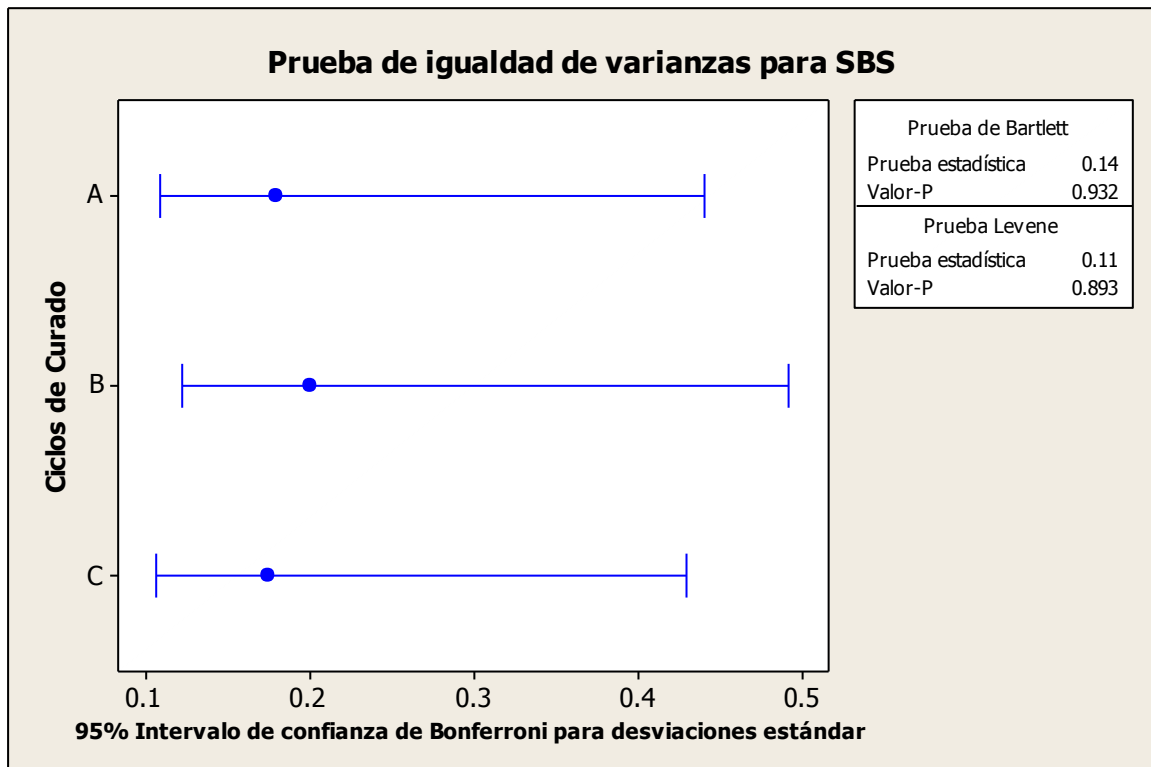


Figura 57. Prueba de igualdad de varianzas para SBS.

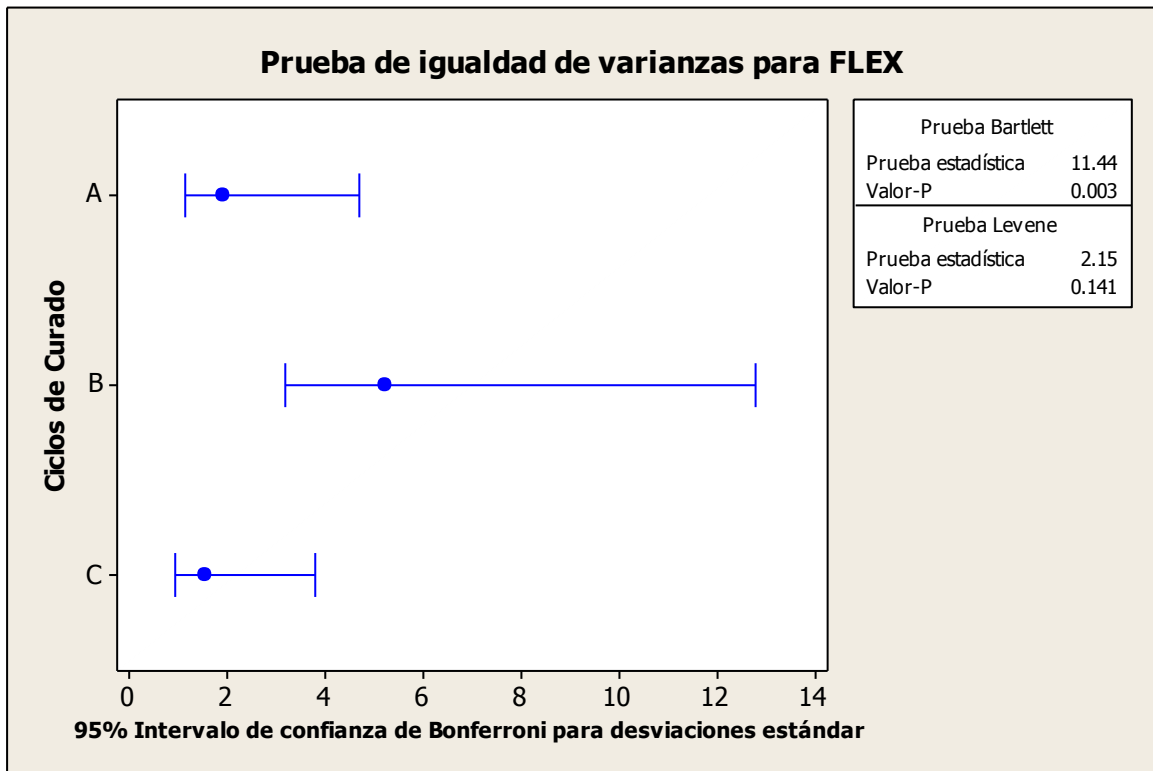


Figura 58. Prueba de igualdad de varianzas para FLEX.

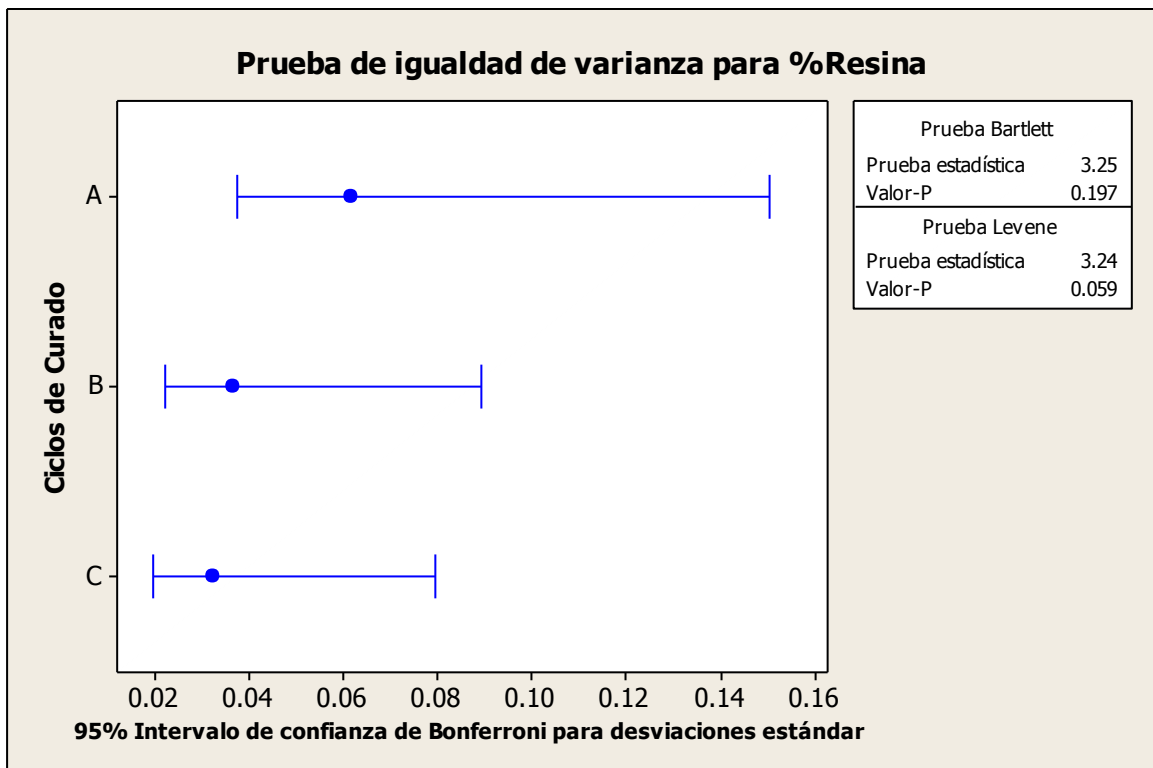


Figura 59. Prueba de igualdad de varianzas para %Resina.

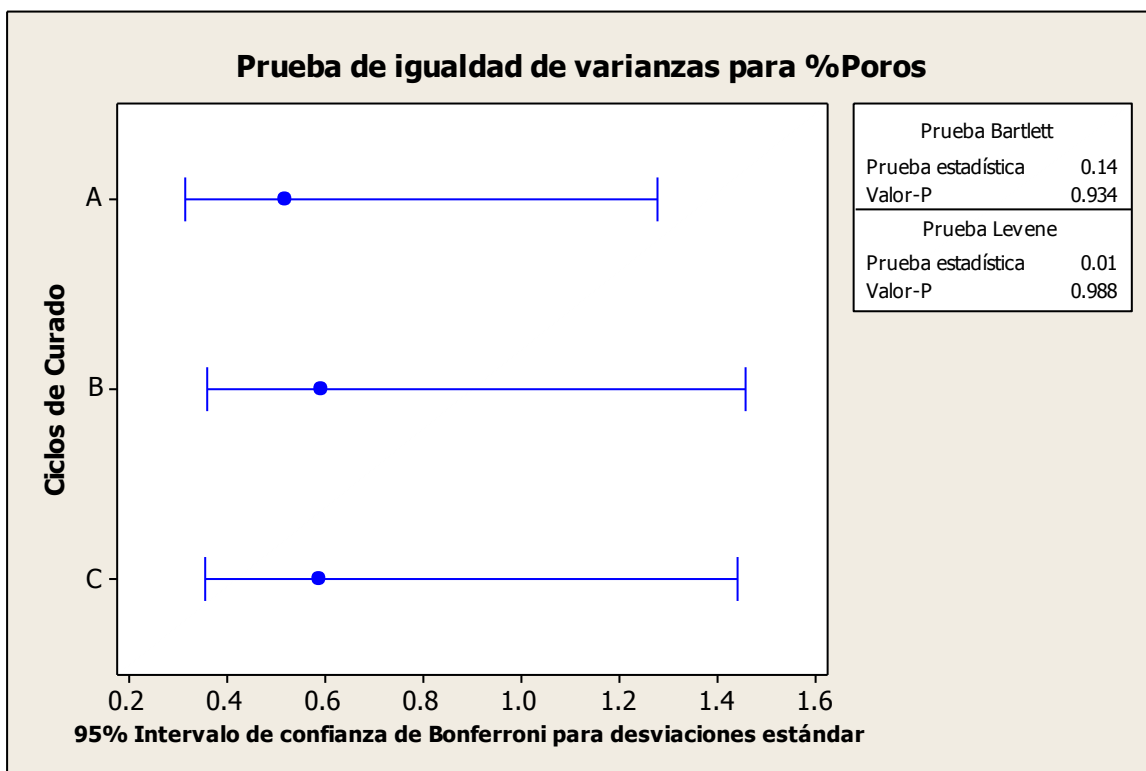


Figura 60. Prueba de igualdad de varianzas para %Poros.

#### 4.3.4 Diagrama de caja.

Mediante el diagrama de cajas (ver **Figura 61**), podemos observar la dispersión y simetría, entre los diferentes ciclos de curado y los cuatro diferentes factores analizados. En este caso para el factor de fuerza al corte se puede observar que para el ciclo de curado A se tiene simetría en los datos comparado con los otros dos ciclos, sin embargo su valor mínimo se encuentra desviado del grupo de valores, éste es considerado un valor atípico. En los otros dos ciclos de curado no obtuvo una buena simetría en los datos pero no se observa que dentro de su grupo de datos existan valores atípicos.

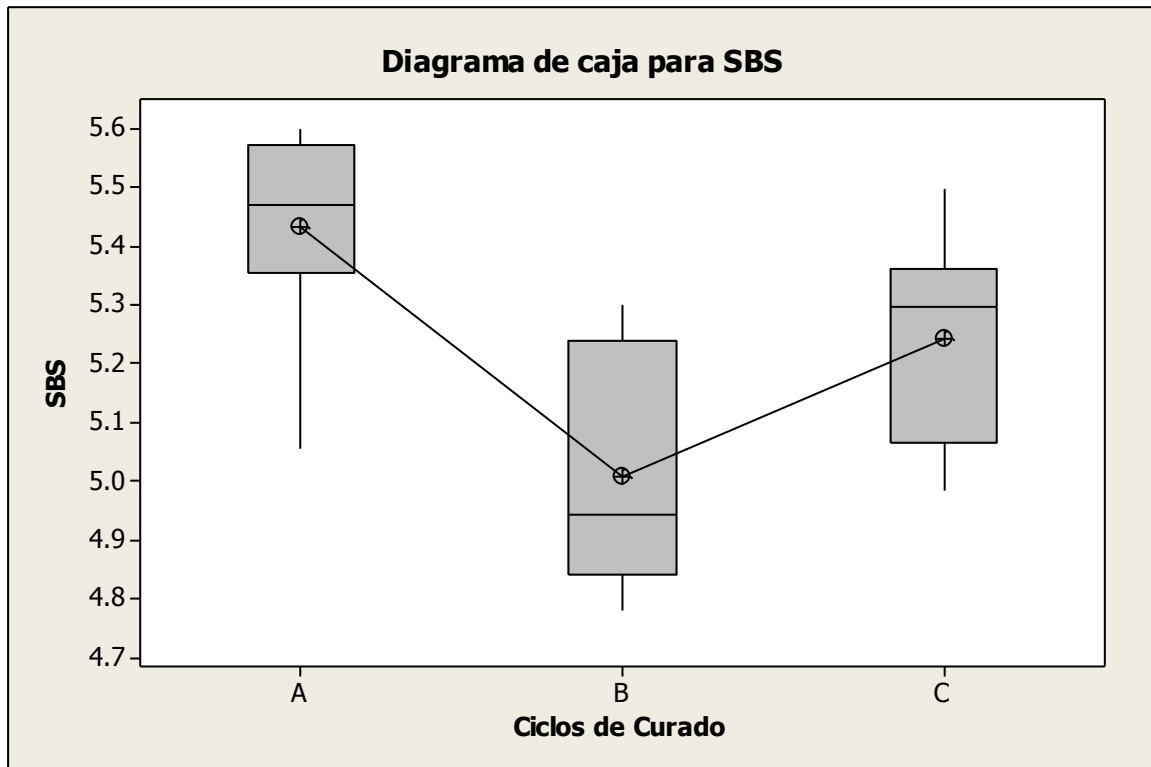


Figura 61. Diagrama de cajas para SBS.

En este caso para el factor de fuerza a la flexión se puede observar que para el ciclo de curado C se tiene una mejor simetría en los datos comparado con los otros dos ciclos. Se puede observar que para el ciclo de curado C, dentro de su grupo se encuentra un valor atípico (ver **Figura 62**).

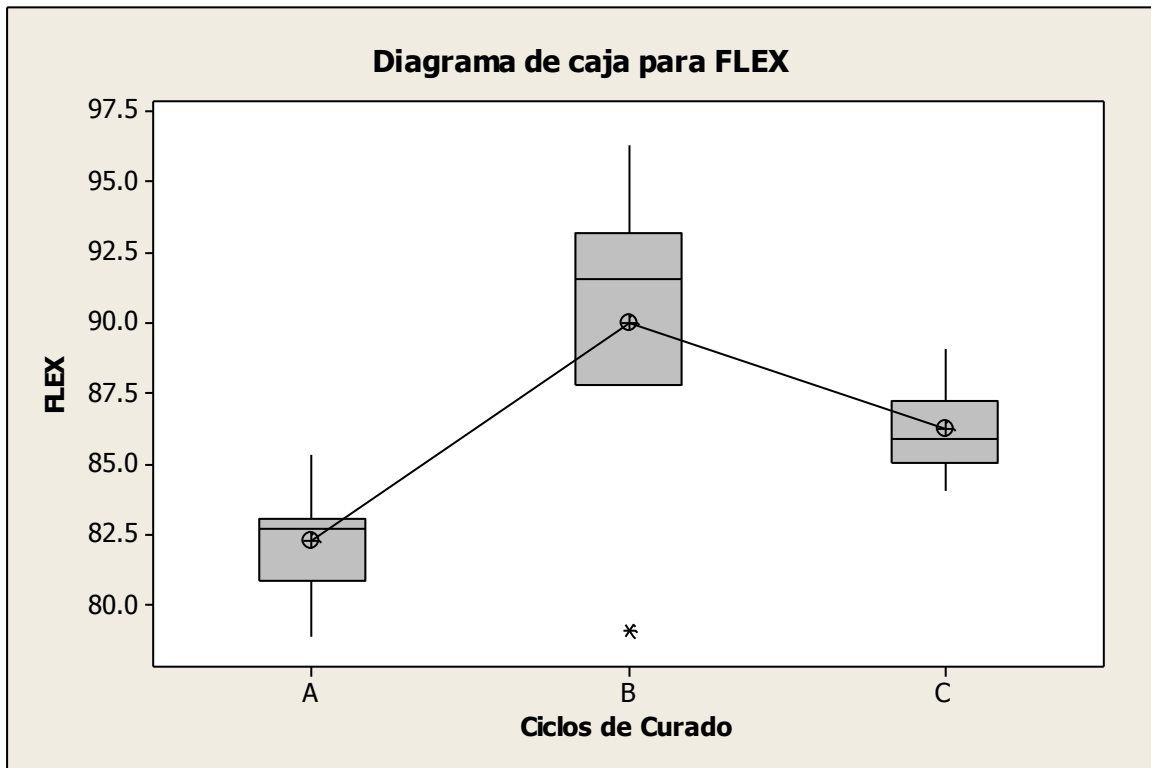


Figura 62. Diagrama de cajas para FLEX.

Analizando los valores de porcentaje de resina, se puede observar que para el ciclo de curado B se tiene una mayor dispersión en los datos comparado con los otros dos ciclos. El ciclo de curado A presentó una mejor distribución en sus valores. Para el porcentaje de poros, todos los valores entre ciclos mostraron ser muy similares (ver **Figura 63 y 64**).

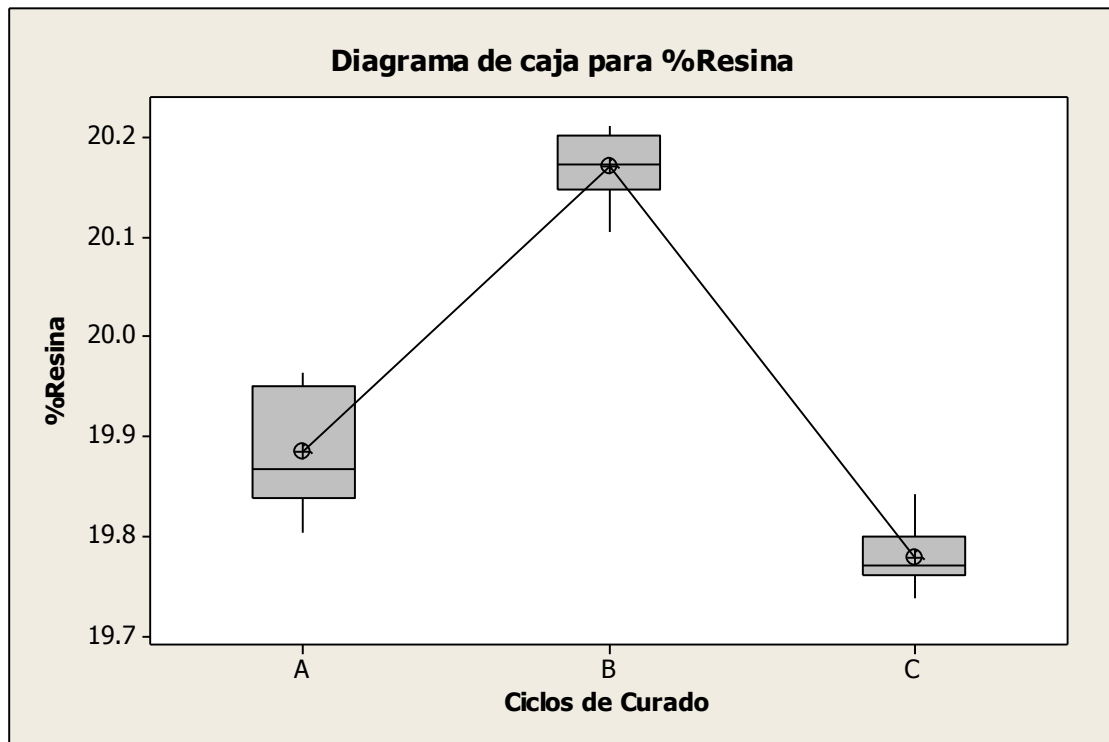


Figura 63. Diagrama de cajas para %Resina.

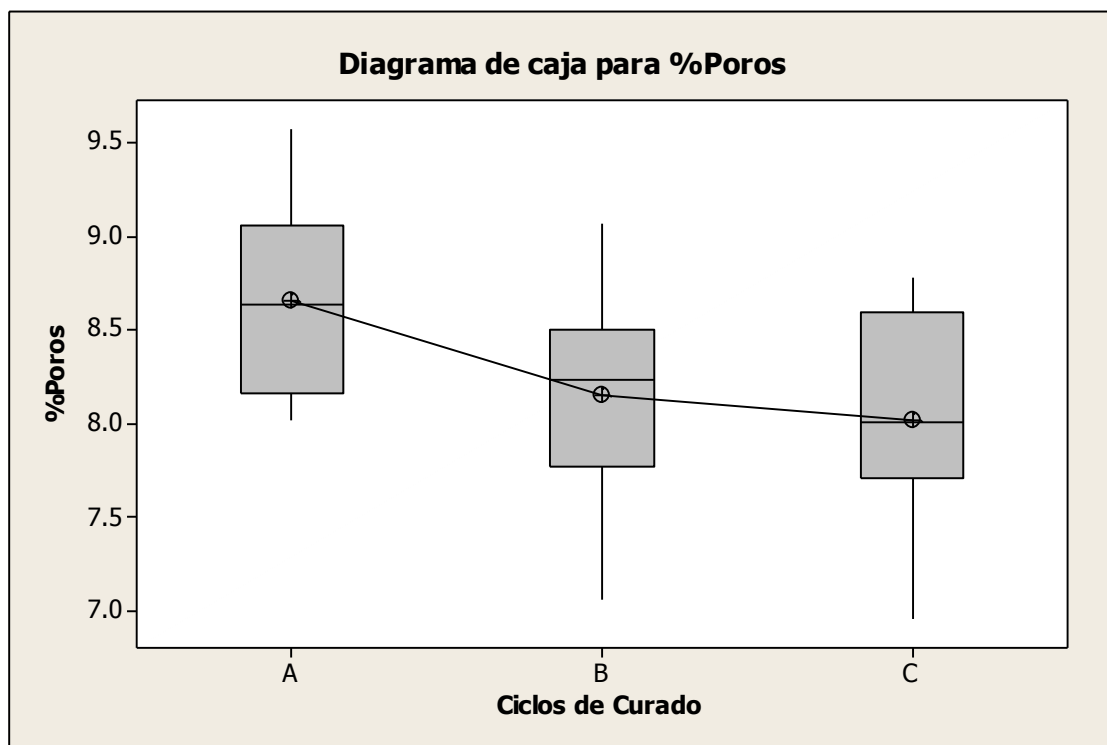


Figura 64. Diagrama de cajas para %Poros.

### 4.3.5 Análisis de medias.

Mediante el análisis de medias, podemos observar si existe una diferencia significativa en la medias de los grupos dependiendo el factor a medir.

En este caso el análisis de medias para la prueba de SBS (ver **Figura 65**) el ciclo de curado C, mostró estar dentro de los limites, mientras que el ciclo de curado A mostró tener una media significativamente mayor comparada con las medias de los dos ciclos restantes. El Ciclo de curado B obtuvo una media significativamente menor comparada con los ciclos de curado A y C.

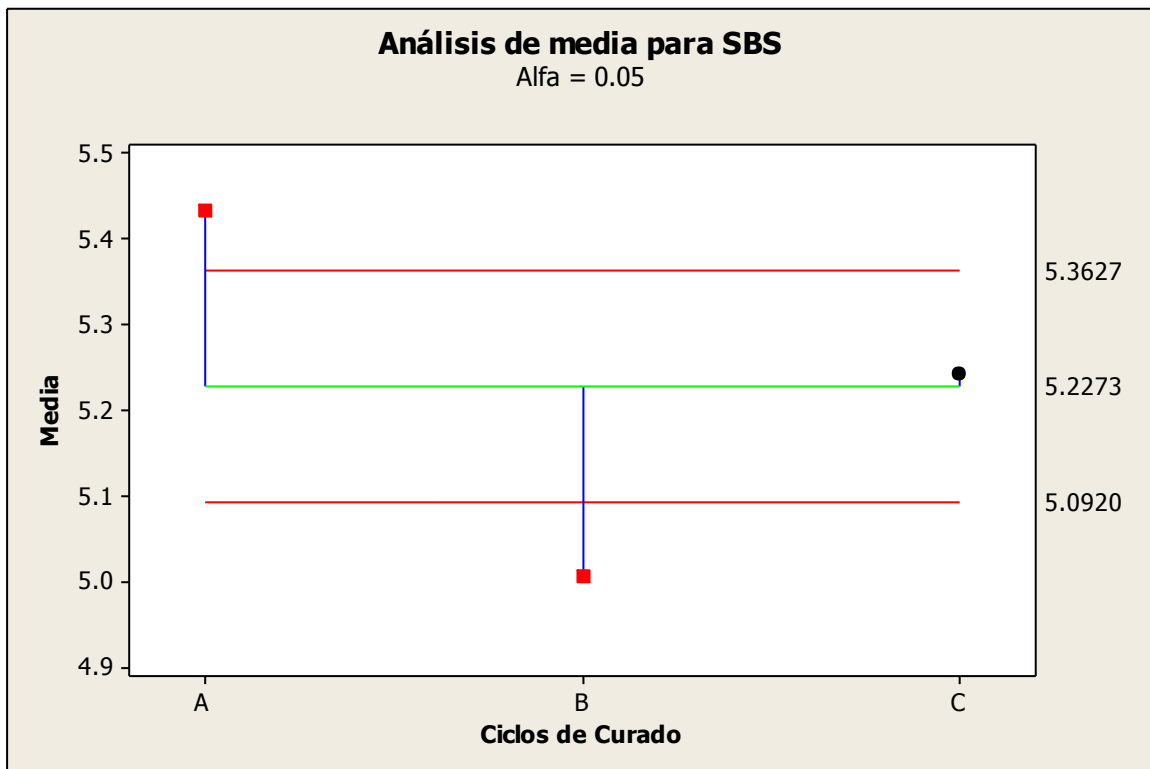


Figura 65. Análisis de media para SBS.

En la siguiente figura podemos observar el análisis de medias para la prueba de FLEX (ver **Figura 66**) el ciclo de curado C, mostro estar dentro de los limites, mientras que el ciclo de curado A mostro tener una media significativamente menor comparada con las medias de los dos ciclos restantes. El Ciclo de curado B obtuvo una media significativamente mayor comparada con los ciclos de curado A y C.

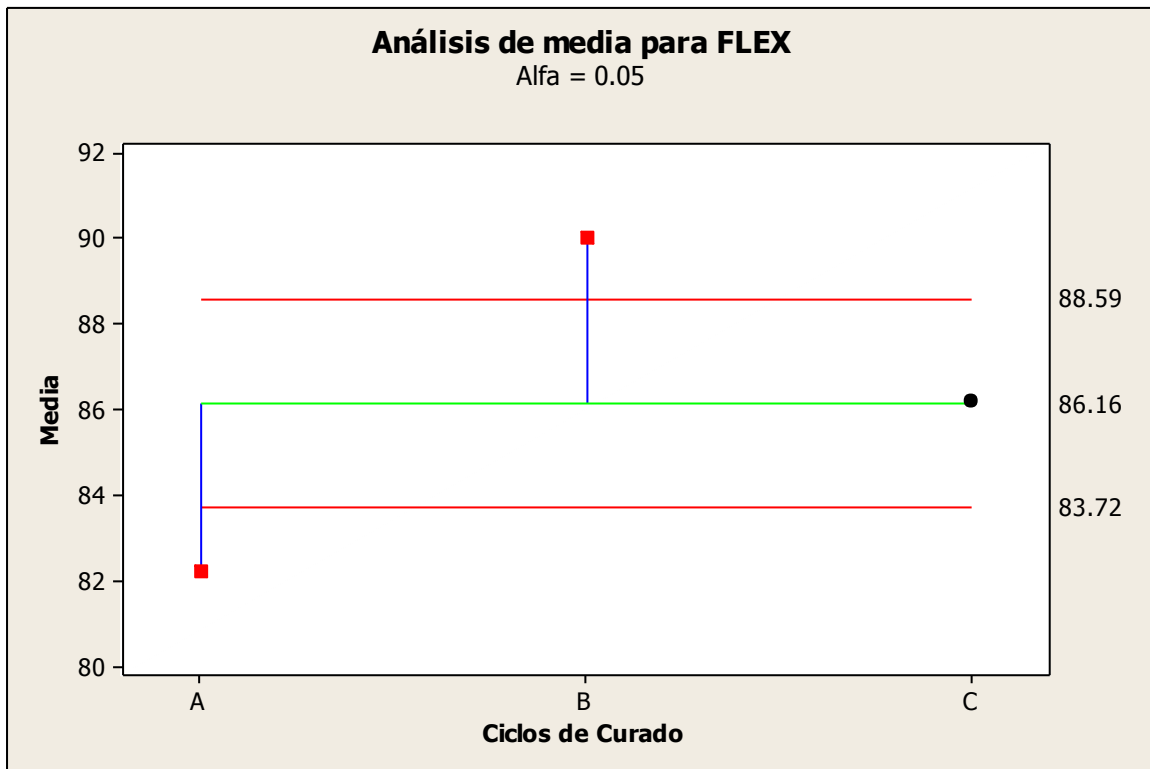


Figura 66. Análisis de media para FLEX.

En la **Figura 67**, podemos observar que las medias de todos los ciclos para el factor de %Resina se encuentran fuera de los límites superior o inferior, en este caso para el ciclo de curado C se tiene que su media es significativamente menor a los dos ciclos restantes, el ciclo de curado B obtuvo una media significativamente mayor y el ciclo de curado A una media ligeramente menor.

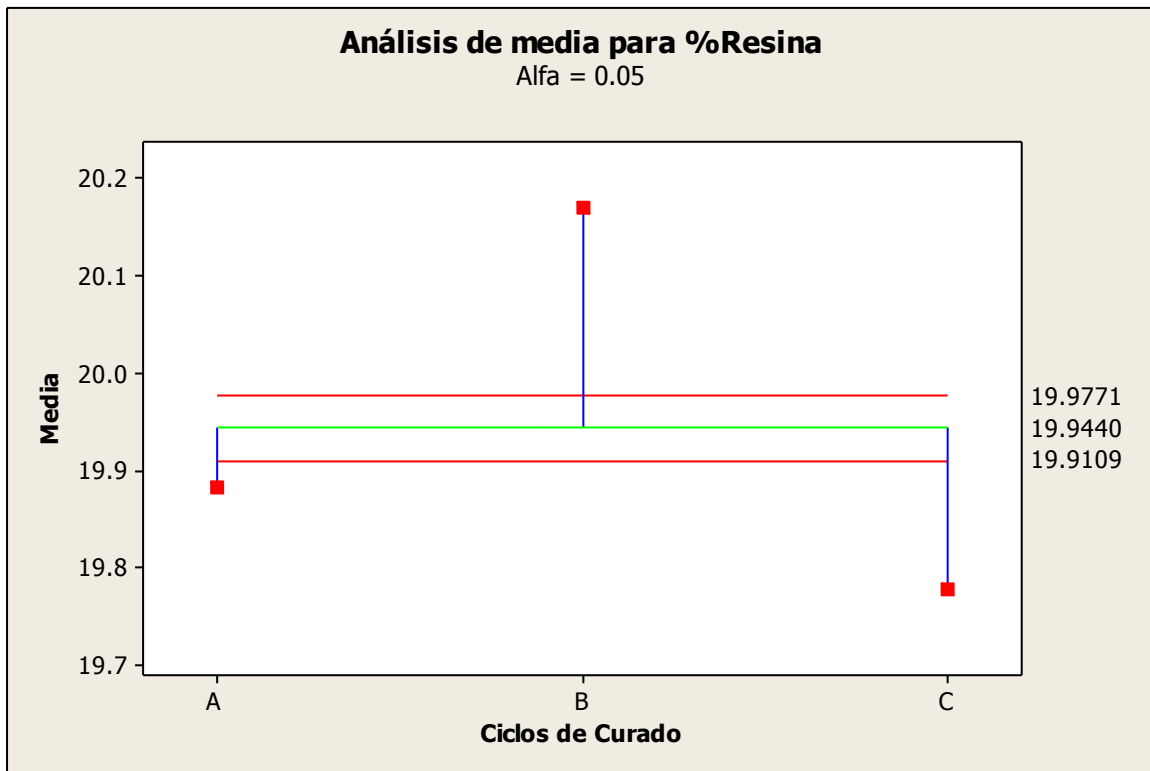


Figura 67. Análisis de media para %Resina.

En la **Figura 68**, podemos observar que las medias de todos los ciclos para el factor de %Poros se encuentran dentro de los límites superior o inferior, es decir, no hay una diferencia significativa entre ciclos para el factor de %Poros.

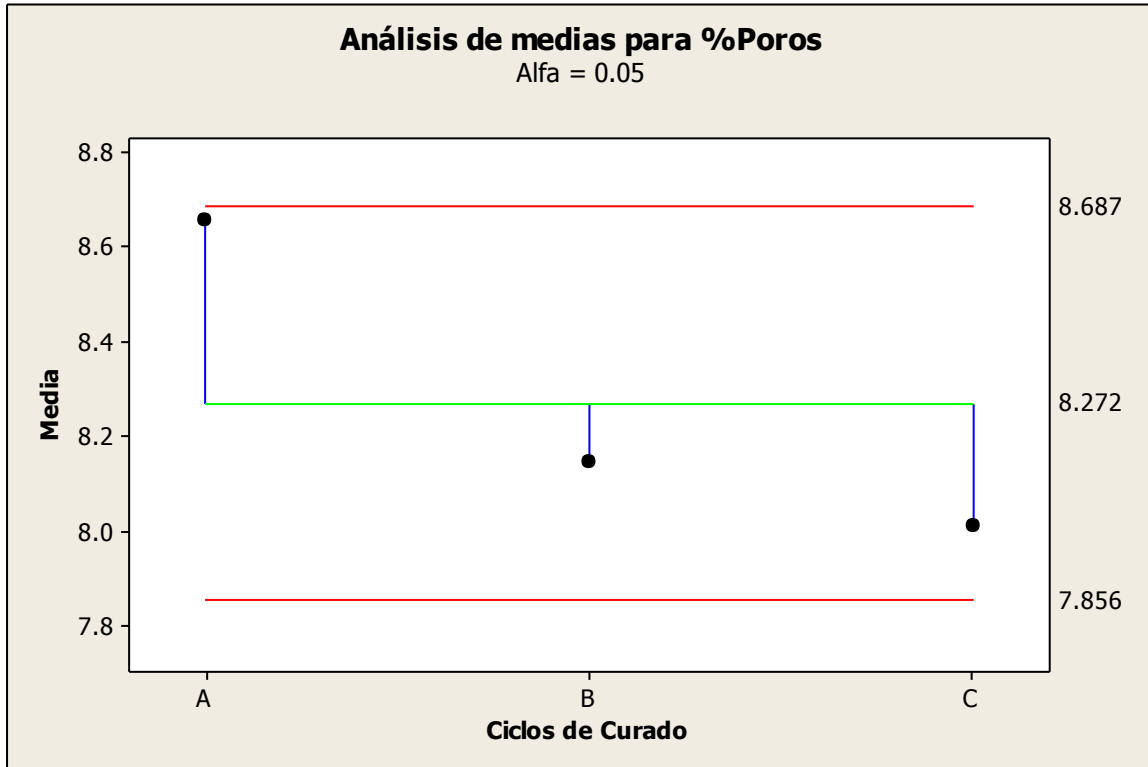


Figura 68. Análisis de media para %Poros.

## Conclusiones.

En base al análisis estadístico de los resultados de la caracterización mecánica del laminado de material compuesto de resina fenólica reforzada con fibra de vidrio, se observó que existe una ligera diferencia entre propiedades mecánicas y físicas dependiendo el ciclo de curado.

- La hipótesis planteada es rechazada para la mayoría de las pruebas mecánicas con excepción de los resultados correspondientes a la prueba de flexión, esto es acorde a los resultados del análisis de varianza entre ciclos y factores.
- La varianza entre ciclos y propiedades son similares, no hay una diferencia significativa entre propiedades y ciclos de curado.
- El análisis de medias para los factores mostró que solo para el factor de % Poros, no hubo una diferencia significativas entre las medias de los tres diferentes ciclos, es decir, las medias de los tres diferentes ciclos mostraron estar dentro de los límites de control, sin embargo para el resto de los factores si hubo diferencias significativas entre medias de los tres diferentes ciclos.
- Si bien es cierto que entre los ciclos propuestos se tienen diferentes rampas de temperatura y tiempos de permanencia, no fue posible observar el impacto de las mismas en sus propiedades mecánicas y físicas, esto puede ser aunado a que el análisis se hizo en una geometría plana la cual es la geometría ideal para la obtención de laminados de alta calidad.
- Debido a la geometría de un panel de prueba el perfil de temperatura es muy homogéneo por lo que se tiene un curado homogéneo en el panel.
- Otro factor pudo ser que las rampas propuestas para el análisis no fueron lo suficientemente agresivas o amigables.
- El alcance que tuvo el presente trabajo se enfocó al análisis del material a nivel panel de prueba, variando las rampas de temperatura y tiempos de permanencia en los ciclos de curado propuestos.
- Como continuidad para este estudio recomiendo hacer el análisis a nivel parte, o en su defecto con perfiles predeterminados en donde simulemos radios o cambios de

superficie. Para las partes hechas de material compuesto siempre las zonas en donde se tienen radios, son las zonas más difíciles para mantener consolidado el laminado.

## Glosario

**Agente de curado.** Catalizador o agente reactivo el cual, cuando es agregado a la resina causa la polimerización. También llamado endurecedor.

**Arruga superficial.** Imperfección superficial en laminados plásticos, en una o más capas externas las cuales fueron presionadas en dirección interna o externa.

**Ciclo de curado.** El ciclo de tiempo, temperatura y presión utilizados para curar una resina termoestable o material pre-impregnado.

**Compuesto.** Material constituido por dos o más materiales distintos (refuerzos, resinas, rellenos) diseñados para desarrollar propiedades de rendimiento específicas.

**Contenido de fibra.** Cantidad de fibra presente en un laminado, generalmente es expresada en porcentaje en volumen.

**Curado.** Cambio de las propiedades de la resina debido a reacciones químicas, el cual puede ser por condensación o adición, usualmente por aplicación de calor o uso de catalizador o ambas, con o sin presión.

**Delaminación.** Separación de capas de material en un laminado.

**Fibra.** Término utilizado para materiales de filamentos.

**Humedad Absoluta.** Cantidad de vapor de agua contenida en un m<sup>3</sup> de aire. Puede expresarse en g/m<sup>3</sup>.

**Humedad relativa.** Relación entre la humedad absoluta y la cantidad de saturación. Normalmente se expresa en %.

**Lamina.** Una sola capa unidireccional en un laminado.

**Laminado.** Término utilizado para identificar un conjunto de capas curadas.

**Manta respiradora (Breather).** Material de tejido suelto el cual sirve para permitir el paso de vacío sobre la parte.

**Matriz.** Material homogéneo (resina) la cual es impregnada en la fibra de un material compuesto.

**Moldeo manual (Hand Lay-up).** Proceso manual de colocar capas de material reforzado de fibra impregnada de resina sobre un molde.

**Peel ply.** Capa externa del laminado la cual es removida para obtener una mejor adhesión superficial.

**Porosidad.** Condición de bolsas de aire o gas atrapadas dentro de un material sólido.

**Volátiles.** Materiales que forman parte de la formulación de la resina los cuales son extraídos como vapor durante el ciclo de curado.

---

## Referencias Bibliográficas.

1. DOT/FAA/AR-96/75. Handbook: Manufacturing Advance Composite Components for Airframes.
2. ASKELAND, DONALD R. Y PHULE, PRADEEP P. Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 4<sup>a</sup> .ed., Cengage Learning.
3. Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Federico Paris Carballo, José Canas Delgado, Juan Carlos Morín., 2006. Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Grupo de elasticidad y resistencia de materiales.
4. Characterization Analysis of Polymers, A John Wiley and Sons, Inc.
5. Processing of Composites, R.S. Dave/ A.C. Loos, HANSER Publishers, Munich
6. Handbook of Thermoset Resins, Debdatta Ratna, Smithers Group Company, ISBN: 978-1-84735-410-5.
7. ASM Handbook Volumen 21 Composites, D.B. Miracle and S.L. Donaldson.
8. ASM Handbook, Volume 08 - Mechanical Testing and Evaluation, H. Kuhn and D. Medlin.
9. Vicente Carot Alonso. Control estadístico de calidad, SERVICIO DE PUBLICACIONES Camino de Vera, s/n 46071 VALENCIA, I.S.B.N. 84-7721-672-x.
10. Theodore J. Reinhart, Engineered Materials Handbook, Volume 1 COMPOSITES; ASM International.
11. George Lubin, Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold Company, new York, 1982.
12. William P. Benjamin, Plastic Tooling, Techniques and Aplications, The Boeing Company;
13. Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan 1989.
14. M.M. Schwartz, Composites Materials Handbook, McGraw-Hill Company, 1984.
15. William W. McCracken, Handbook of Layup and Bagging, Mar Mac Graphics and Engineering, Whittier, CA, 1993.

16. Aircraft Bonded Structure, IAP, Inc. 7383 6 WN Road, Casper, WY 82604-1835, 1985.
17. Composite Material Data Sheets, Kipp, Dale O. 2010 MatWeb - Division of Automation Creation, Inc.
18. Mechanical Engineers Handbook - Materials and Mechanical Design (3rd Edition), Kutz, Myer, 2006 John Wiley & Sons.
19. Thomas Weathered, Laminated Parts Fabricator Training Course, Sikorsky Aircraft, Stratford, Connecticut 06602.
20. U.S. Department of Transportation, Nondestructive Testing in Aircraft, IAP, Inc.
21. Dick Warnock, Basic Introduction to Advanced Composites Tutorial, Society of Manufacturing Engineers.
22. Mechanics of Materials, Volume 2 - An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials (3rd Edition), Hearn, E.J. 1997 Elsevier.
23. Advanced Manufacture 2007 - Focusing on New and Emerging Technologies, Hwang, Sheng-Jye; Lee, Sen-Yung, 2008 Trans Tech Publications Ltd.
24. Handbook of Plastics, Elastomers & Composites (4th Edition), Edited by: Harper, Charles A. 2002 McGraw-Hill.
25. Traceski, F.T., Specifications and Standards for Plastics and Composites, ASM International.
26. Composite Airframe Structures - Practical Design Information and Data (3rd Edition), Niu, Michael C. Y. 1992 AD Adaso/Adastra Engineering LLC
27. Encyclopedia of Materials - Science and Technology, Volumes 1-11, Buschow, K.H. Jürgen; Cahn, Robert W.; Flemings, Merton C.; Ilshner, Bernhard; Kramer, Edward J.; Mahajan, Subhash , 2001 Elsevier.
28. Handbook of Composite Reinforcements, Lee, Stuart M. © 1993 John Wiley & Sons.
29. Mechanics of Composite Structures, Kollár, László P.; Springer, George S., 2003 Cambridge University Press.
30. Composite Materials for Aircraft Structures (2nd Edition), Baker, Alan; Dutton, Stuart; Kelly, Donald, 2004 American Institute of Aeronautics and Astronautics.

31. Mechanical Behavior of Materials (2nd Edition), Meyers, Marc André; Chawla, Krishan Kumar, 2009 Cambridge University Press.
32. A. Knop, V. Bohmer and L.A. Pilato in Comprehensive Polymer Science, Volume 5: Step Polymerisation – the Synthesis, Characterisation, Reactions and Applications of Polymers, Eds., G.C. Eastmond, 1989, Chapter 35.
33. Manufacturing Processes for Advanced Composites, F.C. Campbell, ELSEVIER, 2004, I.S.B.N: 1856174158.
34. Principles of the Manufacturing of Composites Material, Suong V. Hoa, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, Quebec, Canada, DEStech Publications, Inc. I.S.B.N: 978-1-932078-26-8.