



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**  
**DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO DEL MATERIAL HÍBRIDO CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ EN MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER, PARA DETERMINAR LA MEJOR CONFIGURACIÓN”

---

**AUTOR:** Henry David Erazo Sánchez

**TUTOR:** Ing. Mg. Juan Gilberto Paredes Salinas

**Ambato – Ecuador**

**2019**

## CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema **“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO DEL MATERIAL HÍBRIDO CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ EN MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER, PARA DETERMINAR LA MEJOR CONFIGURACIÓN”**, elaborado por el Sr. Henry David Erazo Sánchez, portador de la cédula de ciudadanía: 1803811189, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica.

Certifico que:

- El presente Trabajo Investigativo es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Por lo tanto, autorizo la presentación de este documento ante el organismo pertinente, para que sea sometido a evaluación por los profesores calificadores designados por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad.

Ambato, Febrero de 2019

.....  
Ing. Mg. Juan Gilberto Paredes Salinas

TUTOR

## AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Yo, Henry David Erazo Sánchez, portador de la C.I. 180381118-9 tengo a bien indicar que las ideas mostradas en el presente trabajo experimental: **“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO DEL MATERIAL HÍBRIDO CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ EN MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER, PARA DETERMINAR LA MEJOR CONFIGURACIÓN”**, son auténticos y de absoluta responsabilidad del autor, a excepción de las fuentes bibliográficas que se encuentra citadas en el trabajo de investigación.

Los contenidos, ideas, análisis, y conclusiones son de exclusiva responsabilidad de mi persona, como autor de este Trabajo Experimental.

Ambato, Febrero de 2019

AUTOR

.....  
Henry David Erazo Sánchez

180407694-9

Autor

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la institución

Cedo los Derechos de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Trabajo Experimental dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Ambato, Febrero de 2019

AUTOR

.....  
Henry David Erazo Sánchez

180381118-9

Autor

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del tribunal de grado aprueban el Trabajo Experimental sobre el tema: **“ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO DEL MATERIAL HÍBRIDO CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ EN MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER, PARA DETERMINAR LA MEJOR CONFIGURACIÓN”**, elaborado por Henry David Erazo Sánchez, el mismo que guarda conformidad con las disposiciones reglamentarias emitidas por la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Febrero de 2019

Para constancia firman:

.....  
Ing. Mg. Cristian Pérez

.....  
Ing. Mg. Henry Vaca

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a Dios, por ser el pilar de mi vida, mi guía en cada acto y por permitirme llegar hasta este valioso momento de mi formación profesional.*

*A Gloria, mi madre, por ser una mujer fuerte, por inculcarme desde pequeño objetividad; por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia se consigue llegar a la meta.*

*A mi padre Mauricio, por estar en algunos de mis buenos y malos momentos, por su comprensión frente a mis instantes de desatino.*

*A mi hermana Mady, por ser una mujer optimista, por enseñarme que siempre existe solución para los problemas, por compartirme su positivismo y alegría en las dificultades.*

*A mi mejor amiga Mayté Fernanda, por ser una persona valiosa, por brindarme su apoyo, por ser fuente de muchas de mis alegrías, por enseñarme a confiar en las personas y demostrarme que las cosas no siempre son solo en blanco y negro.*

*A mis cachorros Jack, Nailah, Black, Kyara y Copito; que han sido disipadores de estrés y han demostrado sentimientos sinceros y desinteresados mejor que muchas personas.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco principalmente a Dios, por la vida, por mi familia; por enseñarme en cada situación a desarrollar las capacidades necesarias para saber desenvolverse correctamente, por siempre ponerme en el camino correcto para permitir retribuir la bondad de sus acciones.*

*Agradezco a mi madre y a mi hermana por su completo apoyo, por su compañía en las largas noches de arduo trabajo, por la seguridad que han sabido compartirme a lo largo de mi vida universitaria. A mi padre, por la confianza que me ha sabido brindar, aunque sea a la distancia.*

*Al tutor de este trabajo, el ingeniero Juan Paredes, que confió en mis capacidades para saber desarrollar cada parte de este proyecto, y que supo guiarme y me ayudó a complementar conocimientos para su completo desarrollo.*

*A mis compañeros, que en toda la carrera fuimos un constante apoyo, logrando superar nuestras falencias; haciendo que recuerde que juntos se llega más lejos.*

# ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

## PAGINAS PRELIMINALRES

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR .....	II
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	III
DERECHOS DE AUTOR .....	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	V
DEDICATORIA .....	VI
AGRADECIMIENTO .....	VII
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO.....	VIII
ÍNDICE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVIII
RESUMEN EJECUTIVO .....	XXI
ABSTRACT.....	XXII
CAPÍTULO I.....	23
1 ANTECEDENTES .....	23
1.1 TEMA.....	23
1.2 ANTECEDENTES .....	23
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	26
1.4 OBJETIVOS.....	27
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	27
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
CAPÍTULO II.....	29
2 FUNDAMENTACIÓN .....	29
2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	29
2.1.1 INFERENCIA ESTADÍSTICA.....	29
2.1.2 ENFOQUE CLÁSICO.....	30
2.1.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	32
2.1.4 SUPUESTOS PARAMÉTRICOS .....	44



2.1.5	TRANSFORMACIÓN DE DATOS.....	47
2.1.6	OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTAS MÚLTIPLES.....	47
2.1.7	PROPIEDADES MECÁNICAS .....	49
2.2	HIPÓTESIS .....	51
2.3	SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS .....	51
2.3.1	VARIABLE INDEPENDIENTE.....	51
2.3.2	VARIABLE DEPENDIENTE.....	51
2.3.3	TÉRMINO DE RELACIÓN.....	51
	CAPÍTULO III.....	52
3	METODOLOGÍA.....	52
3.1	NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	52
3.1.1	INVESTIGACIÓN TEÓRICA .....	52
3.1.2	INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA .....	52
3.1.3	INVESTIGACIÓN EXPLICATIVA.....	52
3.1.4	INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....	52
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA .....	53
3.2.1	POBLACIÓN.....	53
3.2.2	MUESTRA .....	53
3.4	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	55
3.4.1	VARIABLE INDEPENDIENTE.....	55
3.4.2	VARIABLE DEPENDIENTE.....	56
3.5	PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	57
3.6	PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS .....	57
3.6.1	REVISIÓN.....	58
3.6.2	TABULACIÓN.....	58
3.6.3	ANÁLISIS .....	58
3.6.4	PRESENTACIÓN.....	58

3.6.5	INTERPRETACIÓN .....	58
CAPITULO IV .....		59
4	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	59
4.1	RECOLECCIÓN DE DATOS.....	59
4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	66
4.2.1	ANÁLISIS DEL ESFUERZO MÁXIMO DE TRACCIÓN .....	67
4.2.2	ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	82
4.2.3	ANÁLISIS DE LA ELONGACIÓN .....	94
4.2.4	ANÁLISIS DE LA DEFLEXIÓN .....	105
4.2.5	ANÁLISIS DEL ESFUERZO MÁXIMO DE FLEXIÓN.....	117
4.2.6	ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD SECANTE DE FLEXIÓN.....	133
4.2.7	ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA .....	148
4.2.8	ANÁLISIS DE LA ENERGÍA MEDIA DE FALLO.....	160
4.2.9	CÁLCULO DE LA DESEABILIDAD GLOBAL .....	170
4.3	VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS.....	171
4.3.1	ANÁLISIS DE LA DESEABILIDAD GLOBAL .....	171
4.3.2	VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA APLICADA .....	177
CAPITULO V .....		183
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	183
5.1	CONCLUSIONES .....	183
5.2	RECOMENDACIONES .....	184
BIBLIOGRAFÍA .....		186
ANEXOS .....		189

## ÍNDICE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Tabla de ANOVA para el DCA .....	36
<b>Tabla 2.2</b> Tabla de ANOVA para el DBCA .....	38
<b>Tabla 2.3</b> Tabla de ANOVA para el Diseño Factorial $a \times b$ .....	41
<b>Tabla 3.1</b> Descripción de las condiciones de los niveles de cada factor. ....	53
<b>Tabla 3.2</b> Réplicas de los tratamientos para cada propiedad mecánica a analizar. ...	54
<b>Tabla 3.3</b> Variable independiente. ....	55
<b>Tabla 3.4</b> Variable dependiente.....	56
<b>Tabla 3.5</b> Plan de recolección de información. ....	57
<b>Tabla 4.1</b> Resultados del ensayo de tracción.....	59
<b>Tabla 4.2</b> Resultados del ensayo de flexión. ....	62
<b>Tabla 4.3</b> Resultados del ensayo de impacto.....	64
<b>Tabla 4.4</b> Verificación del supuesto de normalidad del esfuerzo máximo de tracción.....	67
<b>Tabla 4.5</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza del esfuerzo máximo de tracción.....	68
<b>Tabla 4.6</b> Transformación de Box-Cox del esfuerzo máximo de tracción.....	70
<b>Tabla 4.7</b> Verificación del supuesto de normalidad de datos transformados del esfuerzo máximo de tracción. ....	71
<b>Tabla 4.8</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza de datos transformados del esfuerzo máximo de tracción.....	72
<b>Tabla 4.9</b> ANOVA para el DCA del esfuerzo máximo de tracción.....	74
<b>Tabla 4.10</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del esfuerzo máximo de tracción. ....	74
<b>Tabla 4.11</b> ANOVA para el DBCA del esfuerzo máximo de tracción. ....	75
<b>Tabla 4.12</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del esfuerzo máximo de tracción. ....	75

<b>Tabla 4.13</b> ANOVA para el Diseño factorial completo del esfuerzo máximo de tracción.....	76
<b>Tabla 4.14</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del esfuerzo máximo de tracción.....	76
<b>Tabla 4.15</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al esfuerzo máximo de tracción. ....	77
<b>Tabla 4.16</b> Respuestas predichas del esfuerzo máximo de tracción. ....	80
<b>Tabla 4.17</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del esfuerzo máximo de tracción. ....	81
<b>Tabla 4.18</b> Deseabilidad individual del esfuerzo máximo de tracción. ....	81
<b>Tabla 4.19</b> Verificación del supuesto de normalidad del módulo de elasticidad.....	82
<b>Tabla 4.20</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza del módulo de elasticidad.....	83
<b>Tabla 4.21</b> ANOVA para el DCA del módulo de elasticidad. ....	86
<b>Tabla 4.22</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del módulo de elasticidad.....	86
<b>Tabla 4.23</b> ANOVA para el DBCA del módulo de elasticidad. ....	87
<b>Tabla 4.24</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del módulo de elasticidad.....	87
<b>Tabla 4.25</b> ANOVA para el Diseño factorial completo del módulo de elasticidad..	88
<b>Tabla 4.26</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del módulo de elasticidad.....	88
<b>Tabla 4.27</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al módulo de elasticidad.....	89
<b>Tabla 4.28</b> Respuestas predichas del módulo de elasticidad.....	92
<b>Tabla 4.29</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del módulo de elasticidad. ....	93
<b>Tabla 4.30</b> Deseabilidad individual del módulo de elasticidad.....	93

<b>Tabla 4.31</b> Verificación del supuesto de normalidad de la elongación.....	94
<b>Tabla 4.32</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza de la elongación.....	95
<b>Tabla 4.33</b> ANOVA para el DCA de la elongación.....	98
<b>Tabla 4.34</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la elongación.....	98
<b>Tabla 4.35</b> ANOVA para el DBCA de la elongación.....	98
<b>Tabla 4.36</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la elongación.....	99
<b>Tabla 4.37</b> ANOVA para el Diseño factorial completo de la elongación.....	99
<b>Tabla 4.38</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general de la elongación.....	100
<b>Tabla 4.39</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la elongación.....	100
<b>Tabla 4.40</b> Respuestas predichas de la elongación.....	103
<b>Tabla 4.41</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la elongación.....	104
<b>Tabla 4.42</b> Deseabilidad individual de la elongación.....	104
<b>Tabla 4.43</b> Verificación del supuesto de normalidad de la deflexión.....	106
<b>Tabla 4.44</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza de la deflexión.....	107
<b>Tabla 4.45</b> ANOVA para el DCA de la deflexión.....	109
<b>Tabla 4.46</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la deflexión.....	109
<b>Tabla 4.47</b> ANOVA para el DBCA de la deflexión.....	110
<b>Tabla 4.48</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la deflexión.....	110
<b>Tabla 4.49</b> ANOVA para el Diseño factorial completo de la deflexión.....	111

<b>Tabla 4.50</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general de la deflexión.....	111
<b>Tabla 4.51</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la deflexión.	112
<b>Tabla 4.52</b> Respuestas predichas de la deflexión.....	115
<b>Tabla 4.53</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la deflexión.....	115
<b>Tabla 4.54</b> Deseabilidad individual de la deflexión.....	116
<b>Tabla 4.55</b> Verificación del supuesto de normalidad del esfuerzo máximo de flexión. ....	117
<b>Tabla 4.56</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza del esfuerzo máximo de flexión. ....	118
<b>Tabla 4.57</b> Transformación de Box-Cox del esfuerzo máximo de flexión. ....	120
<b>Tabla 4.58</b> Verificación del supuesto de normalidad de datos transformados del esfuerzo máximo de flexión. ....	121
<b>Tabla 4.59</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza de datos transformados del esfuerzo máximo de flexión. ....	123
<b>Tabla 4.60</b> ANOVA para el DCA del esfuerzo máximo de flexión. ....	125
<b>Tabla 4.61</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del esfuerzo máximo de flexión. ....	125
<b>Tabla 4.62</b> ANOVA para el DBCA del esfuerzo máximo de flexión.....	126
<b>Tabla 4.63</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del esfuerzo máximo de flexión. ....	126
<b>Tabla 4.64</b> ANOVA para el Diseño factorial completo del esfuerzo máximo de flexión. ....	127
<b>Tabla 4.65</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del esfuerzo máximo de flexión. ....	127
<b>Tabla 4.66</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al esfuerzo máximo de flexión.....	128

<b>Tabla 4.67</b> Respuestas predichas del esfuerzo máximo de flexión. ....	131
<b>Tabla 4.68</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del esfuerzo máximo de flexión.....	131
<b>Tabla 4.69</b> Deseabilidad individual del esfuerzo máximo de flexión. ....	132
<b>Tabla 4.70</b> Verificación del supuesto de normalidad del módulo de elasticidad secante de flexión.....	133
<b>Tabla 4.71</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza del módulo de elasticidad secante de flexión.....	134
<b>Tabla 4.72</b> Transformación de Box-Cox del módulo de elasticidad secante de flexión. ....	136
<b>Tabla 4.73</b> Verificación del supuesto de normalidad de datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión.....	137
<b>Tabla 4.74</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianza de datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión.....	139
<b>Tabla 4.75</b> ANOVA para el DCA del módulo de elasticidad secante de flexión. ..	140
<b>Tabla 4.76</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del módulo de elasticidad secante de flexión.....	141
<b>Tabla 4.77</b> ANOVA para el DBCA del módulo de elasticidad secante de flexión.	141
<b>Tabla 4.78</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del módulo de elasticidad secante de flexión.....	142
<b>Tabla 4.79</b> ANOVA para el Diseño factorial completo del módulo de elasticidad secante de flexión.....	142
<b>Tabla 4.80</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del módulo de elasticidad secante de flexión.....	143
<b>Tabla 4.81</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al módulo de elasticidad secante de flexión.....	143
<b>Tabla 4.82</b> Respuestas predichas del módulo de elasticidad secante de flexión....	146

<b>Tabla 4.83</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del módulo de elasticidad secante de flexión. ....	147
<b>Tabla 4.84</b> Deseabilidad individual del módulo de elasticidad secante de flexión. ....	148
<b>Tabla 4.85</b> Verificación del supuesto de normalidad de la deformación máxima. .	149
<b>Tabla 4.86</b> Verificación del supuesto de igualdad de varianzas de la deformación máxima. ....	150
<b>Tabla 4.87</b> ANOVA para el DCA de la deformación máxima. ....	152
<b>Tabla 4.88</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la deformación máxima. ....	152
<b>Tabla 4.89</b> ANOVA para el DBCA de la deformación máxima. ....	153
<b>Tabla 4.90</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la deformación máxima. ....	153
<b>Tabla 4.91</b> ANOVA para el Diseño factorial completo de la deformación máxima. ....	154
<b>Tabla 4.92</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general de la deformación máxima. ....	154
<b>Tabla 4.93</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la deformación máxima. ....	155
<b>Tabla 4.94</b> Respuestas predichas de la deformación máxima. ....	158
<b>Tabla 4.95</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la deformación máxima. ....	159
<b>Tabla 4.96</b> Deseabilidad individual de la deformación máxima. ....	159
<b>Tabla 4.97</b> Verificación del supuesto de normalidad del módulo de elasticidad. ....	160
<b>Tabla 4.98</b> ANOVA para el DCA de la energía media de fallo. ....	163
<b>Tabla 4.99</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la energía media de fallo. ....	164
<b>Tabla 4.100</b> ANOVA para el DBCA de la energía media de fallo. ....	164



<b>Tabla 4.101</b> Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la energía media de fallo. ....	165
<b>Tabla 4.102</b> Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la energía media de fallo.....	165
<b>Tabla 4.103</b> Respuestas predichas de la energía media de fallo. ....	168
<b>Tabla 4.104</b> Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la energía media de fallo. ....	168
<b>Tabla 4.105</b> Deseabilidad individual de la energía media de fallo. ....	169
<b>Tabla 4.106</b> Cálculo de la deseabilidad global de las propiedades mecánicas. ....	170
<b>Tabla 4.107</b> Deseabilidad global de las propiedades mecánicas.....	171
<b>Tabla 4.108</b> Verificación del supuesto de normalidad de la deseabilidad global. ..	173
<b>Tabla 4.109</b> ANOVA de la deseabilidad global.....	175
<b>Tabla 4.110</b> Contribución de cada factor a la deseabilidad global.....	176
<b>Tabla 4.111</b> Resultados de la prueba de confirmación.....	177
<b>Tabla 4.112</b> Tabla de resumen criterios ponderados.....	178
<b>Tabla 4.113</b> Verificación de supuestos de los datos. ....	178
<b>Tabla 4.113</b> Significancias y coeficientes de determinación de cada respuesta. ....	179
<b>Tabla 4.114</b> Respuestas predichas para cada configuración. ....	180
<b>Tabla 4.115</b> Deseabilidades individuales y globales para cada configuración. ....	181
<b>Tabla 4.116</b> Contraste de metodologías. ....	181

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Comparación de significancias .....	31
<b>Figura 2.2</b> Variables de un proceso.....	32
<b>Figura 2.3</b> Clasificación de los diseños experimentales .....	34
<b>Figura 2.4</b> Representación de las medias y los efectos de los tratamientos.....	35
<b>Figura 2.5</b> Representación de los efectos principales .....	42
<b>Figura 2.6</b> Representación de los efectos de interacción AB.....	43
<b>Figura 2.7</b> Representación de los efectos de no interacción AB.....	43
<b>Figura 2.8</b> Gráfica de Orden vs. Residuos en la que no se cumple independencia ..	46
<b>Figura 2.9</b> Gráfica de Orden vs. Residuos en la que se cumple independencia.....	46
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de flujo del análisis de los resultados.....	66
<b>Figura 4.2</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del esfuerzo máximo de tracción.....	70
<b>Figura 4.3</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de datos transformados del esfuerzo máximo de tracción. ....	73
<b>Figura 4.4</b> Diagrama de Pareto de los efectos para el esfuerzo máximo de tracción.....	78
<b>Figura 4.5</b> Gráfica de efectos principales para el esfuerzo máximo de tracción. ....	78
<b>Figura 4.6</b> Gráfica de interacción para el esfuerzo máximo de tracción.....	79
<b>Figura 4.7</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del módulo de elasticidad.....	85
<b>Figura 4.8</b> Diagrama de Pareto de los efectos para el módulo de elasticidad.....	90
<b>Figura 4.9</b> Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad.....	90
<b>Figura 4.10</b> Gráfica de interacción para el módulo de elasticidad.....	91
<b>Figura 4.11</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la elongación.....	96
<b>Figura 4.12</b> Diagrama de Pareto de los efectos para la elongación. ....	101
<b>Figura 4.13</b> Gráfica de efectos principales para la elongación. ....	102

<b>Figura 4.14</b> Gráfica de interacción para la elongación. ....	102
<b>Figura 4.15</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la deflexión. ....	108
<b>Figura 4.16</b> Diagrama de Pareto de los efectos para la deflexión.....	112
<b>Figura 4.17</b> Gráfica de efectos principales para la deflexión.....	113
<b>Figura 4.18</b> Gráfica de interacción para la deflexión.....	114
<b>Figura 4.19</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del esfuerzo máximo de flexión. ....	120
<b>Figura 4.20</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de datos transformados del esfuerzo máximo de flexión. ....	124
<b>Figura 4.21</b> Diagrama de Pareto de los efectos para el esfuerzo máximo de flexión. ....	129
<b>Figura 4.22</b> Gráfica de efectos principales para el esfuerzo máximo de flexión. ...	129
<b>Figura 4.23</b> Gráfica de interacción para el esfuerzo máximo de flexión.....	130
<b>Figura 4.24</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del módulo de elasticidad secante de flexión.....	136
<b>Figura 4.25</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión.....	140
<b>Figura 4.26</b> Diagrama de Pareto de los efectos para el módulo de elasticidad secante de flexión.....	144
<b>Figura 4.27</b> Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad secante de flexión. ....	145
<b>Figura 4.28</b> Gráfica de interacción para el módulo de elasticidad secante de flexión. ....	146
<b>Figura 4.29</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la deformación máxima.....	151
<b>Figura 4.30</b> Diagrama de Pareto de los efectos para la deformación máxima.....	156
<b>Figura 4.31</b> Gráfica de efectos principales para la deformación máxima.....	156
<b>Figura 4.32</b> Gráfica de interacción para la deformación máxima.....	157

<b>Figura 4.33</b> Gráfica de Predichos vs. Residuos de la energía media de fallo. ....	161
<b>Figura 4.34</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la energía media de fallo. ....	162
<b>Figura 4.35</b> Diagrama de Pareto de los efectos para la energía media de fallo. ....	166
<b>Figura 4.36</b> Gráfica de efectos principales para la energía media de fallo. ....	167
<b>Figura 4.37</b> Gráfica de Predichos vs. Residuos de la deseabilidad global. ....	174
<b>Figura 4.38</b> Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la deseabilidad global. ....	174

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERIA MECÁNICA**

**TEMA:** “ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO DEL MATERIAL HÍBRIDO CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ EN MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER, PARA DETERMINAR LA MEJOR CONFIGURACIÓN”

**AUTOR:** Henry David Erazo Sánchez

**TUTOR:** Ing. Juan Paredes Salinas Mg.

**RESUMEN EJECUTIVO**

Las investigaciones de aplicaciones y comportamientos mecánicos de nuevos materiales compuestos e híbridos, ha llevado a efectuar caracterizaciones y diferentes análisis de resultados, con el fin de determinar el material con mejores propiedades mecánica; en la mayoría de los casos, para llegar a ese objetivo, la selección de un material ha dependido de la subjetividad del investigador. Es así que en el presente trabajo experimental se especifica una metodología de análisis estadístico, para la optimización de propiedades mecánicas del material compuesto híbrido, fabricado de un tejido de abacá (FAb) y algodón (FAI) más fibra de vidrio (FV), combinado con una matriz polimérica de resina poliéster; tomando como factores de entrada la configuración y el tipo de secado.

En este trabajo se planteó un proceso de análisis basado en el Diseño de Experimentos (DOE), complementado con el Análisis de la Función de Deseabilidad (DFA), por lo que inicialmente se efectuó la organización y validación de los datos recolectados a fin de que cumplan con los supuestos paramétricos, lo cual ratifica los resultados obtenidos, manteniendo una alta confiabilidad en todo el proceso de análisis. Con la información validada, se examinó la variabilidad presente en los datos aplicando un Diseño Factorial General, definiendo los efectos significativos y su influencia en las propiedades mecánicas evaluadas; con esto se infiere a la población de probetas, para la optimizando en base a las medias poblacionales.

Con esta investigación se logró determinar que los factores óptimos para aprovechar las propiedades mecánicas, fueron: la configuración 20% FV + 7.75% FAb (45°) + 2.25% FAI (135°) y el tipo de secado al Horno, con un valor de deseabilidad global de 0.825; además se establece que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica hasta el 95.72% la variabilidad de las propiedades.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO**

**CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING FACULTY**

**MECHANICAL ENGINEERING CAREER**

**TOPIC:** “STATISTICAL ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES TO TRACTION, FLEXION AND IMPACT OF THE HYBRID MATERIAL WITH GLASS FIBER AND ABACÁ IN POLYMERIC MATRIX OF RESIN POLYESTER, TO DETERMINE THE BEST CONFIGURATION”

**AUTHOR:** Henry David Erazo Sánchez

**ADVISOR:** Ing. Juan Paredes Salinas Mg.

**ABSTRACT**

The investigations of applications and mechanical behavior of new composite and hybrid materials, has led to make characterizations and different analysis of results, in order to determine the material with better mechanical properties; In most cases, to reach that goal, the selection of a material has depended on the subjectivity of the researcher. Thus, in the present experimental work, a methodology of statistical analysis is specified, for the optimization of mechanical properties of the hybrid composite material, made of an abaca woven (AbF) and cotton (CF) plus fiberglass (FG), combined with a polyester resin polymer matrix; taking the configuration and type of drying as input factors.

In this work an analysis process based on the Design of Experiments (DOE) was proposed, complemented with the Desirability Function Analysis (DFA), so that initially the organization and validation of the collected data was carried out in order that comply with the parametric assumptions, which ratifies the results obtained, maintaining a high reliability throughout the analysis process. With the validated information, the variability present in the data was examined applying a Full Factorial Design, defining the significant effects and their influence on the mechanical properties evaluated; with this, the sample population is inferred, for the optimization based on the population means.

With this research it was possible to determine that the optimal factors to take advantage of the mechanical properties were: the configuration 20% FG + 7.75% AbF (45°) + 2.25% CF (135°) and the type of oven drying, with a value of global desirability of 0.825; It is also established that the general factorial regression model of the Full Factorial Design explains up to 95.72% the variability of the properties.

## **CAPÍTULO I**

### **ANTECEDENTES**

#### **1.1 TEMA**

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN, FLEXIÓN E IMPACTO DEL MATERIAL HÍBRIDO CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ EN MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER, PARA DETERMINAR LA MEJOR CONFIGURACIÓN

#### **1.2 ANTECEDENTES**

Para el desarrollo del presente trabajo experimental se citan las siguientes investigaciones que brindan la información necesaria que servirá de referencia en nuestro estudio.

De acuerdo a la investigación generada por F Barari, R Morgan y P Barnard, Universidad de Brighton, de la Revista de Física: Serie de conferencias 547, con el tema: “A DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE) APPROACH TO OPTIMISE TEMPERATURE MEASUREMENT ACCURACY IN SOLID OXIDE FUEL CELL (SOFC)” han realizado un análisis basado en un enfoque estadístico DOE aplicando un diseño factorial completo en dos niveles con seis variables, para calcular el efecto de la interacción entre variables y la importancia de cada variable en los errores de medición, los resultados del DOE mostraron que para la longitud corta de la termocupla, el diámetro y la longitud fueron factores significativos incluso para rangos altos de temperatura, mientras que para la longitud extendida de la termocupla, la emisividad y la velocidad del gas son los factores importantes incluso en rango más bajos de temperaturas. [1]

De acuerdo al estudio realizado por M. Velasco Peña, J. Rodríguez Suárez y D. Restrepo Ardila, Centro Metalmeccánico. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

Bogotá, XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, con el tema: “CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE PIEZAS EN ABS EN FUNCIÓN DE PARÁMETROS DE PROCESO DE MANUFACTURA ADITIVA FDM” han determinado que los parámetros de diseño utilizados para la impresión de las probetas de ABS tuvieron influencia en las propiedades a tensión y dureza evaluadas, se conoció aplicando un diseño experimental factorial de tres factores y dos niveles sin repetitividad, se realizaron las pruebas con una significancia de 0,05. [2]

En la investigación realizada por Himadri Majumder y Kalipada Maity, Instituto Nacional de Tecnología, Rourkela-769008, Odisha, India, de la Conferencia IOP. Serie: Ciencia e ingeniería de materiales 338, bajo el tema: “MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION OF WEDM PROCESS PARAMETERS USING TAGUCHI BASED DESIRABILITY FUNCTION ANALYSIS” utilizan el análisis de función de deseabilidad DFA para la toma de decisiones de múltiples atributos para encontrar el ajuste óptimo para los parámetros: pulso de tiempo, pulso apagado, alimentación de alambre y tensión de alambre, también se emplea la relación señal / ruido de Taguchi para la optimización de los parámetros, los investigadores validan que el DFA es competente para la optimización de parámetros. [3]

De acuerdo a la investigación realizada por A Nurulhuda, Y Hafizzal, MZM Izzuddin, MRN Sulawati, A Rafidah, Y Suhaila y AR Fauziah, Departamento de Ingeniería de Calidad, Universidad de Kuala Lumpur (UniKL), de la Conferencia IOP. Serie: Ciencia e ingeniería de materiales 226, bajo el tema: “ANALYSIS ON FLEXURAL STRENGTH OF A36 MILD STEEL BY DESIGN OF EXPERIMENT (DOE)” han empleado el Diseño de experimentos DOE utilizando un diseño factorial completo con dos repeticiones, analizando la resistencia a la flexión, como respuesta medible de salida se estudian los efectos de los parámetros: tipo de soldadura, grosor y diseño de la junta; con este análisis recomiendan el ajuste óptimo de los parámetros, dando el valor más alto de resistencia de la flexión con los parámetros: soldadura de GMAW, espesores de 4 mm y condiciones de diseño de juntas traslapadas. [4]

De acuerdo al trabajo realizado por E.H. Agung, S.M. Sapuan, M.M. Hamdan, H.M.D.K. Zaman, y U. Mustofa, Departamento de Ingeniería Mecánica y de



Fabricación, Universidad de Putra Malaysia, con el tema: “OPTIMIZATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ABACA FIBRE-REINFORCED HIGH IMPACT POLYSTYRENE (HIPS) COMPOSITES USING BOX-BEHNKEN DESIGN OF EXPERIMENTS” se presenta un estudio para la optimización factores que influyen en las propiedades mecánicas del compuesto analizado, tales como: porcentaje en peso de fibra de abacá como refuerzo, porcentaje en peso de agente de acoplamiento y porcentaje en peso de modificador de impacto; empleando la Metodología de Superficie de Respuesta utilizando el diseño de Box-Behnken. Empleando este análisis estadístico se obtuvieron coeficientes de determinación de hasta 0.9817. [5]

En la investigación generada por T. Rajmohan, G.M. Dinesh, Gangamalla Vinay Raghavendra, Gayatri.S, K. R. Charan reddy, Kovuru Yogeswar, Departamento de Ingeniería Mecánica, Sri Chandrasekharendra Viswa Mahavidyalaya, Kanchipuram, Tamilnadu, India, de la Conferencia IOP. Serie: Ciencia e ingeniería de materiales 390, bajo el tema: “MULTI RESPONSE OPTIMIZATION OF DRILLING PERFORMANCE OF MWCNT FILLED BANANA-GLASS FIBRE REINFORCED COMPOSITE” emplean el análisis de la función de deseabilidad basado en el diseño factorial para optimizar los parámetros de mecanizado para la mínima delaminación, la fuerza de empuje y la rugosidad de la superficie. Se define al ángulo de punto y la velocidad de avance como los parámetros más importantes en las respuestas analizadas. [6]

De acuerdo al trabajo generado por Suardi, H Homma, Abubakar, Escuela de Posgrado Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitas Sumatra Utara, de la Conferencia IOP. Serie: Ciencia e ingeniería de materiales 308, bajo el tema: “IDENTIFICATION OF TENSILE STRENGTH PROPERTIES OF ABACA FIBER BY WEAKEST-LINKAGE APPROACH-STATISTIC PROPERTY OF FIBER DIAMETER” se pretende identificar la resistencia mecánica de la fibra de abacá mediante un enfoque estadístico aplicando la teoría de Weakest Link y la teoría de Weibull, para reducir la relación de dispersión, la desviación estándar, al final del estudio los autores empleando la Prueba T, sugiriendo que el diámetro medio de las diferentes partes de la fibra son significativamente diferentes. [7]

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo experimental está encaminado a la optimización de parámetros de fabricación de un nuevo material alternativo, buscando el máximo beneficio de las propiedades obtenidas mediante los ensayos de tracción y flexión. Este híbrido está elaborado de un tejido de abacá (FAB) y algodón (FAI) más fibra de vidrio (FV), combinado con una matriz polimérica de resina poliéster.

Hoy en día varias investigaciones realizan diferentes caracterizaciones y análisis de resultados para determinar una material con las mejores propiedades mecánicas, muchas veces en dichos análisis está presente de manera explícita el criterio subjetivo del investigador, lo que hace poco práctico el método empleado ya que el criterio de un investigador difiere de persona a persona, por ello utilizando una metodología como el Diseño de Experimentos junto con la Función de Deseabilidad, que convierte este análisis en un método adecuado a los intereses que demanda esta investigación centrándose en un valor objetivo cuantificable con un alto nivel de confiabilidad, lejos de una simple ponderación subjetiva.

Los materiales convencionales fabricados con fibras sintéticas cumplen con los requerimientos que su aplicación demanda, no obstante, cuando consideramos la evaluación del ciclo de vida de las fibras sintéticas, se puede evidenciar que en el proceso de producción de las mismas existe una gran cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo anteriormente mencionado, se deben desarrollar más fibras de refuerzo ecológico como fibras de celulosa iónica derivadas de la estructura de tejido vegetal en reemplazo a las fibras sintéticas total o parcialmente, que se consideran materiales neutros en carbono y materiales que se degradan naturalmente. [7]

El sector carroceros es uno de los más importantes para la economía de la provincia, ya que en Tungurahua se produce el 65% de las carrocerías a nivel nacional [8], al ser una sector en constante desarrollo se puede proveer a la industria carrocera una alternativa en el uso de un nuevo material híbrido para el proceso de fabricación de partes y piezas internas y externas de buses, mediante la caracterización del material analizado, aprovechando de manera óptima sus propiedades mecánicas.

Además el presente trabajo experimental plantea una metodología claramente descrita para el análisis de resultados de distintos ensayos, convirtiéndose en una herramienta objetiva de comparación y un aporte para beneficiarios como: estudiantes y docentes de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Esta investigación representará un aporte bibliográfico para futuros estudios tanto dentro como fuera de la universidad.

También hay que reconocer que el costo que demanda la ejecución de este trabajo experimental resulta mínimo ya que los datos a analizar y el software que interviene en dicho análisis se encuentra al alcance del investigador.

A más de los lineamientos antes mencionados, este trabajo experimental genera beneficios al proyecto de investigación: “ANÁLISIS DE MATERIAL HÍBRIDO CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ EN MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER Y SU INCIDENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN PARTES EXTERIORES DE BUSES” que se encuentra en ejecución en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar estadísticamente las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material híbrido con fibra de vidrio y abacá en matriz polimérica de resina poliéster, para determinar la mejor configuración.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar las distintas configuraciones y condiciones bajo las que fueron elaboradas las probetas a ensayar.
- Evaluar los resultados de los ensayos de tracción, flexión e impacto, obtenidos de estudios previos, con los que se han determinado sus propiedades mecánicas.
- Determinar la configuración óptima del material alternativo, mediante pruebas estadísticas, con la finalidad de que se pueda aprovechar de una manera eficiente las propiedades mecánicas ensayadas.

- Establecer, de las pruebas estadísticas, cual es la más aplicable, que nos dará un resultado satisfactorio, a casos futuros, de acuerdo a las configuraciones, ensayos y condiciones de elaboración de las probetas.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTACIÓN**

#### **2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

##### **2.1.1 INFERENCIA ESTADÍSTICA**

La inferencia estadística estudia grandes colectivos a partir de una pequeña parte de estos, los grandes colectivos que se pretenden analizar se denominan población, mientras que la parte que sirve de apoyo para dicho análisis se denomina muestra. [9]

La inferencia estadística consiste en proyectar a la población las conclusiones obtenidas al estudiar la muestra, la misma que debe ser suficientemente representativa de la población de la cual ha sido extraída. Para que no exista un margen de error muy grande en el cálculo de las características de la población, es necesario un estudio exhaustivo, ya que mayores niveles de precisión exigirán una mayor información sobre la población. [9]

Dependiendo del grado de conocimiento de la distribución de la población, se distinguen dos métodos:

##### **2.1.1.1 INFERENCIA PARAMÉTRICA**

En la inferencia paramétrica se precisa únicamente el valor de los parámetros para determinar la distribución poblacional, la misma que pertenece a una familia de distribuciones paramétricas. [9]

La inferencia paramétrica puede estudiarse desde los siguientes enfoques:

- Enfoque clásico. Los parámetros de la distribución se consideran constantes.
- Enfoque bayesiano. Los parámetros se consideran variables aleatorias.

### 2.1.1.2 INFERENCIA NO PARAMÉTRICA

Exige sólo hipótesis muy generales, como la de simetría, ya que no supone ninguna distribución de probabilidad de la población. [9]

La inferencia no paramétrica se puede clasificar en:

- Procedimientos de localización
- Procedimientos de estructura
- Procedimientos sobre las condiciones de la muestra

### 2.1.2 ENFOQUE CLÁSICO

Los estudios experimentales tienen como objetivo final, responder en forma segura ciertas preguntas y tomar una decisión, es así que el experimentador tiene creencias o hipótesis que desea comprobar. La idea de la investigación es generar evidencia a favor de la hipótesis, aunque esta evidencia en algunos casos pueda llegar a rechazar la afirmación originalmente planteada. [10]

Una hipótesis estadística es una afirmación sobre los valores de los parámetros de una población o proceso, se estructura la prueba de hipótesis mediante el planteamiento de una hipótesis alternativa, que representa la teoría que se probará y que se denota con  $H_1$  y la hipótesis nula, que es el complemento lógico de  $H_1$  y se denota con  $H_0$ . [11]

La hipótesis estadística puede probarse a partir de la información contenida en una muestra, esta prueba es una decisión probabilística, lo que conlleva al riesgo de cometer errores tales como: [10], [11]

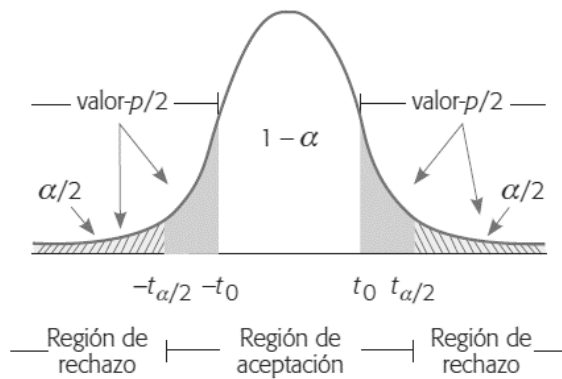
- Error tipo I. Ocurre si se rechaza  $H_0$  cuando ésta es verdadera, la probabilidad de cometer este error se denota como  $\alpha$ . A  $\alpha$  también se le conoce como la significancia dada de la prueba o predefinida.

- Error tipo II. Ocurre si no se rechaza  $H_0$  cuando ésta es falsa, la probabilidad de cometer este error se denota como  $\beta$ . La probabilidad de rechazar  $H_0$  cuando es falsa es  $1 - \beta$  y se denomina potencia de la prueba.

En las pruebas de hipótesis se especifica el valor de  $\alpha$  y se diseña la prueba para que el valor de  $\beta$  sea pequeño, controlándolo indirectamente con el tamaño de la muestra. [10], [11]

El criterio para rechazar la hipótesis nula, consecuentemente aceptando la alternativa y el cual nos brinda información adicional sobre la decisión que se está tomando, es el de contrastar la significancia observada frente a la significancia predefinida. La significancia observada o calculada es el área bajo la distribución de referencia más allá del valor del estadístico de prueba y se la conoce como valor- $p$ .

El criterio consiste en rechazar  $H_0$  si la significancia observada es menor que la significancia predefinida, es decir, si el valor- $p < \alpha$ . La significancia observada se puede ver como la probabilidad o evidencia a favor de  $H_0$ .



**Figura 2.1** Comparación de significancias

**Fuente:** [10]

El análisis llega a las siguientes conclusiones: [11]

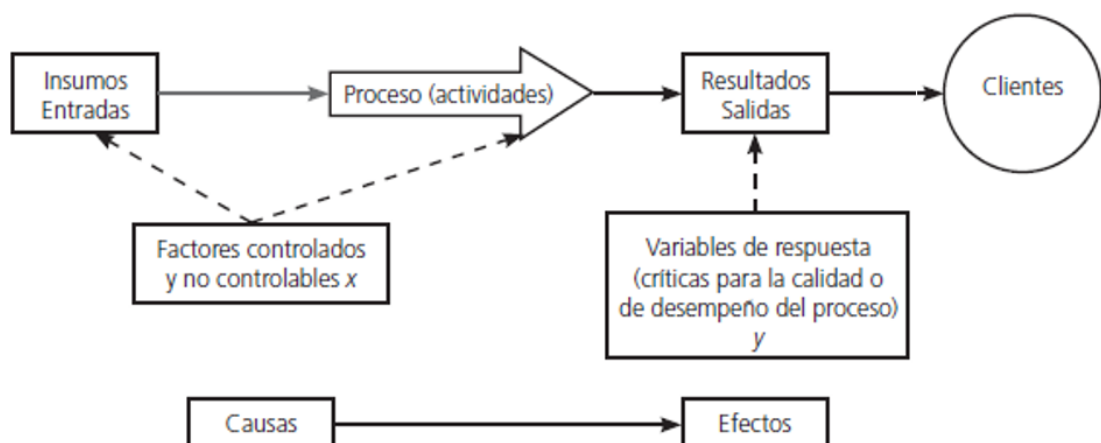
- Rechazar  $H_0$  a favor de  $H_1$  debido a evidencia suficiente en los datos o
- No rechazar  $H_0$  debido a evidencia insuficiente en los datos

### 2.1.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos consiste en determinar la forma eficaz de hacer pruebas, para obtener información del proceso o sistema, que analizada estadísticamente proporciona evidencia objetiva que permite responder la interrogante planteada. [10], [12]

El diseño de experimentos tiene un papel importante en las actividades de diseño de ingeniería, en el desarrollo de nuevos productos y el mejoramiento de productos ya existentes, entre las aplicaciones del diseño de experimentos dentro de la ingeniería, se encuentran: [12]

- Evaluación y comparación de configuraciones de diseño básico.
- Evaluación de materiales alternativos.
- Selección de parámetros de diseño de un producto para que tenga buen funcionamiento bajo varias condiciones de campo.
- Determinación de parámetros clave del diseño del producto que afectan el desempeño del mismo.



**Figura 2.2** Variables de un proceso

**Fuente:** [10]



La metodología del diseño de experimentos se ha consolidado como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permite entender mejor situaciones complejas de relación causa (Factores controlables y no controlables “x”) – efecto (Características de calidad o variables de respuesta “y”) [10], [12]

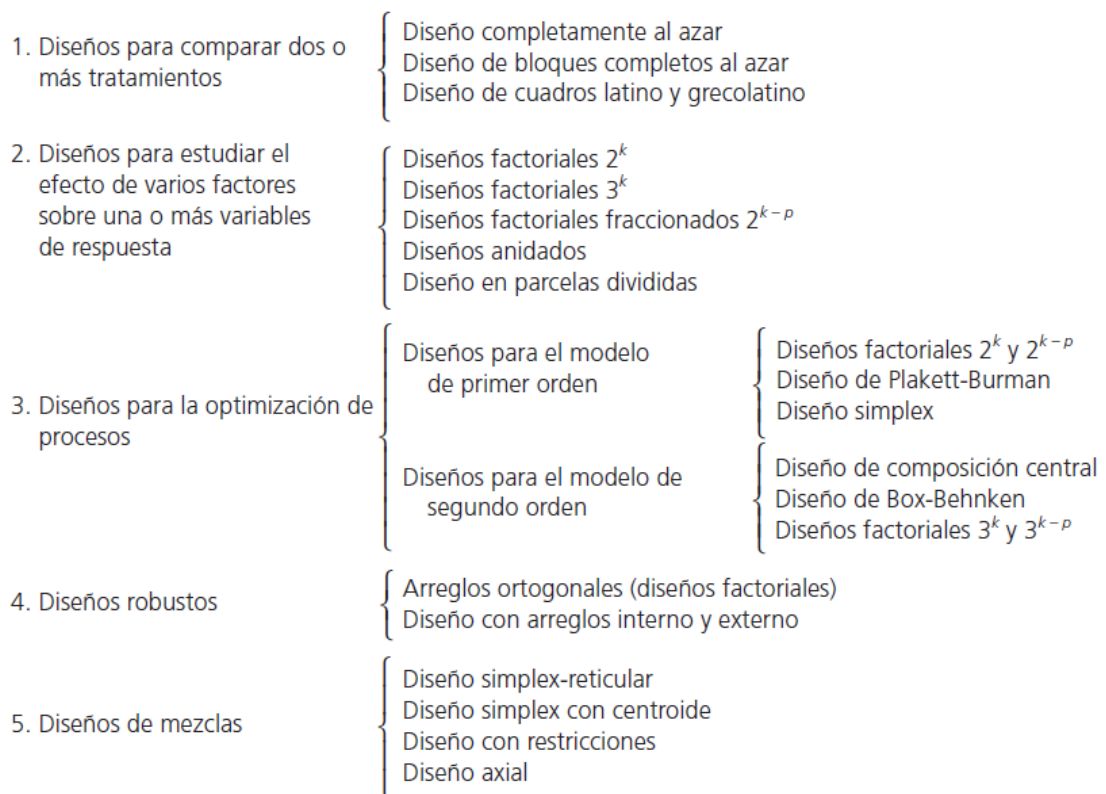
Para emplear los diseños de experimentos es vital que el investigador tenga un buen nivel de conocimiento técnico y práctico sobre el proceso o sistema que estudia con el fin de que fácilmente pueda plantear conjeturas precisas y hacer provechoso el análisis estadístico a escala real. [10]

Debido a la gran cantidad de diseños de experimentos, es necesario saber cómo elegir el más adecuado para cada problema o situación, además entender cómo estos se clasifican de acuerdo a su objetivo y su alcance. Hay cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental: [10]

1. Objetivo del experimento.
2. Número de factores a estudiar.
3. Número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Efectos que interesa investigar (relación factores – respuesta)
5. Costo del equipo, tiempo y precisión deseada.

Para clasificar los diseños de experimentos se emplea como criterio general el objetivo del experimento, es así que en la Figura 2.3 se pueden enlistar los diseños más representativos. De manera particular, dentro del diseño de experimentos se especifican tres diseños aplicables para el análisis de los datos de esta investigación, estos son:

- Diseño completamente aleatorizado (DCA)
- Diseño en bloques completos al azar (DBCA)
- Diseños factoriales



**Figura 2.3** Clasificación de los diseños experimentales

**Fuente:** [10]

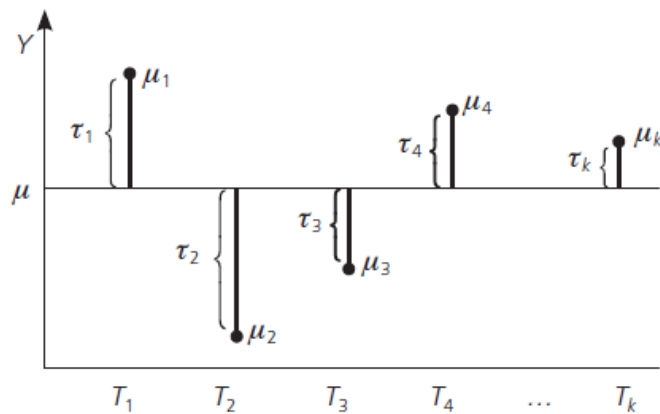
### 2.1.3.1 DISEÑO COMPLETAMENTE ALEATORIZADO

A este tipo de diseño se lo denomina completamente aleatorizado (DCA), debido a que todas las corridas experimentales se corren al azar, de manera que los posibles efectos ambientales y temporales se vayan repartiendo equitativamente entre los tratamientos, es el más simple de los diseños debido a que solo considera dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio. También se lo designa como ANOVA de un factor, este es un diseño en el cual de  $k$  poblaciones se seleccionan muestras aleatorias de tamaño  $n$ . Las  $k$  poblaciones diferentes se clasifican con base en un criterio único, como tratamientos o grupos distintos, este único criterio será el factor de análisis. En la actualidad el término tratamiento se utiliza por lo general para designar las diversas clasificaciones, ya sean diferentes agregados, fertilizadores, máquinas u operadores. [10], [11]

El modelo que describe este experimento y cada observación es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde,  $\mu$  es el parámetro de escala común en los tratamientos, llamado media global,  $\tau_i$  es un parámetro que mide el efecto del tratamiento  $i$  y  $\varepsilon_{ij}$  es el error atribuible a la medición  $Y_{ij}$ ; el modelo se visualiza más fácilmente en la Figura 2.4.



**Figura 2.4** Representación de las medias y los efectos de los tratamientos

**Fuente:** [10]

El análisis de varianza (ANOVA) es la herramienta central en el análisis de datos experimentales y consiste en separar la variación total en partes con las que aporta cada fuente de variación del experimento, para el ANOVA de un factor o DCA, se separan la variabilidad por los tratamientos y la debida al error.

El objetivo del análisis de varianza es probar la hipótesis de igualdad de los tratamientos con respecto a la media de la correspondiente variable de respuesta: [10]

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

De manera equivalente también se entiende que:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para alg\u00fan } i$$

La t\u00e9cnica de ANOVA emplea la suma total de cuadrados como una medida de la variabilidad total presente en las observaciones, la suma total de cuadrados ( $SC_T$ ) se puede partir en dos componentes: la suma de cuadrados de tratamientos ( $SC_{TRAT}$ ) y la suma de cuadrados de error ( $SC_E$ ). El experimento tiene un total de  $N$  observaciones y  $k$  tratamientos o factores de inter\u00e9s que sirven para considerar los grados de libertad, la suma de cuadrados dividida entre sus respectivos grados de libertad se llaman cuadrados medios ( $CM$ ) y es una estimaci\u00f3n de la magnitud de la fuente de variabilidad. [10], [11]

**Tabla 2.1** Tabla de ANOVA para el DCA

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$	Valor- $p$
Tratamientos	$SC_{TRAT}$	$k - 1$	$CM_{TRAT}$	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	$SC_E$	$N - k$	$CM_E$		
Total	$SC_T$	$N - 1$			

**Fuente:** Autor

Para el c\u00e1lculo de la suma de cuadrados de los tratamientos, la suma de cuadrados del error y la suma de cuadrados totales tenemos las siguientes ecuaciones:

$$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i\cdot}^2}{n_i} - \frac{Y_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$SC_E = SC_T - SC_{TRAT} \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad \text{Ec. 2.3}$$

En la Tabla 2.1 se simplifica el cálculo de las  $SC$ , los  $CM$  y del estadístico  $F_0$  con las ecuaciones ahí descritas, donde:  $Y_{i\cdot}$  es la suma de las observaciones del tratamiento  $i$  y  $Y_{\cdot\cdot}$  es la suma total de las  $N$  mediciones.

De las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 y las analizadas en la tabla 2.1 se obtiene el valor de  $F_0$ , el cual si es grande, se rechaza la hipótesis nula, específicamente se rechaza  $H_0$  si  $F_0 > F_{\alpha, k-1, N-k}$ , donde  $F_{\alpha, k-1, N-k}$  es el percentil  $(1 - \alpha) \times 100$  de la distribución  $F$ , también se puede emplear el valor- $p$ , siendo este el área bajo la distribución  $F_{k-1, N-k}$ , a la derecha del estadístico  $F_0$ , es decir, el valor- $p = P(F > F_0)$ , se rechaza  $H_0$  si el valor- $p < \alpha$ . [10]

### 2.1.3.2 DISEÑO EN BLOQUES COMPLETOS AL AZAR

Una manera adecuada de estudiar el factor de interés, es considerar factores adicionales que se incorpora al experimento de manera explícita y se denominan factores de bloque, en un diseño en bloques completos al azar (DBCA) se consideran tres fuentes de variación: el factor de tratamiento, el factor de bloque y el error aleatorio. Es un diseño completo debido a que se prueban todos los tratamientos en cada bloque y la aleatorización se la realiza dentro de cada bloque. El diseño experimental supone  $k$  tratamientos y  $b$  bloques, el número de observaciones viene dada por  $N = k \cdot b$ . [10], [11]

El modelo que describe este experimento y cada observación es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}; \begin{cases} i = 1, 2, \dots, k \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases}$$

Donde:  $Y_{ij}$  es la medición que corresponde al tratamiento  $i$  y al bloque  $j$ ;  $\mu$  es la media global poblacional;  $\tau_i$  es el efecto debido al tratamiento  $i$ ,  $\gamma_j$  es el efecto debido al bloque  $j$ , y  $\varepsilon_{ij}$  es el error aleatorio atribuible a la medición  $Y_{ij}$ . [10]

La hipótesis a probar es la misma para todos los diseños comparativos y es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para alg\u00fan } i \neq j$$

De manera equivalente tambi\u00e9n se entiende que:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$$

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_k = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para alg\u00fan } i$$

$$H_1: \gamma_i \neq 0 \text{ para alg\u00fan bloque } j$$

**Tabla 2.2** Tabla de ANOVA para el DBCA

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
Tratamientos	$SC_{TRAT}$	$k - 1$	$CM_{TRAT}$	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Bloques	$SC_B$	$b - 1$	$CM_B$	$\frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	$SC_E$	$(k - 1)(b - 1)$	$CM_E$		
Total	$SC_T$	$k \cdot b - 1$			

Fuente: Autor

La hip\u00f3tesis se prueba con un an\u00e1lisis de varianza con dos criterios de clasificaci\u00f3n, ya que se controla dos fuentes de variaci\u00f3n: el factor de tratamiento y el factor de bloque. Los c\u00e1lculos necesarios para llegar a la conclusi\u00f3n del experimento se simplifican en la Tabla 2.2, llegando al valor de  $F_0$ .

Para el c\u00e1lculo de la suma de cuadrados de los tratamientos, de los bloques, del error y la suma de cuadrados totales tenemos las siguientes ecuaciones:

$$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i\cdot}^2}{b} - \frac{Y_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{\cdot j}^2}{k} - \frac{Y_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$SC_E = SC_T - SC_{TRAT} - SC_B \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$SC_T = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^k Y_{ij}^2 - \frac{Y_{\cdot\cdot}^2}{N} \quad \text{Ec. 2.7}$$

La interpretación del factor de bloque resulta favorable debido a que presenta evidencia a favor o en contra respecto a que valió la pena controlar dicho factor, al ser significativo el efecto del factor de bloque, implica que éste tiene influencia sobre la variable de respuesta y debe tomarse en cuenta para mejorar la calidad de ésta, pero si su efecto no es significativo, entonces no es necesario controlarlo en futuros experimentos sobre esta misma respuesta. [10], [11]

### 2.1.3.3 DISEÑOS FACTORIALES

Cuando se quiere estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas y se tiene el mismo interés sobre todos los factores, es necesario emplear el diseño factorial. En particular, se emplea el diseño factorial para determinar una combinación de factores en el que el desempeño del proceso sea el mejor, los factores pueden ser cualitativos o cuantitativos. [10]

El cambio observado en la variable de respuesta debido al cambio de nivel en el factor, se define como el efecto de un factor; de manera específica tenemos los efectos principales y los efectos de interacciones, los primeros son los cambios en la media de la variable de respuesta debido a la acción individual de cada factor, los otros se dan cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que se encuentra el otro. [12]

Las principales ventajas de los diseños factoriales son: logran estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores, pueden correr fracciones de diseños factoriales para economizar el experimento, pueden implementarse bloques cuando no todo el diseño factorial se pueda correr bajo las mismas condiciones. [10]

El modelo que describe un diseño factorial de dos factores está dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}; \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Donde:  $Y_{ij}$  es la medición que corresponde al nivel  $i$  del factor A, con el nivel  $j$  del factor B y en la réplica  $n$ ;  $\mu$  es la media general;  $\alpha_i$  es el efecto debido al  $i$ -ésimo nivel del factor A,  $\beta_j$  es el efecto debido al  $j$ -ésimo nivel del factor B,  $(\alpha\beta)_{ij}$  representa el efecto de interacción en la combinación  $ij$ , y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error aleatorio atribuible a la medición  $Y_{ijk}$  que, se supone, sigue una distribución normal con media cero, varianza constante  $\sigma^2$  e independientes entre sí. [10]

La hipótesis a probar para los tres efectos del modelo de dos factores es:

$$H_0: \text{Efecto del Factor A} = 0 \qquad H_0: \text{Efecto del Factor B} = 0$$

$$H_1: \text{Efecto del Factor A} \neq 0 \qquad H_1: \text{Efecto del Factor B} \neq 0$$

$$H_0: \text{Efecto del Factor A} \times \text{Factor B} = 0$$

$$H_1: \text{Efecto del Factor A} \times \text{Factor B} \neq 0$$

De manera equivalente también se entiende mediante los términos del modelo que:

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0 \qquad H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \alpha_i \neq 0 \text{ para algún } i \qquad H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para algún } j$$

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \text{ para todo } ij$$

$$H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0 \text{ para algún } ij$$

La hipótesis se prueba mediante el análisis de varianza para un diseño factorial  $a \times b$  con  $n$  replicas descomponiendo la variación total. Hay que aclarar que los grados de libertad ( $ab(n - 1)$ ) de la suma de cuadrados del error ( $SC_E$ ), no se pueden anular para construir una tabla de ANOVA, por lo que se necesitan al menos dos réplicas del



experimento. Los cálculos necesarios para llegar a la conclusión del experimento se simplifican en la Tabla 2.3, llegando al valor de  $F_0$  de cada factor y de la interacción.

**Tabla 2.3** Tabla de ANOVA para el Diseño Factorial  $a \times b$

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
Efecto A	$SC_A$	$a - 1$	$CM_A$	$\frac{CM_A}{CM_E}$	$P(F > F_0^A)$
Efecto B	$SC_B$	$b - 1$	$CM_B$	$\frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0^B)$
Efecto AB	$SC_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$CM_{AB}$	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$	$P(F > F_0^{AB})$
Error	$SC_E$	$a \cdot b(n - 1)$	$CM_E$		
Total	$SC_T$	$a \cdot b \cdot n - 1$			

Fuente: Autor

Para el cálculo de la suma de cuadrados de cada efecto, la suma de cuadrados de la interacción, la suma de cuadrados del error y la suma de cuadrados totales tenemos las siguientes ecuaciones:

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{b \cdot n} - \frac{Y_{...}^2}{N} \quad Ec. 2.8$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{a \cdot n} - \frac{Y_{...}^2}{N} \quad Ec. 2.9$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B \quad Ec. 2.10$$

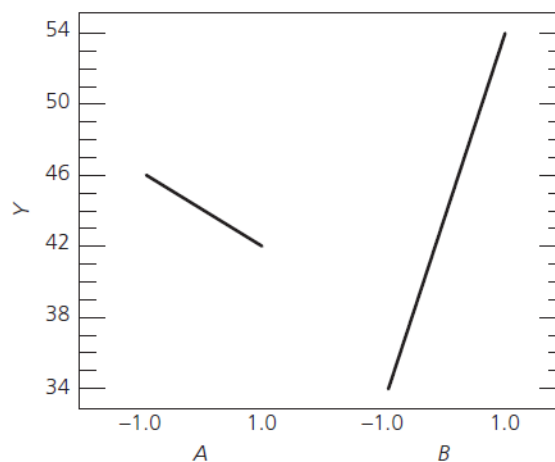
$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad Ec. 2.11$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{\dots}^2}{N} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde,  $N = a \cdot b \cdot n$  es el total de observaciones en el experimento;  $Y_{i..}$  es el total en el nivel  $i$  del factor A,  $Y_{.j.}$  es el total en el nivel  $j$  del factor B,  $Y_{\dots}$  es la suma de todas las observaciones.

### Representación de los efectos principales y la interacción

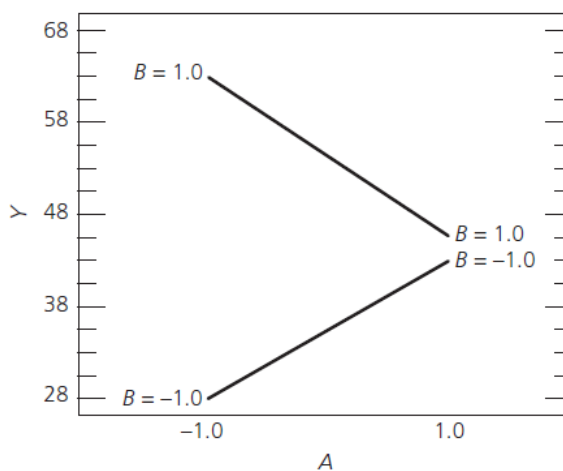
El efecto principal de un factor se puede representarse gráficamente al ubicar en el eje horizontal los niveles del factor y en el eje vertical la media de la respuesta observada de cada uno de los niveles, como se ilustra en la Figura 2.5, por la diferencia de pendientes en las líneas se puede identificar el efecto que más influye en la respuesta.



**Figura 2.5** Representación de los efectos principales

**Fuente:** [10]

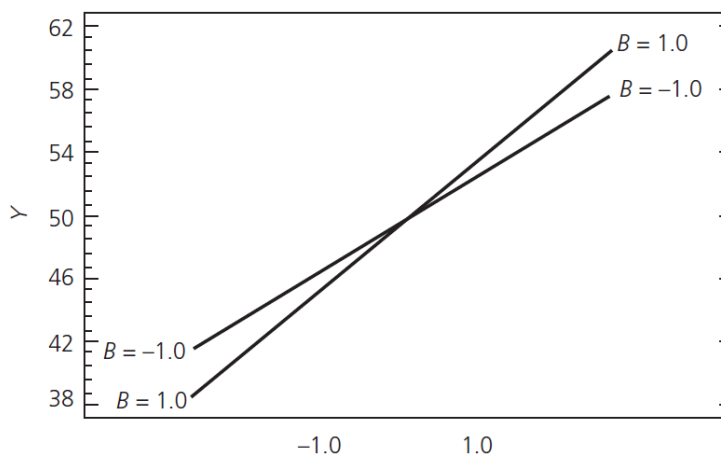
Para los efectos de interacción entre dos factores, se pueden representar gráficamente ubicando en el eje vertical la magnitud de la variable de respuesta, en el eje horizontal se disponen los niveles de uno de los factores, vertical a cada uno de estos niveles se sitúa un punto que representa la respuesta promedio en cada nivel del otro factor; finalmente se unen los puntos del lado izquierdo correspondientemente con los del lado derecho, como se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Representación de los efectos de interacción AB

**Fuente:** [10]

Para interpretar correctamente que existe interacción hay que entender que esto ocurre cuando las líneas obtenidas tienen pendientes muy diferentes, como ocurre en la Figura 2.6; si no es así y las pendientes son similares, como en la Figura 2.7, entonces no hay interacción entre los factores.



**Figura 2.7** Representación de los efectos de no interacción AB

**Fuente:** [10]

Asimismo es preciso analizar con detalle lo que pasa con la respuesta cuando se mueve un factor dependiendo del nivel en el que esté otro.

## Coefficientes de determinación

Para medir la calidad global del modelo, se emplean dos estadísticos útiles, estos son: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ), estos estadísticos se obtienen a partir del análisis de varianza. [10]

$$R^2 = \frac{SC_T - SC_E}{SC_T} * 100 \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$R^2_{aj} = \frac{CM_T - CM_E}{CM_T} * 100 \quad \text{Ec. 2.14}$$

### 2.1.4 SUPUESTOS PARAMÉTRICOS

El uso de la partición de la variabilidad total de los datos al aplicar el análisis de varianza requiere que se satisfagan los supuestos del modelo. Ya que para el análisis se supone que las poblaciones son independientes y que están distribuidas en forma normal con medias  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$  y varianza común  $\sigma^2$ , estas suposiciones son aceptable de mejor manera mediante la aleatoriedad. Esto se interpreta en que, la respuesta  $Y$  en cada tratamiento se debe distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes.

Los supuestos sobre  $Y$  se traducen en supuestos sobre los residuos ( $e_{ij}$ ), el residual o residuo está dado por la diferencia entre la observación  $Y_{ij}$  y la respuesta predicha  $\hat{Y}_{ij}$ .

#### 2.1.4.1 NORMALIDAD

Para verificar el supuesto de normalidad se puede graficar un histograma de los datos, otra forma es realizar una gráfica de probabilidad normal de los residuales, pero la mejor manera de tener una correcta interpretación de que los datos sigan una distribución normal o no, es la contrastar significancias empleando una prueba de bondad de ajuste normal, como la de Kolmogorov – Smirnov. [13]

La prueba de Kolmogorov – Smirnov se emplea para probar que una muestra proviene de una distribución continua, en este caso la distribución normal, la prueba se basa en

comparar la función distribución acumulada de una distribución teórica  $F_t(x)$  con una distribución acumulada de la muestra  $F_m(x)$ . [13]. Si las funciones de distribución acumulada teórica y muestral no son significativamente diferentes, se puede decir que la muestra proviene de la distribución teórica, de no ser así y las diferencias son demasiado grandes, rechazamos  $H_0$ .

Con la significancia calculada (valor- $p$ ) se puede concluir que:

$H_0 \rightarrow$  La muestra proviene de una distribución normal

$H_1 \rightarrow$  La muestra no proviene de una distribución normal

Si el valor- $p < \alpha$ , rechazamos  $H_0$ .

#### 2.1.4.2 IGUALDAD DE VARIANZAS

Una manera de verificar este supuesto es graficar los predichos contra los residuos ( $\hat{Y}_{ij}$  vs.  $e_i$ ), los predichos en el eje horizontal y los residuos en el vertical. Para tomar una decisión se visualiza que los puntos en esta gráfica se distribuyan de manera aleatoria en una banda horizontal, siendo ese el caso, se confirma que se cumpla el supuesto de igualdad de varianza entre los tratamientos. [10]

Otra manera de verificar el supuesto de igualdad de varianzas es aplicar una prueba estadística, una de ellas es la prueba de Levene, el cual es un procediendo robusto a desviaciones de la normalidad. La prueba de Levene utiliza la desviación absoluta de las observaciones  $Y_{ij}$  de cada tratamiento de la mediana de los tratamientos  $\tilde{Y}_i$ . Esta prueba evalúa si la media de estas desviaciones es igual o no para todos los tratamientos. Si las desviaciones medias son iguales, las varianzas de las observaciones de todos los tratamientos son iguales. [12]

Con la significancia calculada (valor- $p$ ) se puede concluir que:

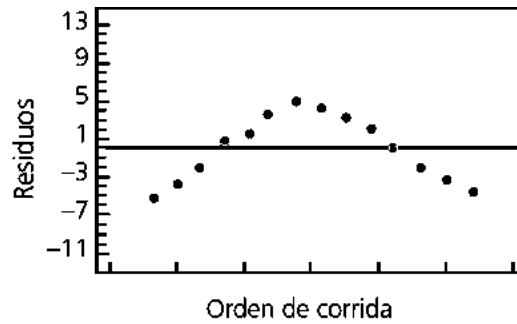
$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_k^2 = \sigma^2$$

$$H_1: \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \text{ para algún } i \neq j$$

Si el valor- $p < \alpha$ , rechazamos  $H_0$ .

### 2.1.4.3 INDEPENDENCIA DE RESIDUOS

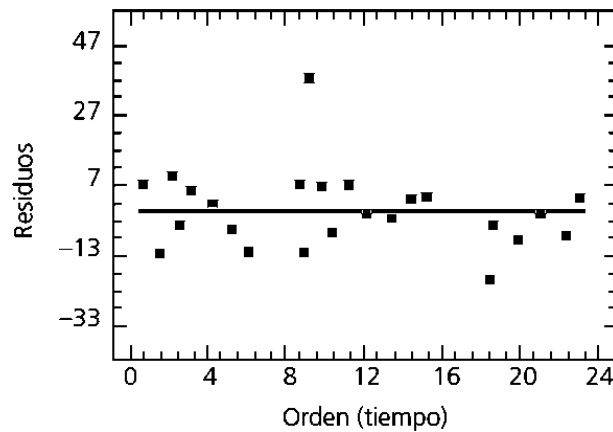
Este supuesto se puede verificar al graficar el orden en el que se colectó un dato situándolo en el eje horizontal contra el residuo correspondiente en el eje vertical.



**Figura 2.8** Gráfica de Orden vs. Residuos en la que no se cumple independencia

**Fuente:** [10]

Para interpretar la información de la gráfica, hay que detectar la presencia de alguna tendencia o patrón no aleatorio claramente definido, siendo esta la evidencia de que existe una correlación entre los errores, como se puede visualizar en la Figura 2.8. [10]



**Figura 2.9** Gráfica de Orden vs. Residuos en la que se cumple independencia

**Fuente:** [10]

Si esto no pasa, se puede evidenciar un comportamiento aleatorio de los puntos dentro de la banda horizontal, confirmando la independencia de residuos, como se observa en la Figura 2.9. [10]

### 2.1.5 TRANSFORMACIÓN DE DATOS

Las pruebas paramétricas son herramientas potentes y alternativas altamente confiables al momento de analizar datos, por lo que son las pruebas más destacadas, sin embargo para su aplicación se requiere que ciertos supuestos que cumplan, como el de normalidad y el de igualdad de varianzas. [14]

Ante la necesidad de emplear una prueba paramétrica sin contar con alguno de estos supuestos, existe la posibilidad de transformar los datos para hacer validos los supuestos y así analizar los datos transformados sin problema.

Una familia de transformaciones mayormente empleada es la familia de transformaciones Box-Cox, en donde los datos  $Y_i$  serán transformados en  $W_i$ .

$$W_i = \begin{cases} Y_i^\lambda & , si \lambda \neq 0 \\ Ln(Y_i) & , si \lambda = 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde,  $Y_i$  es un valor de los datos originales y  $\lambda$  es el parámetro de transformación. [15]

### 2.1.6 OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTAS MÚLTIPLES

Por lo general se cree tener una buena idea de lo que quiere obtener con el análisis: mejorar la resistencia de un material, subir una pureza, bajar un costo, reducir el desgaste de un material, etc. La base del problema es que en la práctica se requiere todo eso al mismo tiempo, esto quiere decir que no basta con tener una alta resistencia, quisiéramos también una pureza elevada, con un costo mínimo, etc. [16]

Al considerar ya no una sola característica sino diversas características simultáneamente, las cuales van a optimizarse en sentido opuesto lo cual llevará a que al momento de mejorar una, estemos perjudicando otra, [16] en otras palabras los

óptimos no caen la misma combinación de los factores de control, viéndonos en la necesidad de buscar una solución en la que todas las variables tengan un nivel satisfactorio, siendo esta solución el óptimo simultaneo. [10]

### 2.1.6.1 MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE DESEABILIDAD

Al momento de querer efectuar una optimización de respuestas múltiples, inicialmente se enfrenta el problema de que las respuestas a optimizar  $Y$  están medidas en distintas unidades: porcentajes, magnitudes físicas, dinero, etc., por lo que posterior al diseño de experimental aplicado se busca transformar las respuestas predichas por el modelo  $\hat{Y}_i(x)$  a valores normalizados, en este caso valores adimensionales dentro del intervalo  $[0,1]$ , a este valor se lo conoce como deseabilidad individual  $d_i$ . [10], [16]

La respuesta predicha por el modelo  $\hat{Y}_i(x)$ , es la estimación dentro del conjunto de datos para una observación específica, que se calcula a partir de la ecuación de regresión del modelo.

La deseabilidad individual  $d_i(x)$ , mide el interés que el investigador tiene sobre el punto  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  de la respuesta  $Y_i$  y depende de las especificaciones y del valor objetivo de cada respuesta. En particular se puede analizar dos casos de optimización individual: [10]

Cuando se desea maximizar la respuesta de salida.

$$d_i(x) = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_i(x) \leq Y_{min} \\ \left( \frac{\hat{Y}_i(x) - Y_{min}}{Y_{m\acute{a}x} - Y_{min}} \right)^r, & Y_{min} \leq \hat{Y}_i(x) \leq Y_{m\acute{a}x}, r \geq 0 \\ 1, & \hat{Y}_i(x) \geq Y_{m\acute{a}x} \end{cases} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Cuando se desee minimizar la respuesta de salida.

$$d_i(x) = \begin{cases} 1, & \hat{Y}_i(x) \leq Y_{min} \\ \left( \frac{\hat{Y}_i(x) - Y_{m\acute{a}x}}{Y_{min} - Y_{m\acute{a}x}} \right)^r, & Y_{min} \leq \hat{Y}_i(x) \leq Y_{m\acute{a}x}, r \geq 0 \\ 0, & \hat{Y}_i(x) \geq Y_{m\acute{a}x} \end{cases} \quad \text{Ec. 2.17}$$



Donde,  $y_{m\acute{a}x}$  es la especificaci3n superior de la respuesta,  $y_{min}$  es la especificaci3n inferior de la respuesta y  $r$  es una constante que permite definir la forma de la funci3n de deseabilidad para cada respuesta.

Una vez calculadas las deseabilidades individuales sobre el punto  $x$  se procede a definir un valor que mide la deseabilidad promedio en cada caso, lo cual convierte el problema de optimizaci3n de respuestas m3ltiples en un problema de una 3nica respuesta analizable de manera objetiva. La deseabilidad global est3 definida por la media geom3trica ponderada:

$$DG(x) = (d_1^{w_1} * d_2^{w_2} * \dots * d_m^{w_m})^{1/\sum w_i} \quad \text{Ec. 2.18}$$

Donde,  $w_i$  es la importancia relativa que tiene cada respuesta.

El punto 3ptimo simultaneo en es el punto  $x_{op} = (x_{1\ op}, x_{2\ op}, \dots, x_{k\ op})$ , sobre el cual la funci3n  $DG(x_{op})$  es m3xima.

### 2.1.7 PROPIEDADES MEC3NICAS

La propiedad mec3nica es una caracter3stica inherente propia del material, estas se determinan mediante experimentos, algunas de las pruebas m3s importantes son las de tracci3n, flexi3n e impacto; a partir de estas pruebas se pueden establecer varias propiedades mec3nicas importantes de un material. [17] Para determinar las propiedades mec3nicas de cierto material mediante la caracterizaci3n del mismo, se realizan las pruebas o ensayos con un n3mero espec3fico de probetas. [18]

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM) ha desarrollado normas para ensayo de materiales, dentro de las cuales encontramos las requeridas para la caracterizaci3n de materiales compuestos. [18]

### **2.1.7.1 ENSAYOS DE TRACCIÓN**

El ensayo de tracción es el más usual de los ensayos realizados en materiales, el cual consiste en deformar una probeta hasta la ruptura mediante la aplicación de una fuerza axial que aumenta de manera gradual a lo largo del eje principal. [18]

Para la ejecución del ensayo de tracción se emplea la norma ASTM D3039/D3039M-00, prevista para materiales compuestos, al caracterizar dicho material mediante el ensayo de tracción se pueden determinar las siguientes propiedades: [18]

- Esfuerzo máximo de tracción: Carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial.
- Módulo de elasticidad: Relación entre la tensión y la deformación en la zona de comportamiento proporcional.
- Elongación: Mayor alargamiento plástico alcanzado por la probeta.

### **2.1.7.2 ENSAYOS DE FLEXIÓN**

El ensayo a flexión consiste en un sistema de cargas en tres puntos utilizando una carga central en una viga con apoyos simples. Para la ejecución del ensayo de flexión se emplea la norma ASTM D7264/D7264M-07, prevista para materiales compuestos, al caracterizar dicho material mediante el ensayo de flexión se pueden determinar las siguientes propiedades: [18]

- Deflexión: Desplazamiento máximo vertical que soporta la probeta antes de su fractura.
- Esfuerzo máximo de flexión: Esfuerzo máximo producido en la superficie exterior correspondiente a la fuerza máxima aplicada antes de la falla.
- Módulo de elasticidad secante de flexión: Es la relación entre el esfuerzo y la deflexión en un punto dentro de la región elástica de la curva esfuerzo deflexión.

- Deformación máxima.

### **2.1.7.3 ENSAYOS DE IMPACTO**

El ensayo de impacto mediante caída de dardo determina la energía media de fallo en la cual la probeta presente fisuras tras dejar caer un dardo sobre la misma. Para la ejecución del ensayo de impacto se emplea la norma ASTM D5628-10, prevista para materiales compuestos, al caracterizar dicho material mediante el ensayo de impacto se pueden determinar las siguientes propiedades: [18]

- Energía media de fallo

## **2.2 HIPÓTESIS**

El análisis estadístico del material híbrido con fibra de vidrio y abacá en matriz polimérica de resina poliéster permitirá la optimización de propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto.

## **2.3 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS**

### **2.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE**

Análisis estadístico del material híbrido con fibra de vidrio y abacá en matriz polimérica de resina poliéster.

### **2.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE**

Optimización de propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto.

### **2.3.3 TÉRMINO DE RELACIÓN**

Permitirá

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN**

##### **3.1.1 INVESTIGACIÓN TEÓRICA**

Se aplica este tipo de investigación ya a que se genera información enmarcada en una metodología aplicable a datos afines, contiene información extensa y desarrollada para procesos de análisis, desde la recolección de los datos hasta la conclusión objetiva de una hipótesis.

##### **3.1.2 INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA**

Se establece este tipo de investigación debido a que se efectúa una representación completa de parámetros dentro de cada una de las propiedades, además se estiman características de las poblaciones, necesarias para un análisis completo de respuestas y factores de entrada.

##### **3.1.3 INVESTIGACIÓN EXPLICATIVA**

Se trata una investigación explicativa ya que no es suficiente entender los parámetros y características tratadas, sino que se busca la relación de los mismos con las respuestas y es tipo de análisis, respectivamente.

##### **3.1.4 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL**

Se emplea la investigación experimental ya que se aplica diseños en los que se manipulan una o varias variables independientes, en los mismos se miden los efectos de la variable independiente sobre la variable de respuesta. En esta investigación se plantea una situación experimental que se propone validar.

## 3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

### 3.2.1 POBLACIÓN

El presente trabajo experimental tiene como población todas las probetas elaboradas de material híbrido de tejido de abacá (FAB) y algodón (FAI) más fibra de vidrio (FV), combinado con una matriz polimérica de resina poliéster, elaboradas bajo las condiciones descritas en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Descripción de las condiciones de los niveles de cada factor.

<b>Configuración</b>		
<b>Niveles</b>		<b>Descripción</b>
1	Caso 1	20% FV + 7.75% FAB (0°) + 2.25% FAI (90°)
2	Caso 2	10% FV + 17.75% FAB (0°) + 2.25% FAI (90°)
3	Caso 3	20% FV + 7.75% FAB (45°) + 2.25% FAI (135°)
4	Caso 4	10% FV + 17.75% FAB (45°) + 2.25% FAI (135°)
5	Caso 5	23.25% FAB (0°, 45°, 135°) + 6.75% FAI (90°, 135°, 225°)
6	Caso 6	10% FV + 20% F. Larga Abacá
7	Caso 7	10% FV + 20% F. Corta Abacá
<b>Tipo de Secado</b>		
<b>Niveles</b>		<b>Descripción</b>
1	Ambiente	Curado al ambiente a una temperatura de 18 °C a 21°C
2	Horno	Curado en horno secador infrarrojo a una temperatura de 80 °C por un tiempo de 24 horas

Fuente: Autor

### 3.2.2 MUESTRA

La muestra que se estima para la aplicación del diseño experimental parte de un diseño factorial completo en el que se describen 14 tratamientos que proceden de la combinación de los factores configuración y tipo de secado.

Las réplicas para el estudio se detallan en la Tabla 3.2, en donde para las propiedades mecánicas a tracción y flexión se dispone de 5 réplicas, mientras que para la propiedad mecánica a impacto se cuenta con una réplica debido a la naturaleza del ensayo; en total se analizan 504 datos.

**Tabla 3.2** Réplicas de los tratamientos para cada propiedad mecánica a analizar.

Factores		Ensayos								
Configuración	Tipo de Secado	Tracción			Flexión			Impacto		
Caso 1	Ambiente	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 2	Ambiente	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 3	Ambiente	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 4	Ambiente	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 5	Ambiente	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 6	Ambiente	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 7	Ambiente	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 1	Horno	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 2	Horno	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 3	Horno	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 4	Horno	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 5	Horno	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 6	Horno	5	5	5	5	5	5	5	1	36
Caso 7	Horno	5	5	5	5	5	5	5	1	36
<b>Total de datos</b>										504

Fuente: Autor

### 3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

#### 3.4.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Análisis estadístico del material híbrido con fibra de vidrio y abacá en matriz polimérica de resina poliéster.

**Tabla 3.3** Variable independiente.

Concepto	Categoría	Indicador	Ítem	Herramienta
Forma más eficaz de hacer pruebas, para responder las interrogantes planteadas	Análisis estadístico	Diseño de experimentos y optimización	Diseño completamente al azar	Observación
			Diseño en bloques completos al azar	
			Diseño factorial	Software estadístico
			Función de deseabilidad	
Aquel que utiliza más de un tipo de material de refuerzo. Puede formarse utilizando una combinación entre fibras sintéticas y fibras naturales	Material híbrido	Configuración del material	20% FV + 7.75% FAb (0°) + 2.25% FAI (90°)	Observación directa
			10% FV + 17.75% FAb (0°) + 2.25% FAI (90°)	
			20% FV + 7.75% FAb (45°) + 2.25% FAI (135°)	
			10% FV + 17.75% FAb (45°) + 2.25% FAI (135°)	Fichas de datos
			23.25% FAb (0°, 45°, 135°) + 6.75% FAI (90°, 135°, 225°)	
			10% FV + 20% F. Larga Abacá	Bibliografía
			10% FV + 20% F. Corta Abacá	
	Tipo de secado		Secado al ambiente	Normas ASTM
			Secado al horno	

**Fuente:** Autor

### 3.4.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Optimización de propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto.

**Tabla 3.4** Variable dependiente

Concepto	Categoría	Indicador	Ítem	Herramienta
Describe el comportamiento de un material al aplicarle fuerzas y evaluarlo mediante una norma específica	Propiedades mecánicas a tracción	Esfuerzo Máximo de Tracción	22,139 – 77,15 MPa	Observación
		Módulo de elasticidad	560,478 – 2459,88 MPa	
		Porcentaje de elongación	2,374 – 4,94 %	
	Propiedades mecánicas a flexión	Deflexión	4,752 – 17,511 mm	Ficha de datos
		Esfuerzo máximo de flexión	15,70 – 174,928 MPa	Bibliografía
		Módulo de elasticidad secante de flexión	706,41 – 17547,24 MPa	
		Deformación máxima	0,934 – 2,922 %	Normas ASTM
Propiedad mecánica a impacto	Energía media de fallo	1,3574 - 2.2624 J		
Forma más eficaz de hacer pruebas, para responder las interrogantes planteadas	Diseño de experimentos	Coefficientes de determinación	(0 – 100 %)	Observación
	Optimización de varias respuestas	Deseabilidad global	(0 - 1)	Software estadístico

**Fuente:** Autor



### 3.5 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

El plan de recolección de la información se detalla en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Plan de recolección de información.

<b>Plan de recolección de información</b>	
<b>¿Qué?</b>	Las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material híbrido de tejido de abacá (FAb) y algodón (FAI) más fibra de vidrio (FV), combinado con una matriz polimérica de resina poliéster.
<b>¿Para qué?</b>	Optimizar las propiedades mecánicas mediante la aplicación de una metodología estadística.
<b>¿Quién?</b>	La recolección de información es realizada por el investigador (Henry Erazo)
<b>¿A quién?</b>	Está dirigido a estudiantes y docentes que necesiten una base bibliográfica y un aporte consistente a proyectos que se ejecutan actualmente en la UTA-FICM.
<b>¿Cómo?</b>	Se recolecta la información mediante el aporte del proyecto de investigación del cual se deriva este trabajo experimental.
<b>¿Con qué?</b>	Para obtener la información se emplean hojas de cálculo, editor de texto y bibliografía.
<b>¿Cuándo?</b>	Se ejecuta en el año 2018
<b>¿Cuántas veces?</b>	En los ensayos a tracción y flexión se consiguen 5 datos (réplicas) por cada propiedad, mientras que en el ensayo de impacto se recaba 1 dato.
<b>¿Dónde?</b>	La recolección de información es realizada en la Universidad Técnica de Ambato.

**Fuente:** Autor

### 3.6 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

La información obtenida mediante el plan anteriormente detallado fue procesada y analizada de la manera siguiente:

### **3.6.1 REVISIÓN**

La información adquirida con el plan de recolección fue revisada para corroborar que se mantengan constantes las réplicas en los diferentes niveles de cada factor.

### **3.6.2 TABULACIÓN**

Los datos obtenidos se organizan y ubican de manera estratégica de acuerdo a la matriz de diseño planteada para la aplicación del diseño experimental.

### **3.6.3 ANÁLISIS**

Se realizan las distintas pruebas estadísticas para analizar la información recolectada con el objetivo de optimizar las propiedades mecánicas.

### **3.6.4 PRESENTACIÓN**

La información se dispone en gráficos y tablas con el fin de entender el comportamiento de los factores de entrada en las respuestas de salida.

### **3.6.5 INTERPRETACIÓN**

En términos generales se persigue saber si con la metodología aplicada existe un caso que optimice las propiedades, esto se interpreta contrastando el valor de la significancia calculada con el de la significancia predefinida.

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

El arreglo factorial de las combinaciones del experimento de acuerdo a los niveles tratados se detallan en las Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3, para cada una de las propiedades mecánicas a analizar. En dichas tablas se especifican cada una de las réplicas efectuadas para el posterior análisis.

**Tabla 4.1** Resultados del ensayo de tracción.

Factores		Propiedades Mecánicas a Tracción		
Configuración	Tipo de Secado	Esfuerzo Máximo de Tracción [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Elongación [%]
Caso 1	Ambiente	87.92	2109.46	4.17
Caso 1	Ambiente	76.23	1943.51	3.92
Caso 1	Ambiente	74.07	2044.55	3.62
Caso 1	Ambiente	76.05	1799.77	4.23
Caso 1	Ambiente	71.38	1761.36	4.05
Caso 2	Ambiente	52.91	1651.89	3.20
Caso 2	Ambiente	53.87	1504.06	3.58
Caso 2	Ambiente	68.43	2519.46	2.72
Caso 2	Ambiente	62.03	1899.84	3.27
Caso 2	Ambiente	57.81	1721.97	3.36
Caso 3	Ambiente	55.00	1740.36	3.16
Caso 3	Ambiente	57.24	1859.61	3.08
Caso 3	Ambiente	53.89	1514.57	3.56

Caso 3	Ambiente	51.88	2229.00	2.33
Caso 3	Ambiente	56.8	1657.91	3.43
Caso 4	Ambiente	41.13	2025.78	2.03
Caso 4	Ambiente	46.20	1744.45	2.65
Caso 4	Ambiente	43.05	1404.62	3.06
Caso 4	Ambiente	44.01	1450.92	3.03
Caso 4	Ambiente	48.54	1789.17	2.71
Caso 5	Ambiente	57.39	1740.84	3.30
Caso 5	Ambiente	56.55	1801.00	3.14
Caso 5	Ambiente	57.44	1604.76	3.58
Caso 5	Ambiente	51.85	1489.66	3.48
Caso 5	Ambiente	61.68	1842.05	3.35
Caso 6	Ambiente	55.57	1740.95	3.19
Caso 6	Ambiente	81.00	2627.51	3.08
Caso 6	Ambiente	68.58	2302.3	2.98
Caso 6	Ambiente	70.59	2283.87	3.09
Caso 6	Ambiente	81.18	3344.77	2.43
Caso 7	Ambiente	38.03	1511.49	2.52
Caso 7	Ambiente	34.75	1717.46	2.02
Caso 7	Ambiente	33.83	1440.92	2.35
Caso 7	Ambiente	30.57	1347.12	2.27
Caso 7	Ambiente	40.10	1479.62	2.71
Caso 1	Horno	66.42	1573.65	4.22
Caso 1	Horno	69.35	1654.28	4.19
Caso 1	Horno	68.04	1667.72	4.08
Caso 1	Horno	67.56	1741.91	3.88
Caso 1	Horno	67.18	1683.10	3.99
Caso 2	Horno	56.38	1291.09	4.37
Caso 2	Horno	69.21	1422.02	4.87
Caso 2	Horno	69.82	1333.20	5.24

Caso 2	Horno	68.58	1270.78	5.40
Caso 2	Horno	60.66	1258.97	4.82
Caso 3	Horno	55.76	1938.1	2.88
Caso 3	Horno	75.30	1884.04	4.00
Caso 3	Horno	70.30	1781.82	3.95
Caso 3	Horno	70.97	1672.94	4.24
Caso 3	Horno	62.21	1626.06	3.83
Caso 4	Horno	34.35	1159.25	2.96
Caso 4	Horno	27.57	940.97	2.93
Caso 4	Horno	29.00	942.90	3.08
Caso 4	Horno	30.31	1607.87	1.89
Caso 4	Horno	31.63	983.57	3.22
Caso 5	Horno	21.79	586.78	3.71
Caso 5	Horno	26.26	706.07	3.72
Caso 5	Horno	19.38	458.48	4.23
Caso 5	Horno	19.61	475.72	4.12
Caso 5	Horno	23.58	575.34	4.10
Caso 6	Horno	53.06	1476.64	3.59
Caso 6	Horno	62.92	1623.41	3.88
Caso 6	Horno	50.08	1395.45	3.59
Caso 6	Horno	55.24	1502.67	3.68
Caso 6	Horno	54.46	1470.95	3.71
Caso 7	Horno	28.12	923.07	3.05
Caso 7	Horno	35.13	1045.89	3.36
Caso 7	Horno	28.89	1039.57	2.78
Caso 7	Horno	35.31	957.83	3.69
Caso 7	Horno	30.32	952.87	3.18

Fuente: Autor

**Tabla 4.2** Resultados del ensayo de flexión.

Factores		Propiedades Mecánicas a Flexión			
Configuración	Tipo de Secado	Deflexión [mm]	Esfuerzo Máximo de Flexión [MPa]	Módulo de Elasticidad Secante de Flexión [MPa]	Deformación Máxima [%]
Caso 1	Ambiente	12.938	97.37	3919.70	2.48
Caso 1	Ambiente	9.199	111.56	6782.67	1.64
Caso 1	Ambiente	9.329	78.08	4386.47	1.78
Caso 1	Ambiente	10.857	123.83	6623.28	1.87
Caso 1	Ambiente	13.182	101.91	4505.41	2.26
Caso 2	Ambiente	13.093	74.11	3083.14	2.40
Caso 2	Ambiente	17.952	79.49	2510.19	3.17
Caso 2	Ambiente	14.076	81.70	3290.26	2.48
Caso 2	Ambiente	14.323	69.09	2881.75	2.40
Caso 2	Ambiente	16.608	80.41	2851.36	2.82
Caso 3	Ambiente	7.298	78.40	5250.74	1.49
Caso 3	Ambiente	7.901	87.30	5384.69	1.62
Caso 3	Ambiente	9.875	105.73	5263.92	2.01
Caso 3	Ambiente	10.359	104.46	4899.71	2.13
Caso 3	Ambiente	9.152	100.25	5465.87	1.83
Caso 4	Ambiente	17.492	71.77	2868.54	3.13
Caso 4	Ambiente	16.619	72.38	2965.35	3.05
Caso 4	Ambiente	11.506	67.48	3891.38	2.17
Caso 4	Ambiente	15.538	73.76	3445.69	2.68
Caso 4	Ambiente	15.428	71.47	3316.45	2.69
Caso 5	Ambiente	13.627	36.47	1425.04	2.56
Caso 5	Ambiente	16.749	40.38	1283.86	3.15
Caso 5	Ambiente	15.885	51.62	1769.97	2.92

Caso 5	Ambiente	16.081	44.67	1517.90	2.94
Caso 5	Ambiente	15.213	41.91	1378.80	3.04
Caso 6	Ambiente	9.521	95.36	5473.06	1.74
Caso 6	Ambiente	9.68	82.69	4519.77	1.83
Caso 6	Ambiente	12.085	96.47	4305.54	2.24
Caso 6	Ambiente	14.954	68.91	2341.36	2.94
Caso 6	Ambiente	9.875	89.20	4903.83	1.82
Caso 7	Ambiente	4.125	17.88	2150.53	0.83
Caso 7	Ambiente	5.894	39.91	3378.59	1.18
Caso 7	Ambiente	4.739	25.05	2752.56	0.91
Caso 7	Ambiente	3.745	28.57	3973.68	0.72
Caso 7	Ambiente	5.255	30.62	2961.19	1.03
Caso 1	Horno	3.659	93.46	15790.94	0.74
Caso 1	Horno	5.451	121.50	13903.69	1.09
Caso 1	Horno	4.932	122.60	15598.66	0.98
Caso 1	Horno	6.681	140.92	12849.15	1.37
Caso 1	Horno	5.528	159.34	18033.59	1.1
Caso 2	Horno	11.162	114.93	6875.35	2.09
Caso 2	Horno	12.613	138.27	7488.24	2.31
Caso 2	Horno	9.794	127.83	9608.41	1.66
Caso 2	Horno	13.108	141.35	7747.00	2.28
Caso 2	Horno	12.506	123.71	6542.57	2.36
Caso 3	Horno	6.539	159.79	16316.76	1.22
Caso 3	Horno	7.489	188.56	16392.21	1.44
Caso 3	Horno	5.525	160.69	18361.16	1.09
Caso 3	Horno	7.144	205.28	20156.01	1.27
Caso 3	Horno	6.048	161.98	16806.14	1.20
Caso 4	Horno	12.045	153.93	9860.62	1.95
Caso 4	Horno	10.954	102.91	6590.05	1.95
Caso 4	Horno	8.472	98.65	8279.60	1.49

Caso 4	Horno	8.491	113.18	10025.15	1.41
Caso 4	Horno	9.964	116.19	8524.32	1.70
Caso 5	Horno	12.411	21.47	844.22	3.18
Caso 5	Horno	10.59	16.86	906.28	2.33
Caso 5	Horno	10.532	12.26	634.73	2.41
Caso 5	Horno	13.105	17.43	731.22	2.98
Caso 5	Horno	11.378	11.25	495.37	2.84
Caso 6	Horno	8.414	139.52	9569.70	1.82
Caso 6	Horno	5.813	99.78	10073.00	1.24
Caso 6	Horno	5.99	178.15	17163.74	1.30
Caso 6	Horno	3.861	70.59	10852.29	0.81
Caso 6	Horno	8.802	167.80	11646.72	1.80
Caso 7	Horno	4.802	46.82	5786.69	1.01
Caso 7	Horno	6.944	99.66	9614.12	1.30
Caso 7	Horno	5.849	101.28	11751.13	1.08
Caso 7	Horno	7.054	89.78	8286.57	1.35
Caso 7	Horno	8.531	118.79	9009.25	1.65

Fuente: Autor

**Tabla 4.3** Resultados del ensayo de impacto.

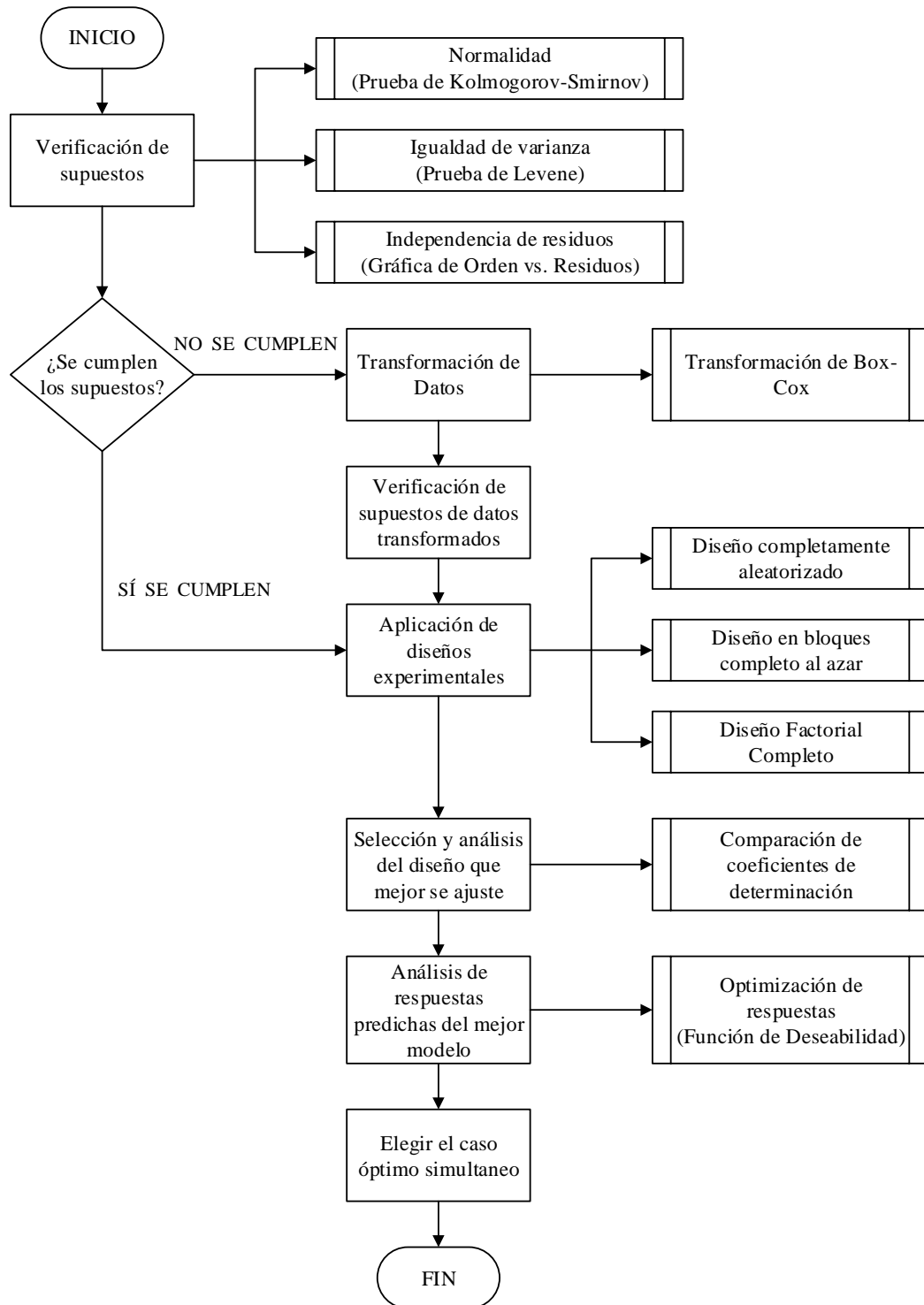
<b>Factores</b>		<b>Propiedad Mecánica a Impacto</b>
<b>Configuración</b>	<b>Tipo de Secado</b>	<b>Energía Media de Fallo [J]</b>
Caso 1	Ambiente	2.2624
Caso 2	Ambiente	1.9230
Caso 3	Ambiente	2.2624
Caso 4	Ambiente	2.0362
Caso 5	Ambiente	1.5837
Caso 6	Ambiente	2.2624
Caso 7	Ambiente	1.8099



Caso 1	Horno	2.2624
Caso 2	Horno	1.9230
Caso 3	Horno	2.1493
Caso 4	Horno	1.6968
Caso 5	Horno	1.3574
Caso 6	Horno	1.9230
Caso 7	Horno	2.2624

**Fuente:** Autor

## 4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS



**Figura 4.1** Diagrama de flujo del análisis de los resultados.

**Fuente:** Autor

De acuerdo al diagrama de flujo planteado en la Figura 4.1, se realiza el análisis pertinente a cada una de las propiedades mecánicas de interés del híbrido en estudio. Estos análisis se detallan a continuación:

#### 4.2.1 ANÁLISIS DEL ESFUERZO MÁXIMO DE TRACCIÓN

##### 4.2.1.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

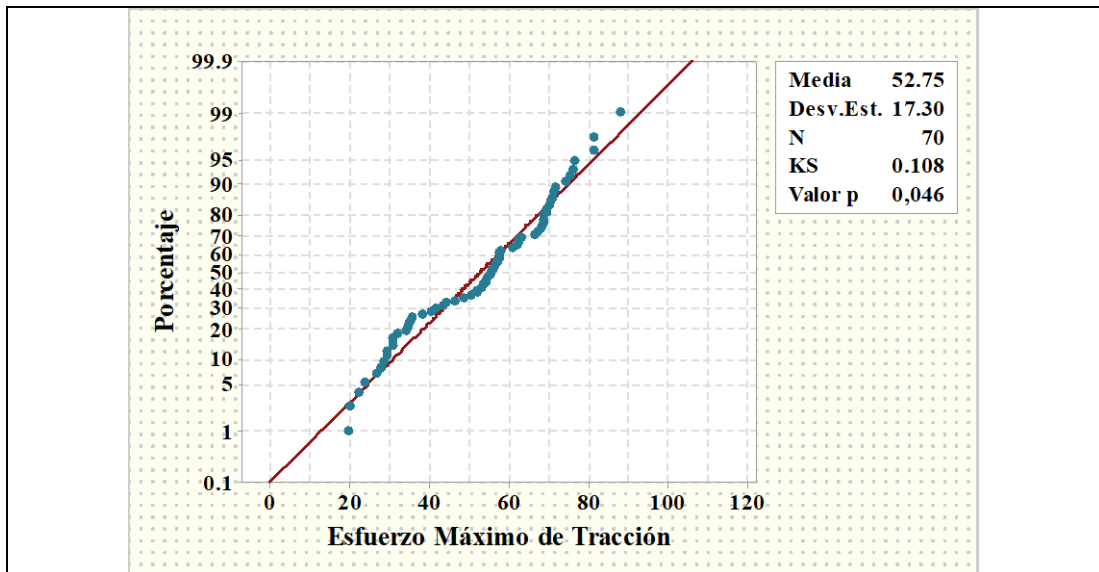
Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

##### Prueba de normalidad

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad de los datos del esfuerzo máximo de tracción. El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.4, aclara que los datos originales no cumplen con el supuesto de normalidad, siendo estrictos no aceptando aproximaciones ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este de 0.046; por lo que se requiere transformar los datos para su verificación y posterior análisis.

**Tabla 4.4** Verificación del supuesto de normalidad del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : El esfuerzo máximo de tracción tiene distribución normal.		
	$H_1$ : El esfuerzo máximo de tracción no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



<b>Estadístico de prueba:</b> Kolmogorov – Smirnov = 0.108		<b>Valor-p</b> = 0.046
<b>Decisión:</b>	Se rechaza la hipótesis nula.	
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los datos del esfuerzo máximo de tracción <b>no tienen distribución normal.</b>	
<b>Nota:</b>	Los datos requieren transformación por falta de normalidad.	

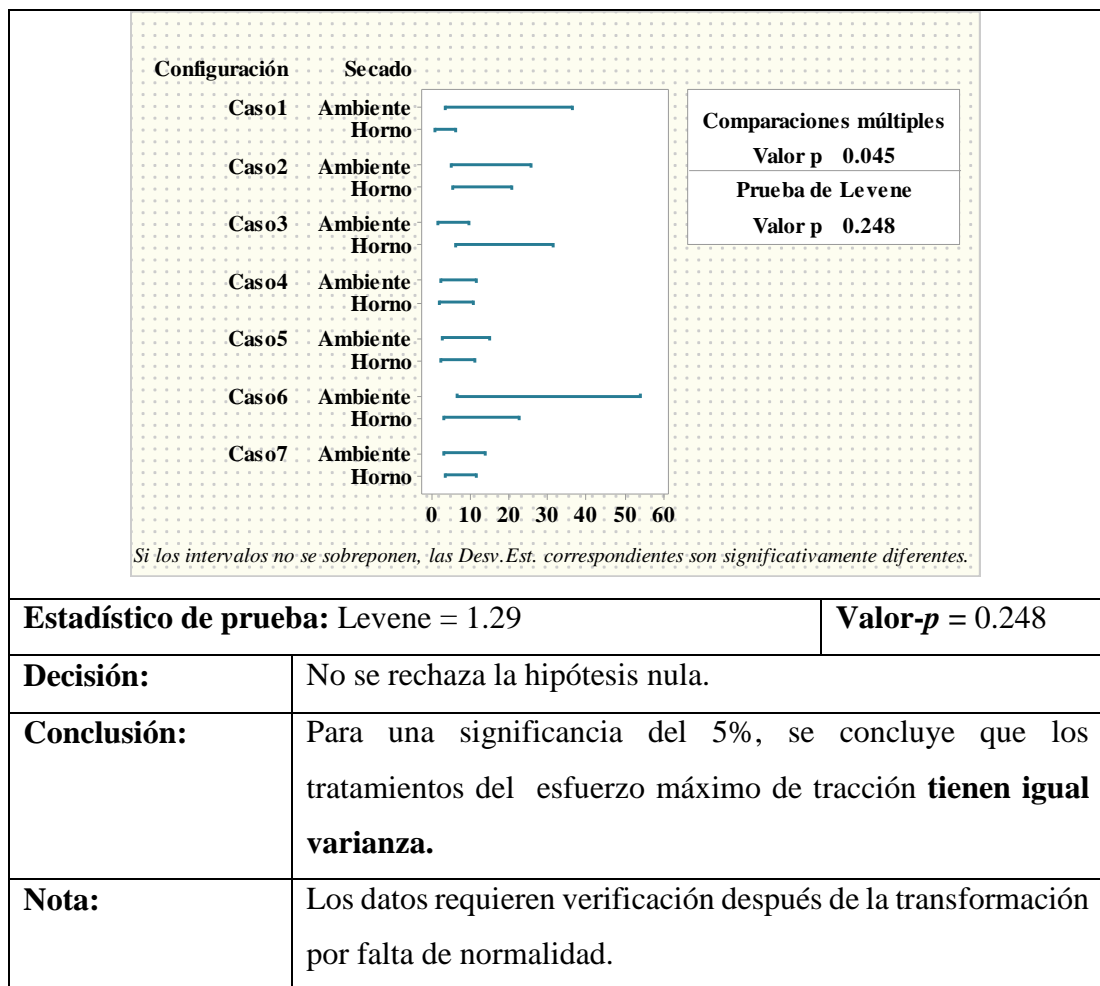
Fuente: Autor

### Prueba de igualdad de varianza

Para la verificación del supuesto de igualdad de varianza de los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción, empleamos la prueba de Levene.

**Tabla 4.5** Verificación del supuesto de igualdad de varianza del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción no tienen igual varianza.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$

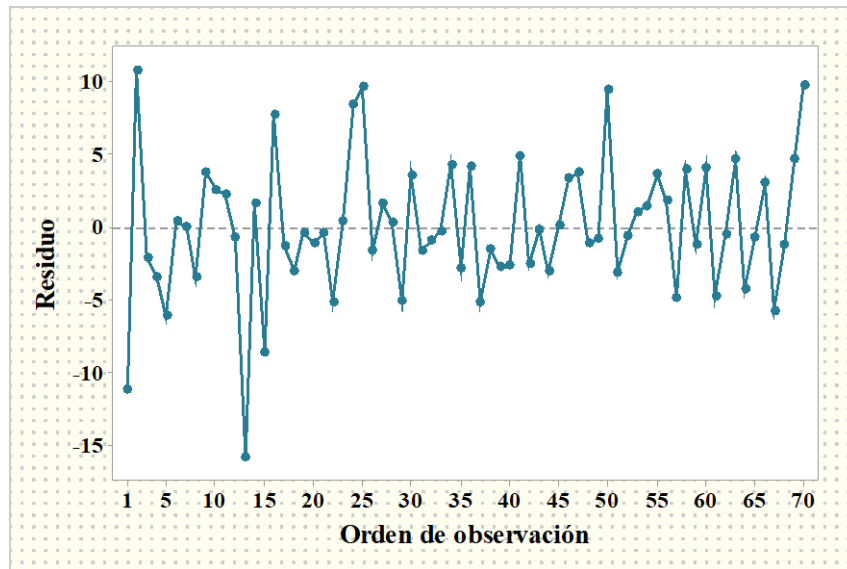


Fuente: Autor

Tras aplicar la prueba se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.5, se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.248 y 0.05, respectivamente.

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos del esfuerzo máximo de tracción, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.2, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia de los residuos de esta propiedad.



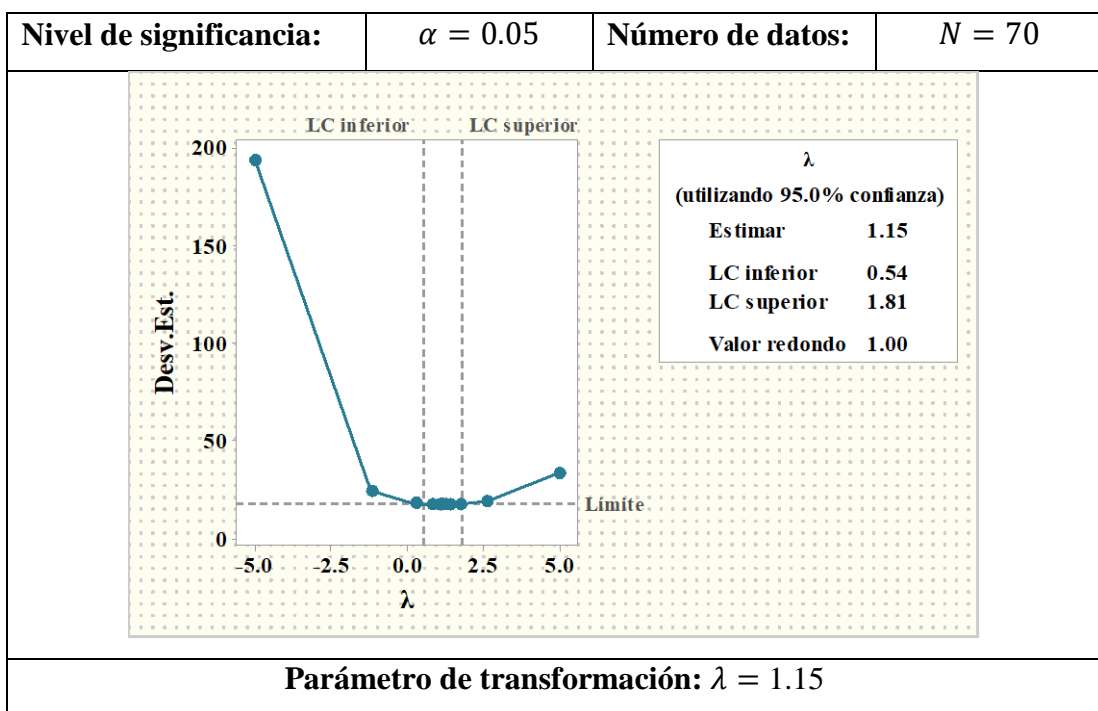
**Figura 4.2** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del esfuerzo máximo de tracción.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

#### 4.2.1.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS

Debido a la falta de normalidad, los datos requieren ser transformados.

**Tabla 4.6** Transformación de Box-Cox del esfuerzo máximo de tracción.



**Fuente:** Autor

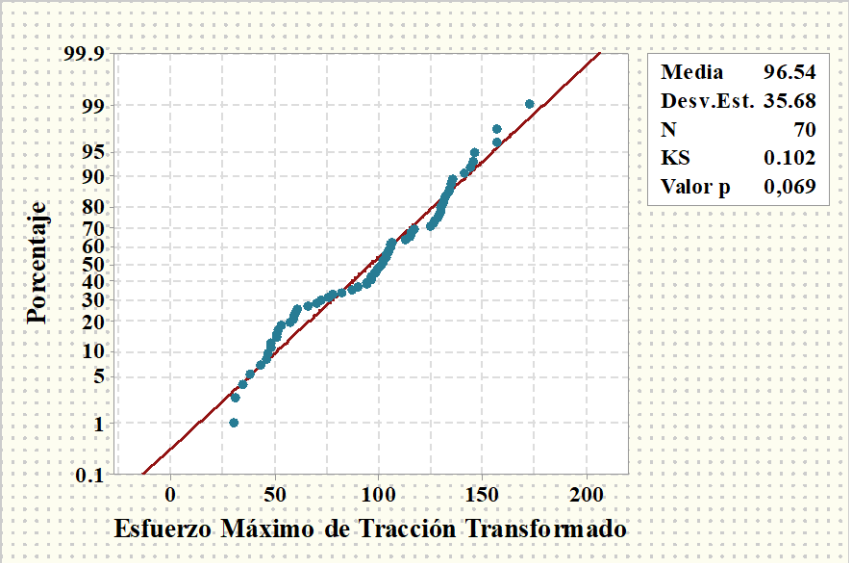
Se especifica el parámetro de transformación  $\lambda$  descrito en la Tabla 4.6 a ser empleado para dicha transformación.

### 4.2.1.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS

#### Prueba de normalidad

Para verificar el supuesto de normalidad, se aplica nuevamente la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, esta vez en los datos transformados del esfuerzo máximo de tracción.

**Tabla 4.7** Verificación del supuesto de normalidad de datos transformados del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : El esfuerzo máximo de tracción tiene distribución normal.		
	$H_1$ : El esfuerzo máximo de tracción no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
			
<b>Estadístico de prueba:</b> Kolmogorov – Smirnov = 0.102			<b>Valor-p</b> = 0.069
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		

<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los datos transformados del esfuerzo máximo de tracción <b>tienen distribución normal.</b>
--------------------	---

Fuente: Autor

El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.7, aclara que los datos transformados cumplen con el supuesto de normalidad, ya que se requerir un valor- $p$  mayor o igual a 0.05 para no rechazar  $H_0$ , en este caso el valor- $p$  es de 0.069.

### Prueba de igualdad de varianza

Para verificar el supuesto de igualdad de varianza en los tratamientos de los datos transformados del esfuerzo máximo de tracción, empleamos la prueba de Levene,

**Tabla 4.8** Verificación del supuesto de igualdad de varianza de datos transformados del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción no tienen igual varianza.		
<b>Significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$

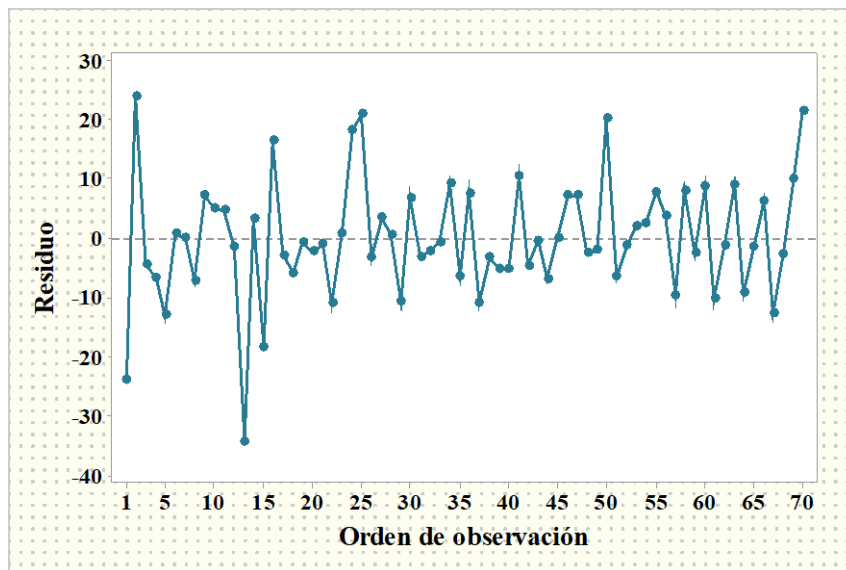


<b>Estadístico de prueba:</b> Levene = 1.40		<b>Valor-<i>p</i></b> = 0.189
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.	
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los tratamientos de los datos transformados del esfuerzo máximo de tracción <b>tienen igual varianza.</b>	

Fuente: Autor

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos de los datos transformados del esfuerzo máximo de tracción, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.3, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia de residuos.



**Figura 4.3** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de datos transformados del esfuerzo máximo de tracción.

Fuente: Minitab® Statistical Software

#### 4.2.1.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores

planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

### Diseño completamente aleatorizado

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación del esfuerzo máximo de tracción la configuración del material y el error aleatorio.

**Tabla 4.9** ANOVA para el DCA del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	60727.26	6	10121.21	23.51	0.000
Error	27118.92	63	430.46		
Total	87846.18	69			

Fuente: Autor

En el análisis de varianza en la Tabla 4.9 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos. Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.9, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, además de este estadístico también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste, los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
69.13 %	66.19 %

Fuente: Autor

### Diseño en bloques completos al azar

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal

a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los factores anteriormente mencionados. El análisis de varianza de este diseño del esfuerzo máximo de tracción se especifica en la Tabla 4.11.

**Tabla 4.11** ANOVA para el DBCA del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	60727.26	6	10121.21	28.78	0.000
Tipo de Secado	5317.12	1	5317.12	15.12	0.000
Error	21801.80	62	351.64		
Total	87846.18	69			

**Fuente:** Autor

Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ambos factores influyen significativamente en esta propiedad, también se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
75.18 %	72.38 %

**Fuente:** Autor

### **Diseño Factorial Completo**

Al aplicar este diseño experimental se tiene presente que se requiere igual interés en ambos factores a analizar: la configuración y el tipo de secado, dentro del mismo también se incluye el efecto asociado a la interacción de los factores anteriormente mencionado, por lo que dependiendo de los resultados del ANOVA se establece si este contribuye significativamente o no al esfuerzo máximo de tracción.

**Tabla 4.13** ANOVA para el Diseño factorial completo del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor-p</b>
Modelo	80940.69	13	6226.21	50.49	0.000
Configuración	60727.26	6	10121.21	82.08	0.000
Tipo de Secado	5317.12	1	5317.12	43.12	0.000
Conf. * Secado	14896.31	6	2482.72	20.13	0.000
Error	6905.49	56	123.31		
Total	87846.18	69			

**Fuente:** Autor

De acuerdo a la Tabla 4.13 se puede entender que los efectos de los factores configuración, tipo de secado y la interacción de estos factores, son significativos; además se deduce que existen diferencias significativas en los tratamientos planteados.

**Tabla 4.14** Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del esfuerzo máximo de tracción.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
92.14 %	90.31 %

**Fuente:** Autor

En la Tabla 4.14 se describen los coeficientes de determinación para el Diseño Factorial Completo, notamos que presenta un ajuste mucho mejor que modelos anteriormente analizados.

#### **4.2.1.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE**

##### **Comparación de coeficientes de determinación**

Para seleccionar el modelo y así el diseño que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.15.

**Tabla 4.15** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al esfuerzo máximo de tracción.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
$R^2$	69.13 %	75.18 %	92.14 %
$R^2_{aj}$	66.19 %	72.38 %	90.31 %

Fuente: Autor

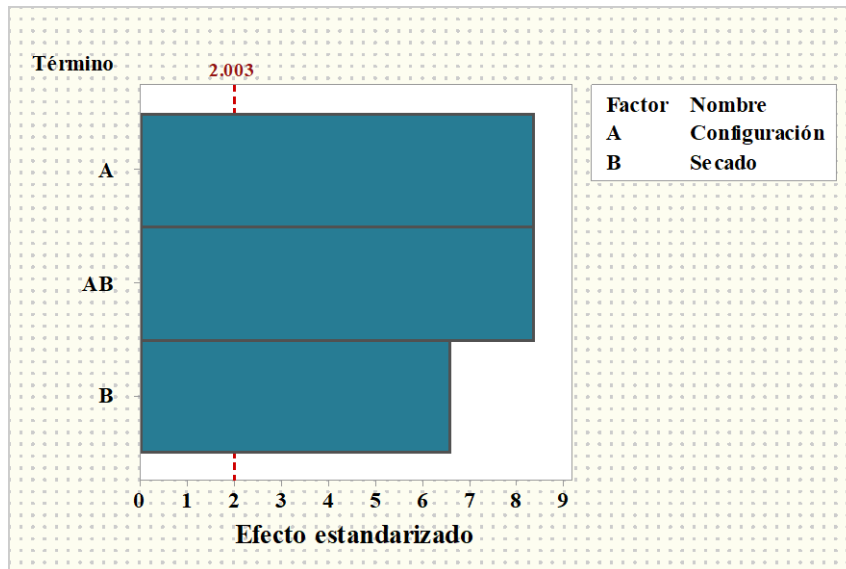
Es claramente apreciable que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica el 92.14% de la variabilidad del esfuerzo máximo de tracción, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

#### **Resultados del análisis del diseño factorial del esfuerzo máximo de tracción.**

Para representar los efectos que influyen en el esfuerzo máximo de tracción, estos se muestran en la Figura 4.4, esta ilustración detalla que los efectos del factor A, que corresponde a la configuración y los efectos de la interacción AB, correspondiente a la interacción entre la configuración y el tipo de secado, son estadísticamente significativos en esta propiedad.

De igual manera los efectos del factor B, correspondiente al tipo de secado, también son significativos aunque más pequeños que los dos efectos anteriormente mencionados.

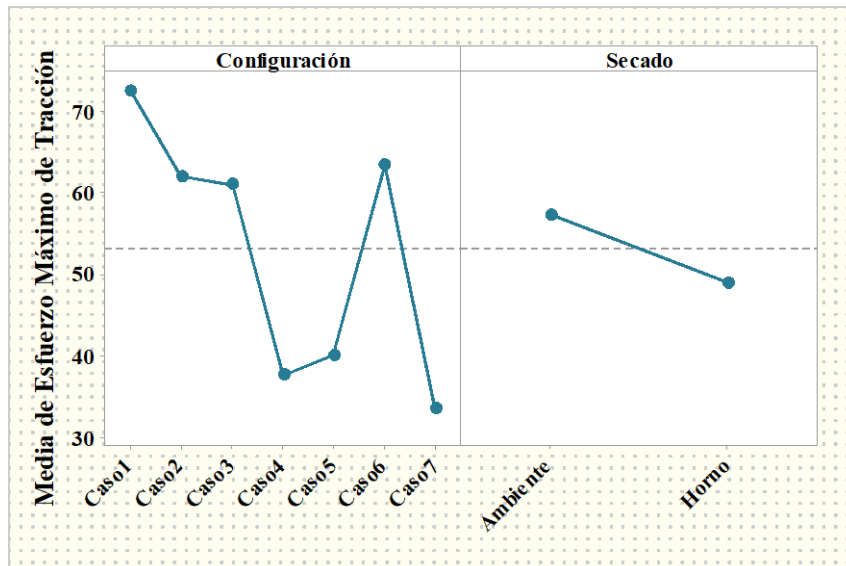
Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.13, se puede concluir claramente que se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia suficiente en los datos.



**Figura 4.4** Diagrama de Pareto de los efectos para el esfuerzo máximo de tracción.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.5 en la que se puede corroborar que predomina de manera evidente entre la mayoría de niveles la influencia de los efectos de la configuración sobre el esfuerzo máximo de tracción.

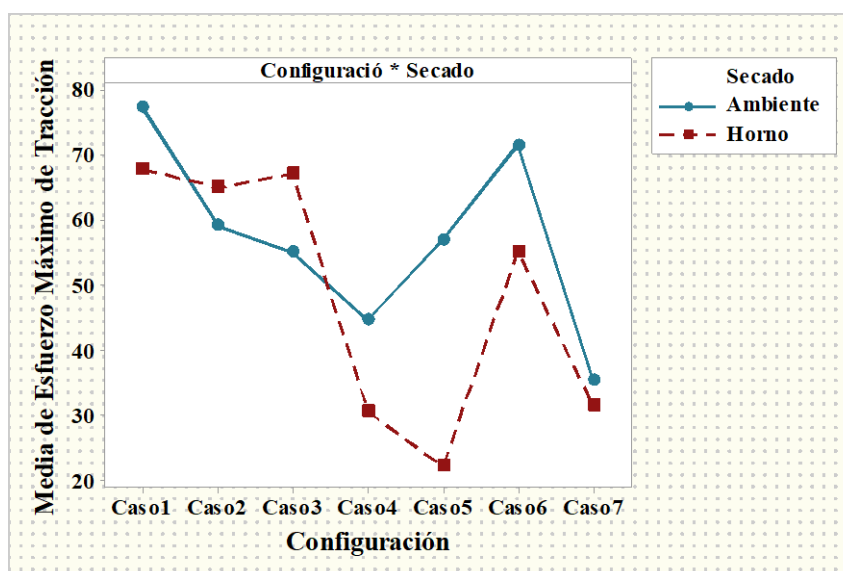


**Figura 4.5** Gráfica de efectos principales para el esfuerzo máximo de tracción.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

De la misma forma representamos la interacción de los efectos en la Figura 4.6, donde notamos una marcada diferencia entre las pendientes de cada par de líneas entre la mayoría de niveles de la configuración, por lo que se confirma que existe interacción entre los factores configuración y tipo de secado.

Haciendo un análisis más profundo a manera de ejemplo, se puede citar el Caso 1 y Caso 2, en donde para el secado al Horno el esfuerzo máximo de tracción disminuye ligeramente, por lo que existe una pequeña diferencia entre ambos casos, sin embargo para el secado al Ambiente la diferencia es más grande, ya que en el Caso 2 el esfuerzo es por mucho menor al del Caso 1, por ello es que se entiende que el factor tipo de secado influye determinantemente sobre el valor que el esfuerzo máximo de tracción tendrá en cada configuración.



**Figura 4.6** Gráfica de interacción para el esfuerzo máximo de tracción.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Debido a la conclusión del ANOVA del Diseño Factorial Completo del esfuerzo máximo de tracción, es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la deseabilidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

#### 4.2.1.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión factorial del Diseño Factorial Completo se estiman las respuestas predichas del esfuerzo máximo de tracción, las cuales son la herramienta clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.16.

**Tabla 4.16** Respuestas predichas del esfuerzo máximo de tracción.

Factores		Respuestas predichas [MPa]
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	77.161
Caso 2	Ambiente	59.051
Caso 3	Ambiente	54.967
Caso 4	Ambiente	44.597
Caso 5	Ambiente	56.995
Caso 6	Ambiente	71.480
Caso 7	Ambiente	35.479
Caso 1	Horno	67.711
Caso 2	Horno	64.964
Caso 3	Horno	66.964
Caso 4	Horno	30.585
Caso 5	Horno	22.146
Caso 6	Horno	55.176
Caso 7	Horno	31.576

Fuente: Autor

#### Cálculo de la deseabilidad individual

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{máx}$  e inferior  $y_{mín}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.17.



**Tabla 4.17** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del esfuerzo máximo de tracción.

Respuestas observadas		Respuestas predichas	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19.38 MPa	87.92 MPa	22.146 MPa	77.161 MPa

Fuente: Autor

Es así que se considera el valor del mínimo observado como la especificación inferior y el valor del máximo predicho como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es maximizar la respuesta de salida, empelando la ecuación 2.16, se calculan las deseabilidades individuales.

**Tabla 4.18** Deseabilidad individual del esfuerzo máximo de tracción.

Factores		$d_1$
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	1.0000
Caso 2	Ambiente	0.6866
Caso 3	Ambiente	0.6159
Caso 4	Ambiente	0.4364
Caso 5	Ambiente	0.6510
Caso 6	Ambiente	0.9017
Caso 7	Ambiente	0.2786
Caso 1	Horno	0.8365
Caso 2	Horno	0.7889
Caso 3	Horno	0.8235
Caso 4	Horno	0.1939
Caso 5	Horno	0.0479
Caso 6	Horno	0.6195
Caso 7	Horno	0.2111

Fuente: Autor

Las deseabilidades individuales se visualizan en la Tabla 4.18, con estos valores se puede estimar que la combinación óptima individual para el esfuerzo máximo de tracción es el Caso 1, secado al Ambiente.

## 4.2.2 ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

### 4.2.2.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

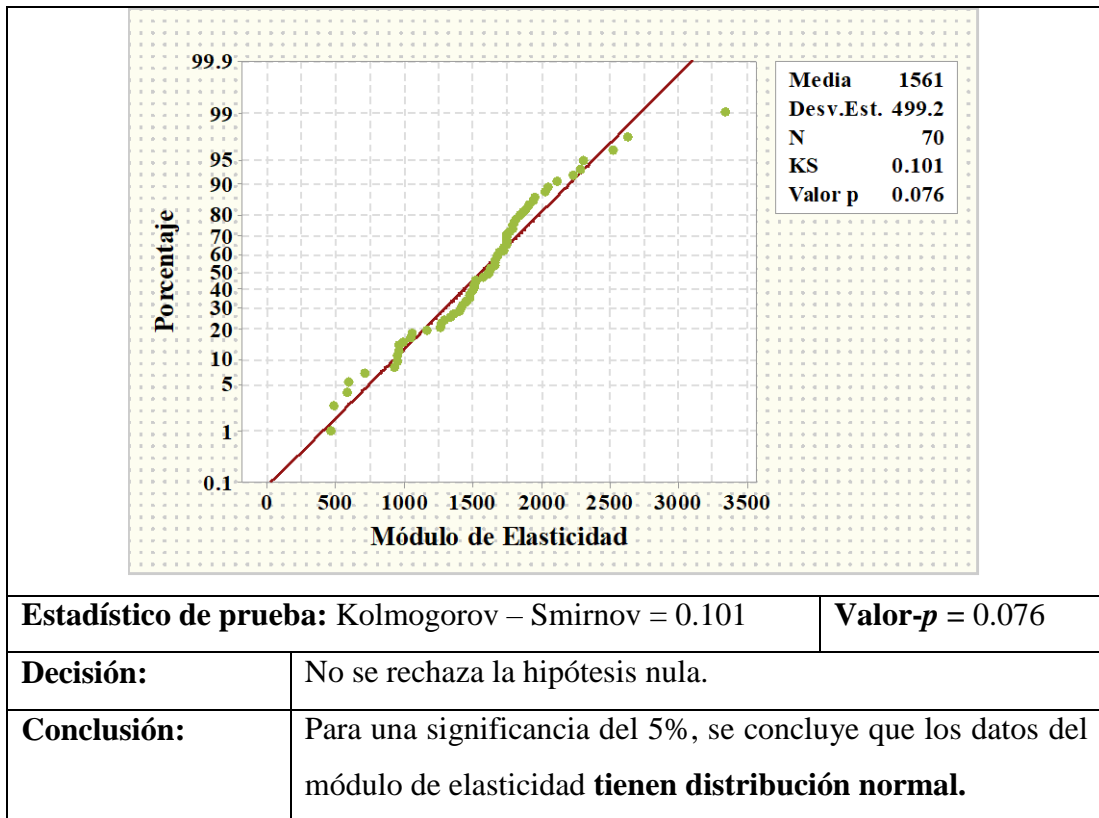
Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

#### Prueba de normalidad

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad en los datos del módulo de elasticidad. El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.19, aclara que los datos cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este de 0.076.

**Tabla 4.19** Verificación del supuesto de normalidad del módulo de elasticidad.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : El módulo de elasticidad tiene distribución normal.		
	$H_1$ : El módulo de elasticidad no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



Fuente: Autor

### Prueba de igualdad de varianza

Para la verificación del supuesto de igualdad de varianza en los tratamientos del módulo de elasticidad, empleamos la prueba de Levene, después de su aplicación, se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.20, se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.148 y 0.05, respectivamente.

**Tabla 4.20** Verificación del supuesto de igualdad de varianza del módulo de elasticidad.

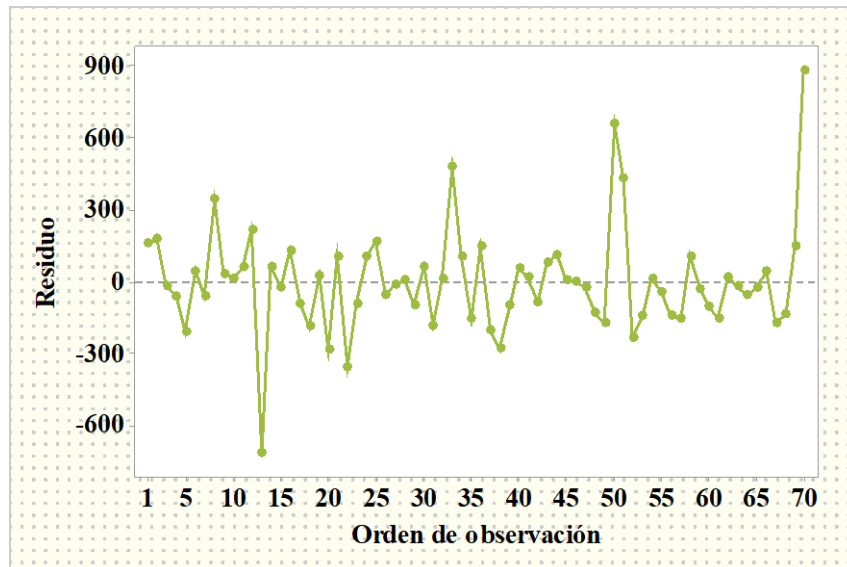
<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos del módulo de elasticidad tienen igual varianza.
	$H_1$ : Los tratamientos del módulo de elasticidad no tienen igual varianza.

<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$																								
<p>Configuración      Secado</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Caso</th> <th>Ambiente</th> <th>Horno</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Caso1</td> <td>~500</td> <td>~500</td> </tr> <tr> <td>Caso2</td> <td>~2500</td> <td>~500</td> </tr> <tr> <td>Caso3</td> <td>~1500</td> <td>~500</td> </tr> <tr> <td>Caso4</td> <td>~1000</td> <td>~2000</td> </tr> <tr> <td>Caso5</td> <td>~500</td> <td>~500</td> </tr> <tr> <td>Caso6</td> <td>~3000</td> <td>~500</td> </tr> <tr> <td>Caso7</td> <td>~1000</td> <td>~500</td> </tr> </tbody> </table> <p>0    1000    2000    3000</p> <p><i>Si los intervalos no se sobreponen, las Desv.Est. correspondientes son significativamente diferentes.</i></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p><b>Comparaciones múltiples</b> Valor p <b>0.034</b></p> <p><b>Prueba de Levene</b> Valor p <b>0.148</b></p> </div>				Caso	Ambiente	Horno	Caso1	~500	~500	Caso2	~2500	~500	Caso3	~1500	~500	Caso4	~1000	~2000	Caso5	~500	~500	Caso6	~3000	~500	Caso7	~1000	~500
Caso	Ambiente	Horno																									
Caso1	~500	~500																									
Caso2	~2500	~500																									
Caso3	~1500	~500																									
Caso4	~1000	~2000																									
Caso5	~500	~500																									
Caso6	~3000	~500																									
Caso7	~1000	~500																									
<b>Estadístico de prueba:</b> Levene = 1.50		<b>Valor-p</b> = 0.148																									
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.																										
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los tratamientos del módulo de elasticidad <b>tienen igual varianza.</b>																										

Fuente: Autor

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos del módulo de elasticidad, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.7, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia en los residuos de esta propiedad.



**Figura 4.7** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del módulo de elasticidad.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

#### **4.2.2.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS**

No se requiere transformar los datos del módulo de elasticidad ya que cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### **4.2.2.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS**

No se pueden verificar los supuestos en los datos transformados ya que no fue necesario transformar los datos originales pues cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### **4.2.2.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES**

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

### Diseño completamente aleatorizado

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación del módulo de elasticidad, la configuración del material y el error aleatorio, en el análisis de varianza en la Tabla 4.21 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos.

**Tabla 4.21** ANOVA para el DCA del módulo de elasticidad.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	5962120.86	6	993686.81	5.57	0.000
Error	11233305.98	63	178306.44		
Total	17195426.84	69			

Fuente: Autor

Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.21, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, además de este estadístico, también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste, los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.22.

**Tabla 4.22** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del módulo de elasticidad.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
34.67 %	28.45 %

Fuente: Autor

### Diseño en bloques completos al azar

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los

factores anteriormente mencionados. El análisis de varianza de este diseño del módulo de elasticidad se especifica en la Tabla 4.23.

**Tabla 4.23** ANOVA para el DBCA del módulo de elasticidad.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	5962120.86	6	993686.81	11.19	0.000
Tipo de Secado	5726635.24	1	5726635.24	64.48	0.000
Error	5506670.75	62	88817.27		
Total	17195426.84	69			

**Fuente:** Autor

Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ambos factores influyen significativamente en la respuesta, también se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.24.

**Tabla 4.24** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del módulo de elasticidad.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
67.98 %	64.36 %

**Fuente:** Autor

### **Diseño Factorial Completo**

Al aplicar este diseño experimental se tiene presente que se requiere igual interés en ambos factores a analizar: la configuración y el tipo de secado, dentro del mismo también se incluye el efecto asociado a la interacción de los factores anteriormente mencionado por lo que dependiendo de los resultados del ANOVA se establece si este contribuye significativamente o no al módulo de elasticidad.

**Tabla 4.25** ANOVA para el Diseño factorial completo del módulo de elasticidad.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Valor-p</b>
Modelo	13874691.12	13	1067283.93	18.00	0.000
Configuración	5962120.86	6	993686.81	16.76	0.000
Tipo de Secado	5726635.24	1	5726635.24	96.57	0.000
Conf. * Secado	2185935.02	6	364322.50	6.14	0.000
Error	3320735.72	56	59298.85		
Total	17195426.84	69			

**Fuente:** Autor

De acuerdo a la Tabla 4.25 se puede entender que los efectos de los factores configuración, tipo de secado y la interacción de estos factores, son significativamente importantes, además se deduce que los tratamientos planteados son significativamente diferentes.

**Tabla 4.26** Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del módulo de elasticidad.

<b>Coefficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coefficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
80.69 %	76.21 %

**Fuente:** Autor

En la Tabla 4.26 se describen los coeficientes de determinación para el Diseño Factorial Completo, notamos que presenta un ajuste mucho mejor para los datos del módulo de elasticidad que modelos anteriores.

#### **4.2.2.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE**

##### **Comparación de coeficientes de determinación**

Para seleccionar un diseño como el que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.27.



**Tabla 4.27** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al módulo de elasticidad.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
<b><math>R^2</math></b>	34.67 %	67.98 %	80.69 %
<b><math>R^2_{aj}</math></b>	28.45 %	64.36 %	76.21 %

Fuente: Autor

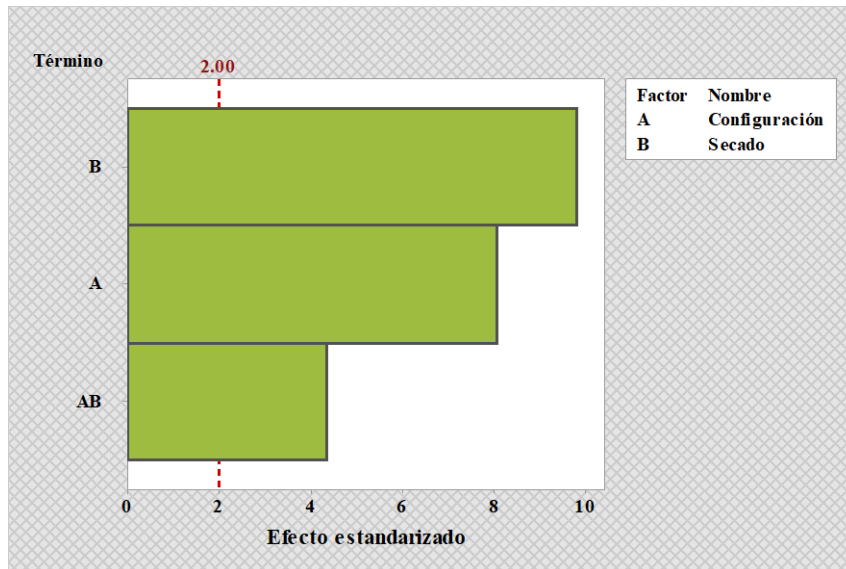
Es claramente apreciable que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica el 80.69% de la variabilidad del módulo de elasticidad, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

#### **Resultados del análisis del diseño factorial del módulo de elasticidad.**

Para representar los efectos que influyen en el módulo de elasticidad, estos se muestran en la Figura 4.8, esta ilustración detalla que son estadísticamente significativos los efectos del factor B, correspondiente al tipo de secado, llegando a ser los efectos más grandes sobre esta propiedad.

Seguido de los efectos del factor B, se encuentran los efectos del factor A, que corresponde a la configuración, luego de los mismos se encuentran los efectos de la interacción AB, correspondiente a la interacción entre la configuración y el tipo de secado; ambos son estadísticamente significativos sobre el módulo de elasticidad.

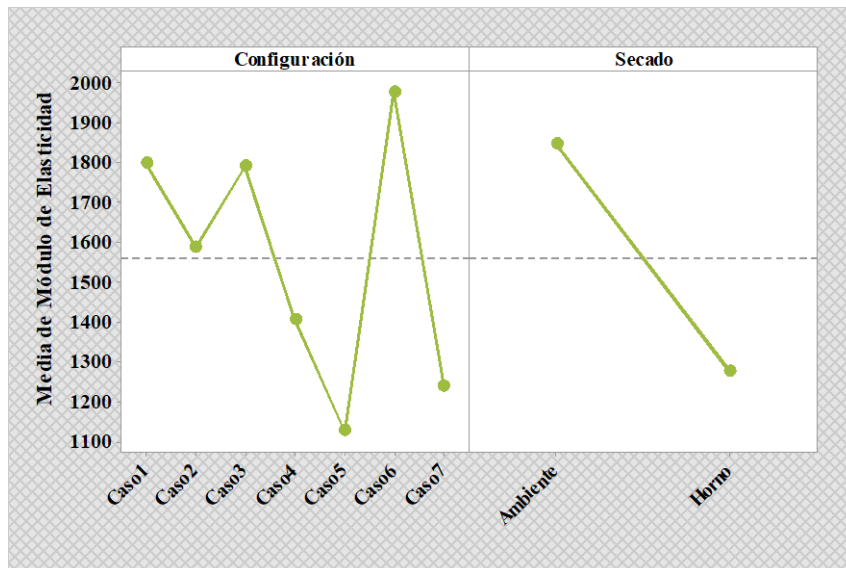
Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.25, se puede concluir claramente que se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia suficiente en los datos.



**Figura 4.8** Diagrama de Pareto de los efectos para el módulo de elasticidad.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.9 en la que se puede corroborar que predomina de manera evidente la influencia de los efectos del tipo de secado sobre el módulo de elasticidad.

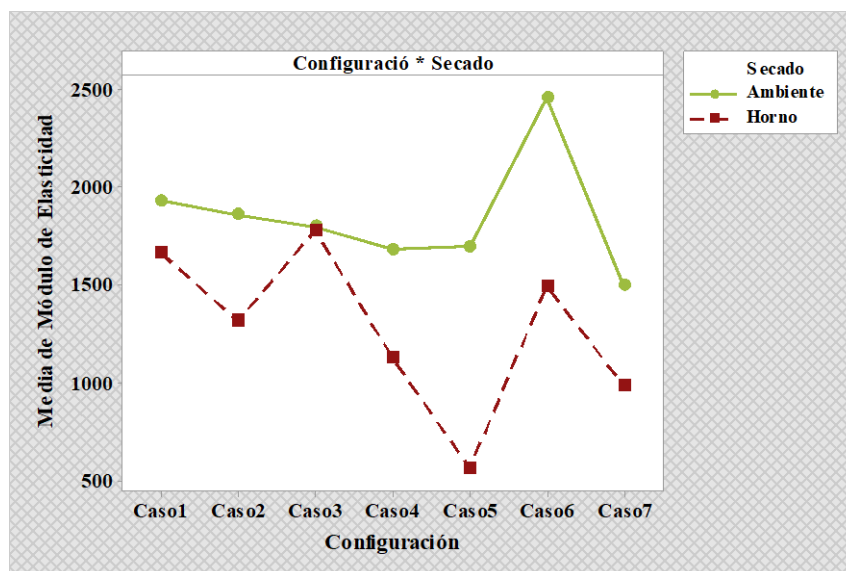


**Figura 4.9** Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

De la misma forma representamos la interacción de los efectos en la Figura 4.10, donde notamos una marcada diferencia entre las pendientes de cada par de líneas entre la mayoría de niveles de la configuración, por lo que se confirma que existe interacción entre los factores configuración y tipo de secado.

Haciendo un análisis más profundo a manera de ejemplo, se puede citar el Caso 4 y Caso 5, en donde para el secado al Ambiente el módulo de elasticidad se mantiene casi constante, ya que existe una diferencia por poco nula entre ambos casos, sin embargo para el secado al Horno la diferencia es más grande, ya que en el Caso 4 el módulo de elasticidad es por mucho mayor al del Caso 5, por ello es que se entiende que el factor tipo de secado influye determinantemente sobre el valor que el módulo de elasticidad tendrá en cada configuración.



**Figura 4.10** Gráfica de interacción para el módulo de elasticidad.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Debido a la conclusión del ANOVA del Diseño Factorial Completo del módulo de elasticidad, es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la deseabilidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

#### 4.2.2.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión factorial del Diseño Factorial Completo se estiman las respuestas predichas del módulo de elasticidad, las cuales son la herramienta clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.28.

**Tabla 4.28** Respuestas predichas del módulo de elasticidad.

Factores		Respuestas predichas [MPa]
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	1931.730
Caso 2	Ambiente	1859.444
Caso 3	Ambiente	1800.290
Caso 4	Ambiente	1682.988
Caso 5	Ambiente	1695.662
Caso 6	Ambiente	2459.880
Caso 7	Ambiente	1499.322
Caso 1	Horno	1664.132
Caso 2	Horno	1315.212
Caso 3	Horno	1780.592
Caso 4	Horno	1126.912
Caso 5	Horno	560.478
Caso 6	Horno	1493.824
Caso 7	Horno	983.846

Fuente: Autor

#### Cálculo de la deseabilidad individual

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{máx}$  e inferior  $y_{mín}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.29.

**Tabla 4.29** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del módulo de elasticidad.

Respuestas observadas		Respuestas predichas	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
458.48 MPa	3344.77 MPa	560.478 MPa	2459.880 MPa

Fuente: Autor

Es así que se considera el valor del mínimo observado como la especificación inferior y el valor del máximo predicho como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es maximizar la respuesta de salida.

**Tabla 4.30** Deseabilidad individual del módulo de elasticidad.

Factores		$d_2$
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	0.7361
Caso 2	Ambiente	0.7000
Caso 3	Ambiente	0.6704
Caso 4	Ambiente	0.6118
Caso 5	Ambiente	0.6182
Caso 6	Ambiente	1.0000
Caso 7	Ambiente	0.5201
Caso 1	Horno	0.6024
Caso 2	Horno	0.4281
Caso 3	Horno	0.6606
Caso 4	Horno	0.3340
Caso 5	Horno	0.0510
Caso 6	Horno	0.5173
Caso 7	Horno	0.2625

Fuente: Autor

Empelando la ecuación 2.16, se calculan las deseabilidades individuales, las cuales se visualizan en la Tabla 4.30.

Con las deseabilidades individuales se puede estimar que la combinación óptima individual para el módulo de elasticidad es el Caso 6, secado al Ambiente.

### 4.2.3 ANÁLISIS DE LA ELONGACIÓN

#### 4.2.3.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

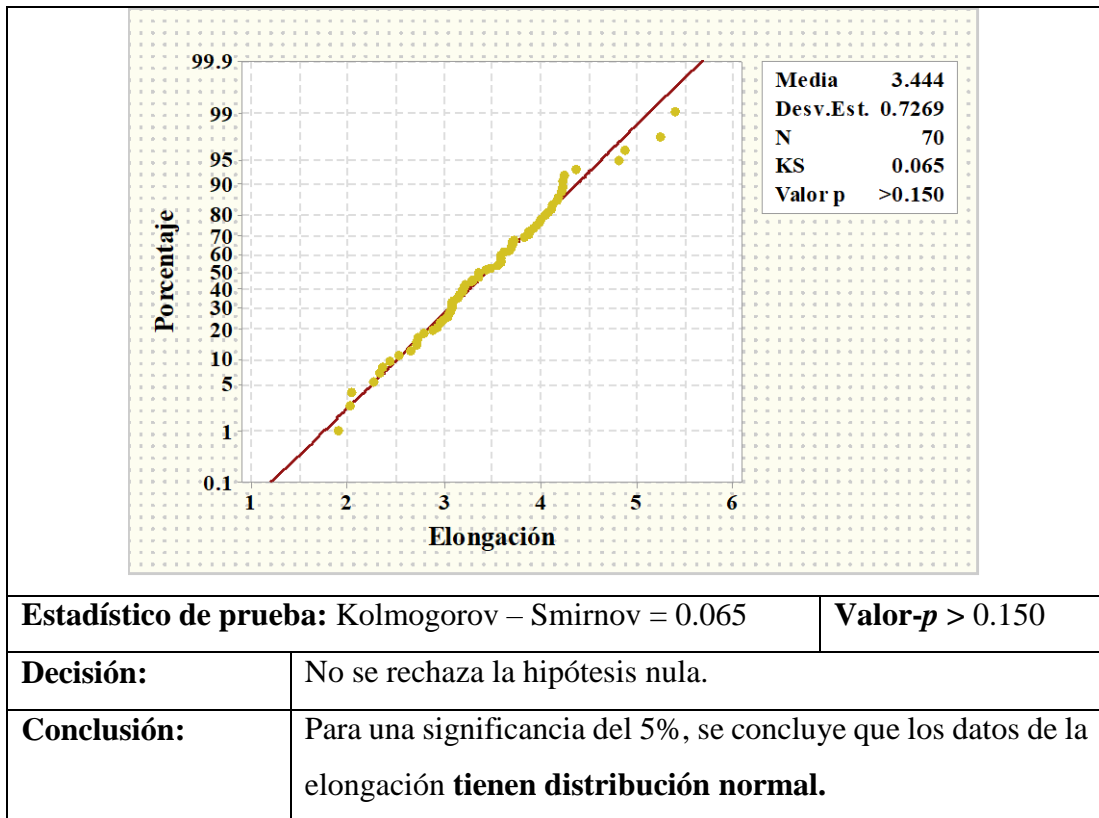
Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

#### Prueba de normalidad

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad en los datos de la elongación. El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.31, aclara que los datos cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este mayor que 0.150.

**Tabla 4.31** Verificación del supuesto de normalidad de la elongación.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : La elongación tiene distribución normal.		
	$H_1$ : La elongación no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



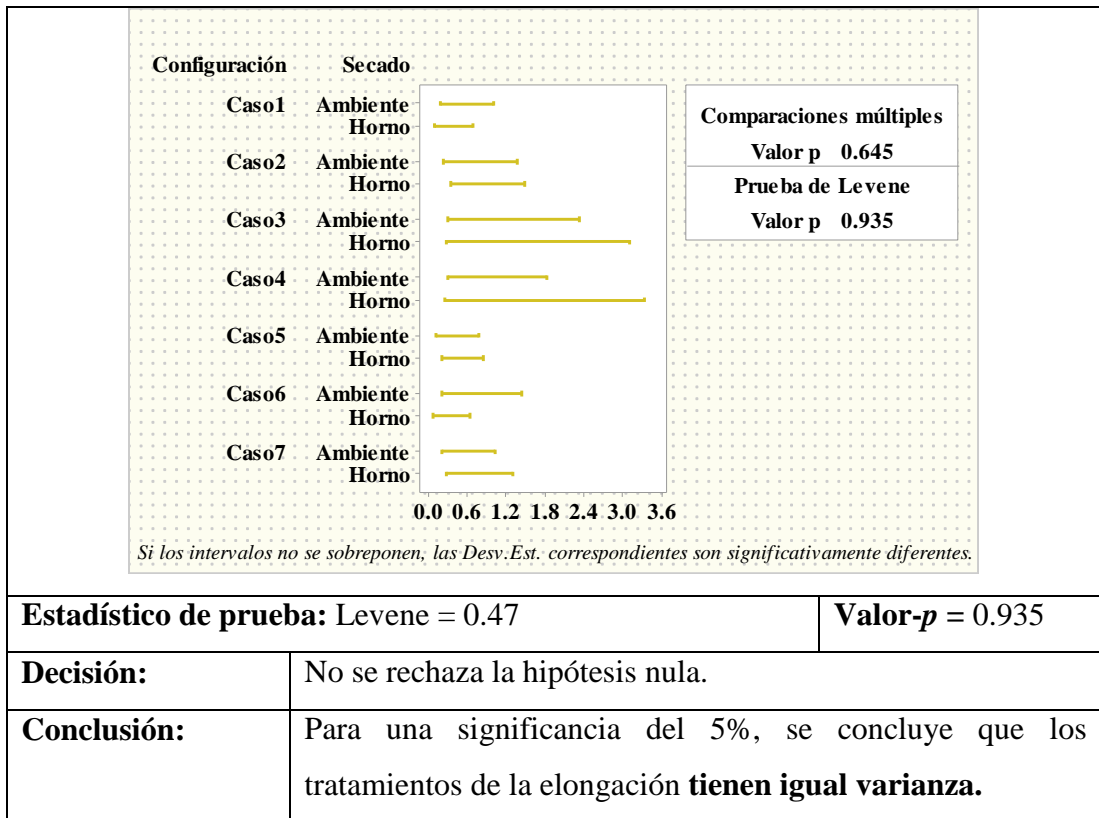
Fuente: Autor

### Prueba de igualdad de varianza

Para la verificación del supuesto de igualdad de varianza en los tratamientos de la elongación, empleamos la prueba de Levene, después de su aplicación, se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.32, se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.935 y 0.05, respectivamente.

**Tabla 4.32** Verificación del supuesto de igualdad de varianza de la elongación.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos de la elongación tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos de la elongación no tienen igual varianza.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



Fuente: Autor

### Verificación de independencia de residuos

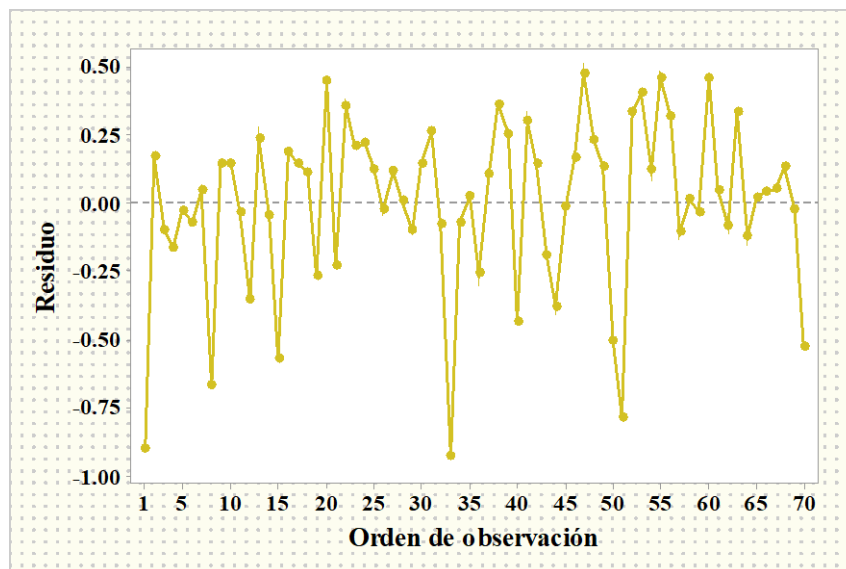


Figura 4.11 Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la elongación.

Fuente: Minitab® Statistical Software



Para verificar que exista independencia en los residuos de la elongación, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.11.

La Figura 4.11 nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia en los residuos de esta propiedad.

#### **4.2.3.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS**

No se requiere transformar los datos de la elongación ya que cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### **4.2.3.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS**

No se pueden verificar los supuestos en los datos transformados ya que no fue necesario transformar los datos originales pues cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### **4.2.3.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES**

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

##### **Diseño completamente aleatorizado**

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación de la elongación, la configuración del material y el error aleatorio. En el análisis de varianza en la Tabla 4.33 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos.

Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.33, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, además de este estadístico, también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste.

**Tabla 4.33** ANOVA para el DCA de la elongación.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	17.221	6	2.870	9.40	0.000
Error	19.241	63	0.305		
Total	36.461	69			

Fuente: Autor

Los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.34.

**Tabla 4.34** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la elongación.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
47.23 %	42.20 %

Fuente: Autor

### **Diseño en bloques completos al azar**

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los factores anteriormente mencionados.

**Tabla 4.35** ANOVA para el DBCA de la elongación.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	17.221	6	2.870	15.94	0.000
Tipo de Secado	8.078	1	8.078	44.87	0.000
Error	11.162	62	0.180		
Total	36.461	69			

Fuente: Autor

El análisis de varianza de este diseño de la elongación se especifica en la Tabla 4.35. Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ambos factores influyen significativamente en la respuesta, también se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.36.

**Tabla 4.36** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la elongación.

<b>Coefficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coefficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
69.39 %	65.93 %

Fuente: Autor

### Diseño Factorial Completo

Al aplicar este diseño experimental se tiene presente que se requiere igual interés en ambos factores a analizar: la configuración y el tipo de secado, dentro del mismo también se incluye el efecto asociado a la interacción de los factores anteriormente mencionado por lo que dependiendo de los resultados del ANOVA se establece si este contribuye significativamente o no a la elongación.

**Tabla 4.37** ANOVA para el Diseño factorial completo de la elongación.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Modelo	29.758	13	2.289	19.12	0.000
Configuración	17.221	6	2.870	23.98	0.000
Tipo de Secado	8.078	1	8.078	67.49	0.000
Conf. * Secado	4.459	6	0.743	6.21	0.000
Error	6.703	56	0.120		
Total	36.461	69			

Fuente: Autor

De acuerdo a la Tabla 4.37 se puede entender que los efectos de los factores configuración, tipo de secado y la interacción de estos factores, son significativamente

importantes, además se deduce que los tratamientos planteados son significativamente diferentes.

**Tabla 4.38** Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general de la elongación.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
81.62 %	77.35 %

**Fuente:** Autor

En la Tabla 4.38 se describen los coeficientes de determinación para el Diseño Factorial Completo, notamos que presenta un ajuste mucho mejor para los datos de la elongación que modelos anteriores.

#### 4.2.3.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE

##### Comparación de coeficientes de determinación

Para seleccionar un diseño como el que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.27.

**Tabla 4.39** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la elongación.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
$R^2$	47.23 %	69.39 %	81.62 %
$R^2_{aj}$	42.20 %	65.93 %	77.35 %

**Fuente:** Autor

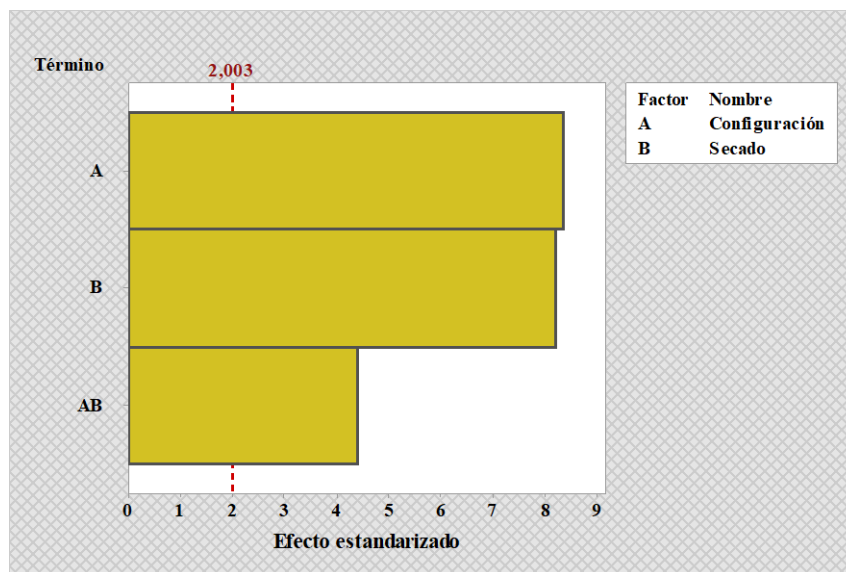
Es claramente apreciable que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica el 81.62% de la variabilidad de la elongación, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

### Resultados del análisis del diseño factorial de la elongación.

Para representar los efectos que influyen en la elongación, estos se muestran en la Figura 4.12, esta ilustración detalla que son estadísticamente significativos los efectos del factor A, correspondiente a la configuración, siendo estos efectos los más grandes sobre esta propiedad; seguidos muy cercanamente a estos, están los efectos del factor B, que pertenecen al tipo de secado.

Por debajo de los efectos principales e igual estadísticamente significativos se encuentran los efectos de la interacción AB, que pertenecen a la interacción entre la configuración y el tipo de secado.

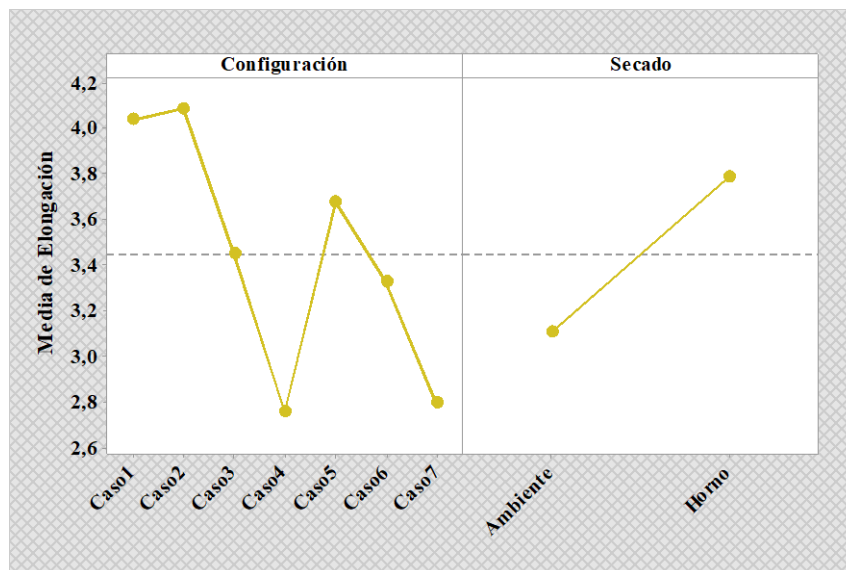
Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.37, se puede concluir claramente que se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia suficiente en los datos.



**Figura 4.12** Diagrama de Pareto de los efectos para la elongación.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

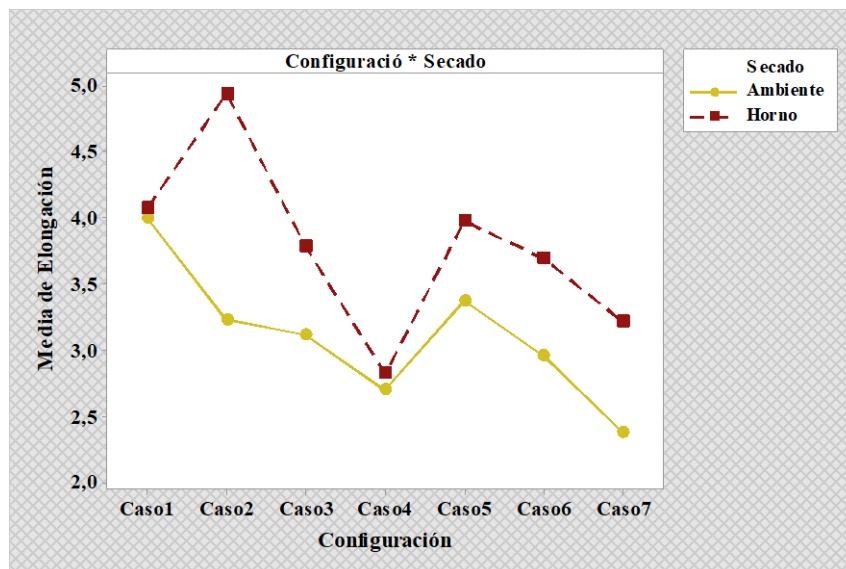
Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.13 en la que se puede corroborar que existe una particular similitud entre la influencia de los efectos de la configuración y los del tipo de secado sobre la elongación.



**Figura 4.13** Gráfica de efectos principales para la elongación.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

De la misma forma representamos la interacción de los efectos en la Figura 4.14, donde notamos una marcada diferencia entre las pendientes de cada par de líneas entre la mayoría de niveles de la configuración, por lo que se confirma que existe interacción entre los factores configuración y tipo de secado.



**Figura 4.14** Gráfica de interacción para la elongación.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Haciendo un análisis más profundo a manera de ejemplo, se puede citar el Caso 1 y Caso 2, en donde para el secado al Ambiente la elongación disminuye drásticamente, por lo que existe una gran diferencia entre ambos casos, mientras que para el secado al Horno la elongación aumenta, por ello es que se entiende que el factor tipo de secado influye determinantemente sobre el valor que la elongación tendrá en cada tipo de configuración.

Debido a la conclusión del ANOVA del Diseño Factorial Completo de la elongación, es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la deseabilidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

#### 4.2.3.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión factorial del Diseño Factorial Completo se estiman las respuestas predichas de la elongación, las cuales son la herramienta clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.40.

**Tabla 4.40** Respuestas predichas de la elongación.

<b>Factores</b>		<b>Respuestas predichas [%]</b>
<b>Configuración</b>	<b>Tipo de Secado</b>	
Caso 1	Ambiente	3.998
Caso 2	Ambiente	3.226
Caso 3	Ambiente	3.112
Caso 4	Ambiente	2.696
Caso 5	Ambiente	3.370
Caso 6	Ambiente	2.954
Caso 7	Ambiente	2.374
Caso 1	Horno	4.072
Caso 2	Horno	4.940

Caso 3	Horno	3.780
Caso 4	Horno	2.816
Caso 5	Horno	3.976
Caso 6	Horno	3.690
Caso 7	Horno	3.212

Fuente: Autor

### Cálculo de la deseabilidad individual

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{m\acute{a}x}$  e inferior  $y_{m\acute{i}n}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.41.

**Tabla 4.41** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la elongación.

Respuestas observadas		Respuestas predichas	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1.89 %	5.40 %	2.374 %	4.940 %

Fuente: Autor

Es así que se considera el valor del mínimo observado como la especificación inferior y el valor del máximo predicho como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es maximizar la respuesta de salida, empelando la ecuación 2.16, se calculan las deseabilidades individuales, las cuales se visualizan en la Tabla 4.42.

**Tabla 4.42** Deseabilidad individual de la elongación.

Factores		$d_3$
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	0.6911
Caso 2	Ambiente	0.4380



Caso 3	Ambiente	0.4007
Caso 4	Ambiente	0.2643
Caso 5	Ambiente	0.4852
Caso 6	Ambiente	0.3489
Caso 7	Ambiente	0.1587
Caso 1	Horno	0.7154
Caso 2	Horno	1.0000
Caso 3	Horno	0.6197
Caso 4	Horno	0.3036
Caso 5	Horno	0.6839
Caso 6	Horno	0.5902
Caso 7	Horno	0.4334

**Fuente:** Autor

Con las deseabilidades individuales se puede estimar que la combinación óptima individual para la elongación es el Caso 2, secado al Horno.

#### **4.2.4 ANÁLISIS DE LA DEFLEXIÓN**

##### **4.2.4.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS**

Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

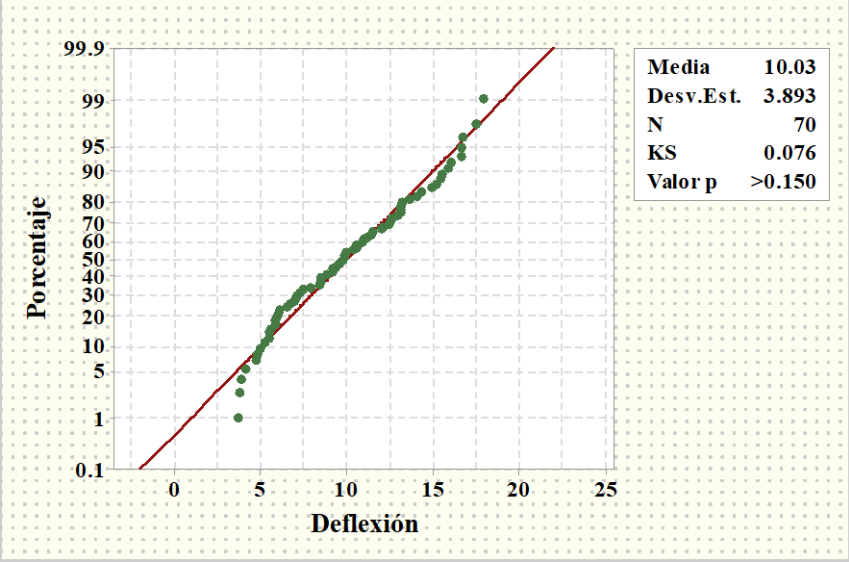
Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

##### **Prueba de normalidad**

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad en los datos de la deflexión. El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.43, aclara que los datos

cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este mayor que 0.150.

**Tabla 4.43** Verificación del supuesto de normalidad de la deflexión.

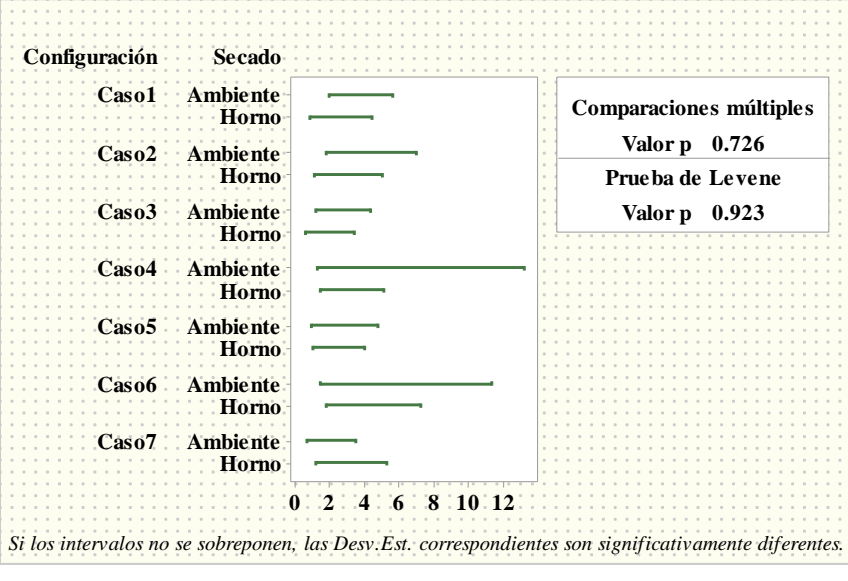
<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : La deflexión tiene distribución normal.		
	$H_1$ : La deflexión no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
			
<b>Estadístico de prueba:</b> Kolmogorov – Smirnov = 0.076			<b>Valor-<math>p</math></b> > 0.150
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los datos de la deflexión <b>tienen distribución normal.</b>		

Fuente: Autor

### Prueba de igualdad de varianza

Para la verificación del supuesto de igualdad de varianza en los tratamientos de la deflexión, empleamos la prueba de Levene, después de su aplicación, se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.44.

**Tabla 4.44** Verificación del supuesto de igualdad de varianza de la deflexión.

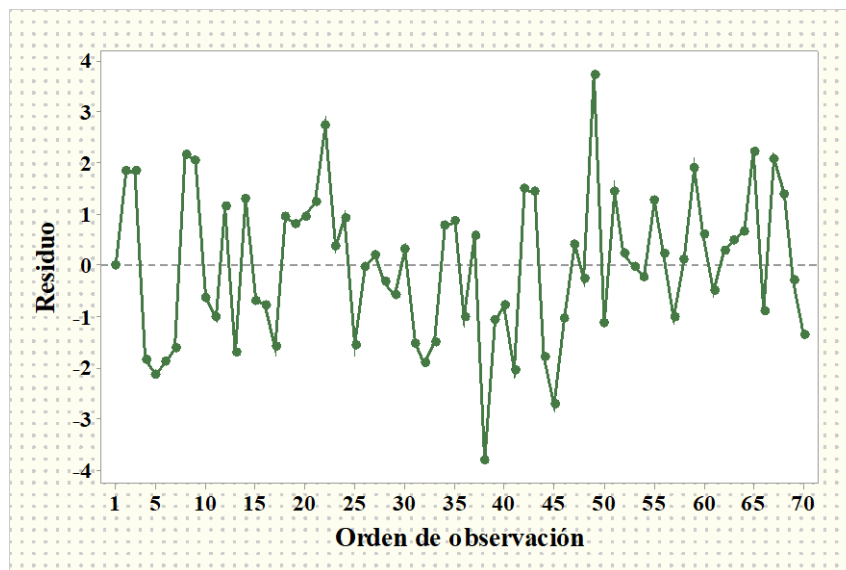
<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos de la deflexión tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos de la deflexión no tienen igual varianza.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
			
<b>Estadístico de prueba:</b> Levene = 0.49		<b>Valor-p</b> = 0.923	
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los tratamientos de la deflexión <b>tienen igual varianza.</b>		

**Fuente:** Autor

Se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.923 y 0.05, respectivamente.

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos de la deflexión, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.15, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia en los residuos de esta propiedad.



**Figura 4.15** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la deflexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

#### **4.2.4.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS**

No se requiere transformar los datos de la deflexión ya que cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### **4.2.4.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS**

No se pueden verificar los supuestos en los datos transformados ya que no fue necesario transformar los datos originales pues cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### **4.2.4.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES**

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

### Diseño completamente aleatorizado

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación de la deflexión, la configuración del material y el error aleatorio, en el análisis de varianza en la Tabla 4.45 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos.

**Tabla 4.45** ANOVA para el DCA de la deflexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	603.10	6	100.52	14.30	0.000
Error	442.72	63	7.03		
Total	1045.82	69			

**Fuente:** Autor

Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.45, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, además de este estadístico, también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste, los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.46.

**Tabla 4.46** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la deflexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
57.67 %	53.64 %

**Fuente:** Autor

### Diseño en bloques completos al azar

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los

factores anteriormente mencionados. El análisis de varianza de este diseño de la deflexión se especifica en la Tabla 4.47.

**Tabla 4.47** ANOVA para el DBCA de la deflexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	603.10	6	100.52	25.55	0.000
Tipo de Secado	198.82	1	198.82	50.54	0.000
Error	243.90	62	3.93		
Total	1045.82	69			

**Fuente:** Autor

Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ambos factores influyen significativamente en la respuesta, también se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.48.

**Tabla 4.48** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la deflexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
76.68 %	74.05 %

**Fuente:** Autor

### **Diseño Factorial Completo**

Al aplicar este diseño experimental se tiene presente que se requiere igual interés en ambos factores a analizar: la configuración y el tipo de secado, dentro del mismo también se incluye el efecto asociado a la interacción de los factores anteriormente mencionado por lo que dependiendo de los resultados del ANOVA se establece si este contribuye significativamente o no a la deflexión.

De acuerdo a la Tabla 4.49 se puede entender que los efectos de los factores configuración, tipo de secado y la interacción de estos factores, son significativamente

importantes, además se deduce que los tratamientos planteados son significativamente diferentes.

**Tabla 4.49** ANOVA para el Diseño factorial completo de la deflexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Modelo	903.25	13	69.48	27.29	0.000
Configuración	603.10	6	100.52	39.48	0.000
Tipo de Secado	198.82	1	198.82	78.10	0.000
Conf. * Secado	101.34	6	16.89	6.63	0.000
Error	142.56	56	2.55		
Total	1045.82	69			

**Fuente:** Autor

En la Tabla 4.50 se describen los coeficientes de determinación para el Diseño Factorial Completo, notamos que presenta un ajuste mucho mejor para los datos de la deflexión que modelos anteriores.

**Tabla 4.50** Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general de la deflexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
86.37 %	83.20 %

**Fuente:** Autor

#### **4.2.4.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE**

##### **Comparación de coeficientes de determinación**

Para seleccionar un diseño como el que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.51.

Es claramente apreciable que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica el 86.37% de la variabilidad de la deflexión, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

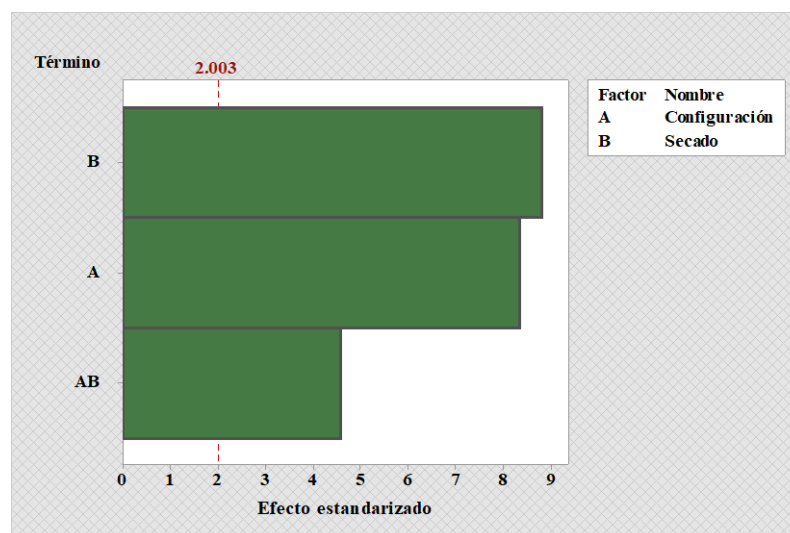
**Tabla 4.51** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la deflexión.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
$R^2$	57.67 %	76.68 %	86.37 %
$R^2_{aj}$	53.64 %	74.05 %	83.20 %

Fuente: Autor

### Resultados del análisis del diseño factorial de la deflexión.

Para representar los efectos que influyen en la deflexión, estos se muestran en la Figura 4.16, esta ilustración detalla que los efectos del factor B correspondiente al tipo de secado, son estadísticamente significativos, siendo estos efectos los más grandes sobre esta propiedad; seguidos muy cercanamente a estos, están los efectos del factor A, que pertenecen a la configuración.



**Figura 4.16** Diagrama de Pareto de los efectos para la deflexión.

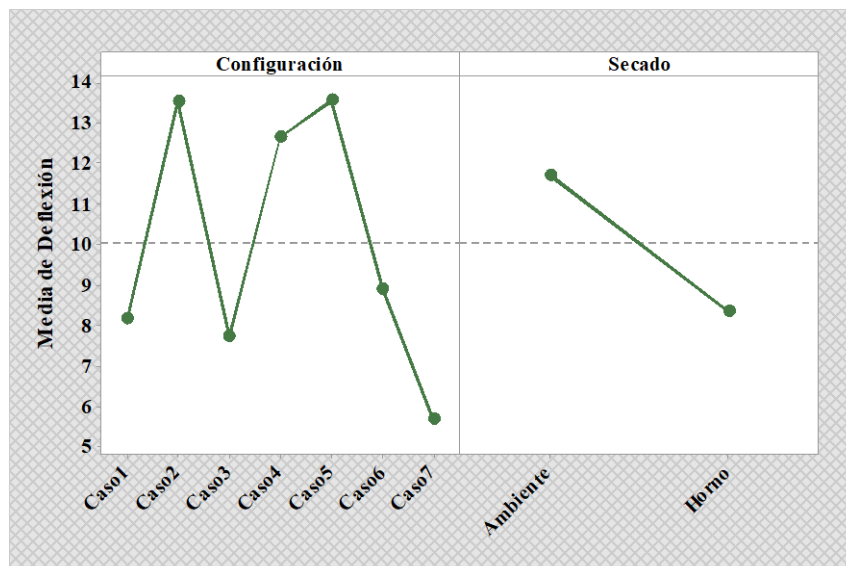
Fuente: Minitab® Statistical Software



Por debajo de los efectos principales e igual estadísticamente significativos se encuentran los efectos de la interacción AB, que pertenecen a la interacción entre la configuración y el tipo de secado.

Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.49, se puede concluir claramente que se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia suficiente en los datos.

Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.17 en la que se puede corroborar que existe una particular similitud entre la influencia de los efectos del tipo de secado y de la configuración sobre la deflexión.



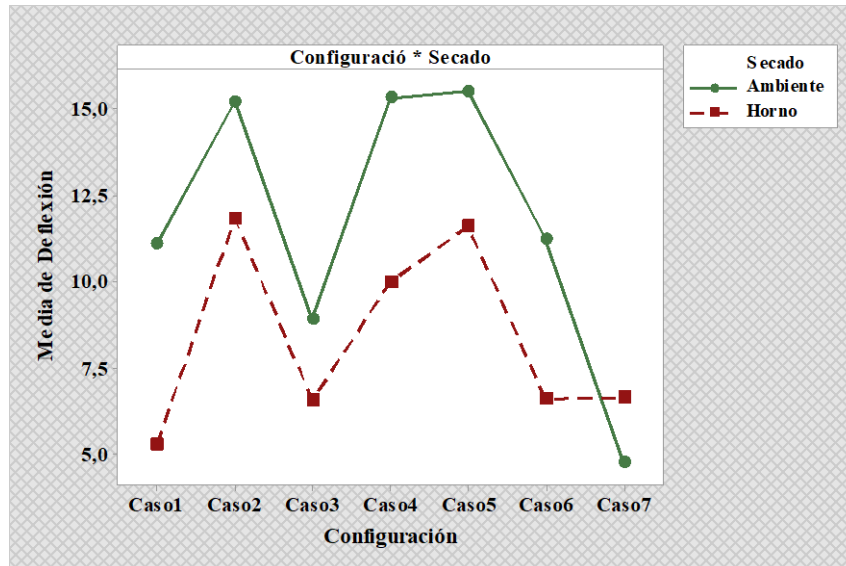
**Figura 4.17** Gráfica de efectos principales para la deflexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

De la misma forma representamos la interacción de los efectos en la Figura 4.18, donde notamos una marcada diferencia entre las pendientes de cada par de líneas entre la mayoría de niveles de la configuración, por lo que se confirma que existe interacción entre los factores configuración y tipo de secado.

Haciendo un análisis más profundo a manera de ejemplo, se puede citar el Caso 6 y Caso 7, en donde para el secado al Horno la deflexión se mantiene casi constante, ya

que existe una diferencia por poco nula entre ambos casos, sin embargo para el secado al Ambiente la diferencia es más grande, ya que en el Caso 7 la deflexión es por mucho menor al del Caso 6, por ello es que se entiende que el factor tipo de secado influye determinantemente sobre el valor que la deflexión tendrá en cada configuración.



**Figura 4.18** Gráfica de interacción para la deflexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Debido a la conclusión del ANOVA del Diseño Factorial Completo de la deflexión, es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la deseabilidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

#### 4.2.4.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión factorial del Diseño Factorial Completo se estiman las respuestas predichas de la deflexión, las cuales son la herramienta clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.52.

**Tabla 4.52** Respuestas predichas de la deflexión.

Factores		Respuestas predichas [mm]
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	11.101
Caso 2	Ambiente	15.210
Caso 3	Ambiente	8.917
Caso 4	Ambiente	15.317
Caso 5	Ambiente	15.511
Caso 6	Ambiente	11.223
Caso 7	Ambiente	4.752
Caso 1	Horno	5.250
Caso 2	Horno	11.837
Caso 3	Horno	6.549
Caso 4	Horno	9.985
Caso 5	Horno	11.603
Caso 6	Horno	6.576
Caso 7	Horno	6.636

Fuente: Autor

**Cálculo de la deseabilidad individual**

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{máx}$  e inferior  $y_{mín}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.53.

**Tabla 4.53** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la deflexión.

Respuestas observadas		Respuestas predichas	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
3.659 mm	17.952 mm	4.752 mm	15.511 mm

Fuente: Autor

Es así que se considera el valor del mínimo predicho como la especificación inferior y el valor del máximo observado como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es minimizar la respuesta de salida, empelando la ecuación 2.17, se calculan las deseabilidades individuales, las cuales se visualizan en la Tabla 4.54.

**Tabla 4.54** Deseabilidad individual de la deflexión.

<b>Factores</b>		<b><math>d_4</math></b>
<b>Configuración</b>	<b>Tipo de Secado</b>	
Caso 1	Ambiente	0.5190
Caso 2	Ambiente	0.2077
Caso 3	Ambiente	0.6845
Caso 4	Ambiente	0.1997
Caso 5	Ambiente	0.1849
Caso 6	Ambiente	0.5098
Caso 7	Ambiente	1.0000
Caso 1	Horno	0.9623
Caso 2	Horno	0.4633
Caso 3	Horno	0.8639
Caso 4	Horno	0.6035
Caso 5	Horno	0.4810
Caso 6	Horno	0.8618
Caso 7	Horno	0.8573

**Fuente:** Autor

Con las deseabilidades individuales se puede estimar que la combinación óptima individual para la deflexión es el Caso 7, secado al Ambiente.

## 4.2.5 ANÁLISIS DEL ESFUERZO MÁXIMO DE FLEXIÓN

### 4.2.5.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

#### Prueba de normalidad

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad en los datos de los datos del esfuerzo máximo de flexión.

**Tabla 4.55** Verificación del supuesto de normalidad del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : El esfuerzo máximo de flexión tiene distribución normal.		
	$H_1$ : El esfuerzo máximo de flexión no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$

<b>Estadístico de prueba:</b> Kolmogorov – Smirnov = 0.066	<b>Valor-p</b> > 0.150
<b>Decisión:</b>	No rechaza la hipótesis nula.
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los datos del esfuerzo máximo de flexión <b>tienen distribución normal.</b>

**Fuente:** Autor

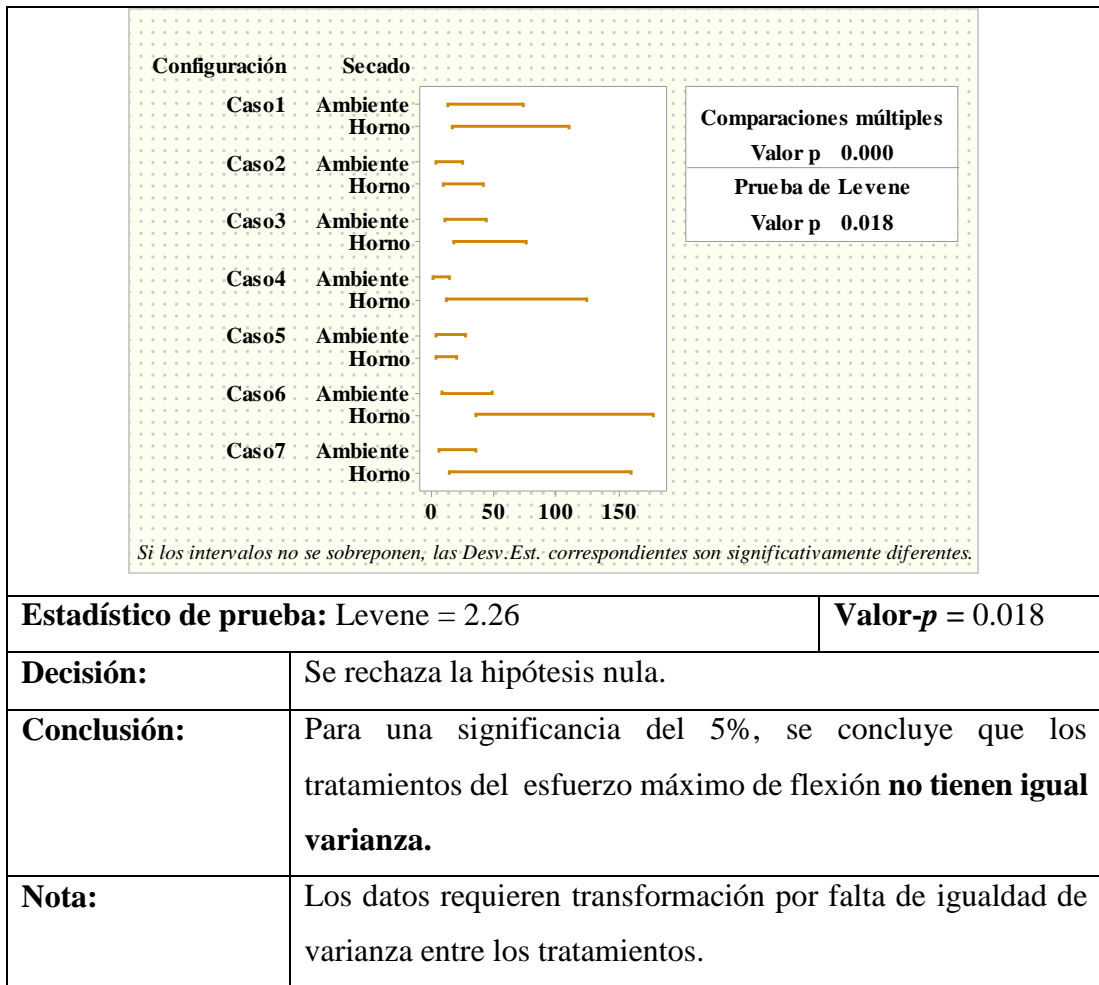
El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.55, aclara que los datos cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor-p sea mayor o igual a 0.05, siendo este mayor que 0.150.

### **Prueba de igualdad de varianza**

Para la verificación del supuesto de igualdad de varianza de los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción, empleamos la prueba de Levene, tras su aplicación se indica que la varianza de los tratamientos tiene diferencias significativas, por lo que se puede rechazar  $H_0$ , el estadístico de prueba se describe en la Tabla 4.56, se aclara que la significancia calculada no es mayor que la significancia dada, en valores de 0.018 y 0.05, respectivamente; por lo que se requiere transformar los datos para su verificación y posterior análisis.

**Tabla 4.56** Verificación del supuesto de igualdad de varianza del esfuerzo máximo de flexión.

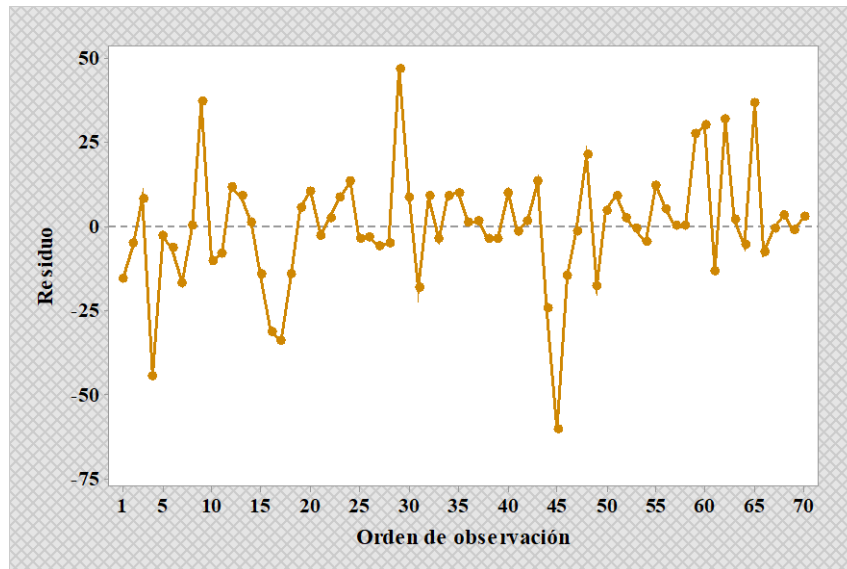
<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de flexión tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de flexión no tienen igual varianza.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



**Fuente:** Autor

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos del esfuerzo máximo de flexión, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.19, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia de los residuos de esta propiedad.



**Figura 4.19** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del esfuerzo máximo de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

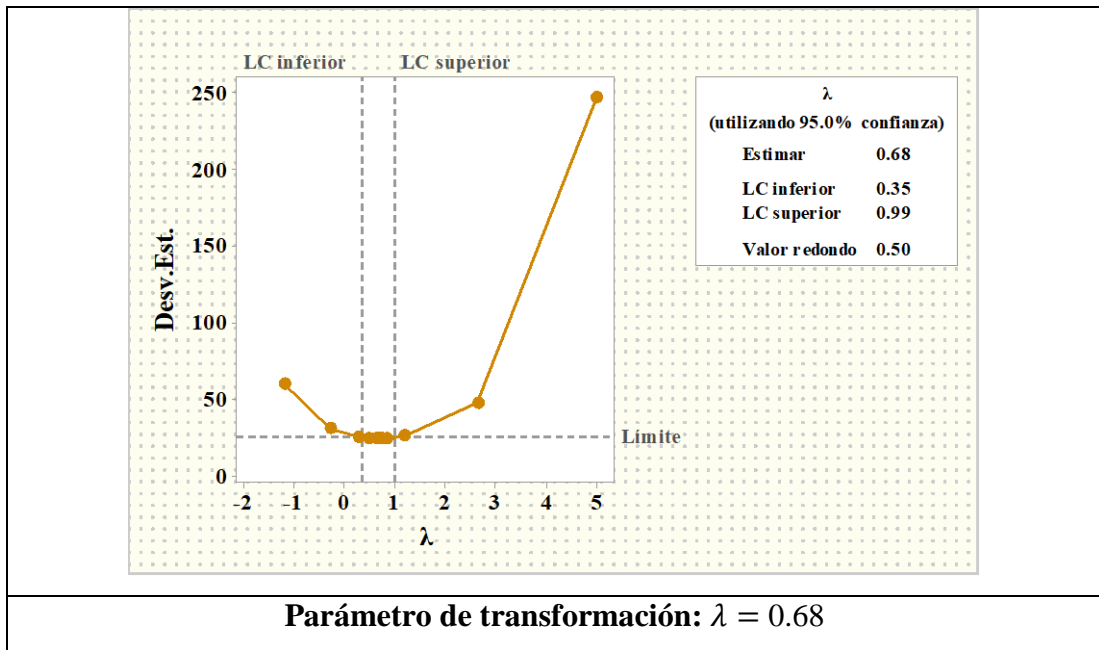
#### 4.2.5.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS

Debido al incumplimiento del supuesto de igualdad de varianza, los datos requieren ser transformados, por lo que se especifica el parámetro de transformación  $\lambda$  descrito en la Tabla 4.57 a ser empleado para dicha transformación.

**Tabla 4.57** Transformación de Box-Cox del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
--------------------------------	-----------------	-------------------------	----------





Fuente: Autor

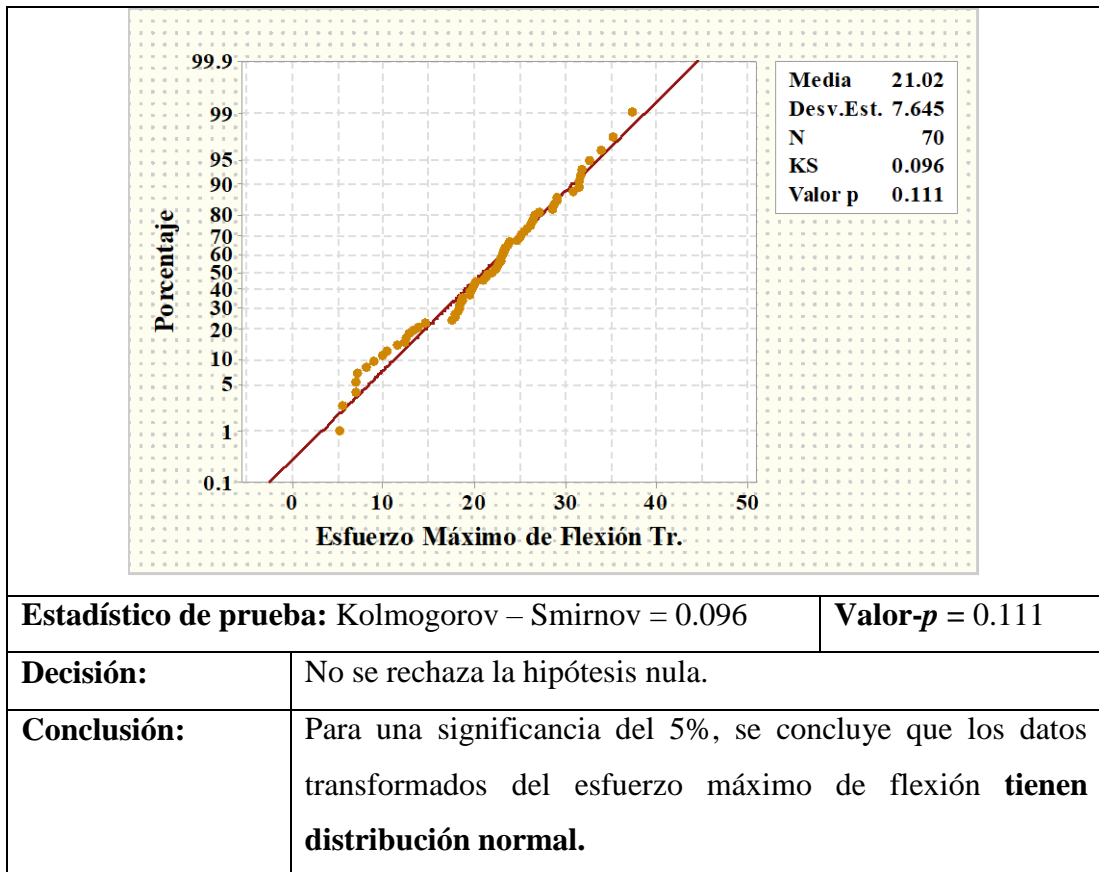
### 4.2.5.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS

#### Prueba de normalidad

Para verificar el supuesto de normalidad, se aplica nuevamente la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, esta vez en los datos transformados del esfuerzo máximo de flexión.

**Tabla 4.58** Verificación del supuesto de normalidad de datos transformados del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : El esfuerzo máximo de flexión tiene distribución normal.		
	$H_1$ : El esfuerzo máximo de flexión no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



Fuente: Autor

El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.58, aclara que los datos transformados cumplen con el supuesto de normalidad, ya que se requerir un valor-p mayor o igual a 0.05 para no rechazar  $H_0$ , en este caso el valor-p es de 0.111.

### Prueba de igualdad de varianza

Para verificar el supuesto de igualdad de varianza en los tratamientos de los datos transformados del esfuerzo máximo de tracción, empleamos la prueba de Levene, tras su aplicación se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, al igual que el caso sin transformar, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.59, se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.189 y 0.05, respectivamente.

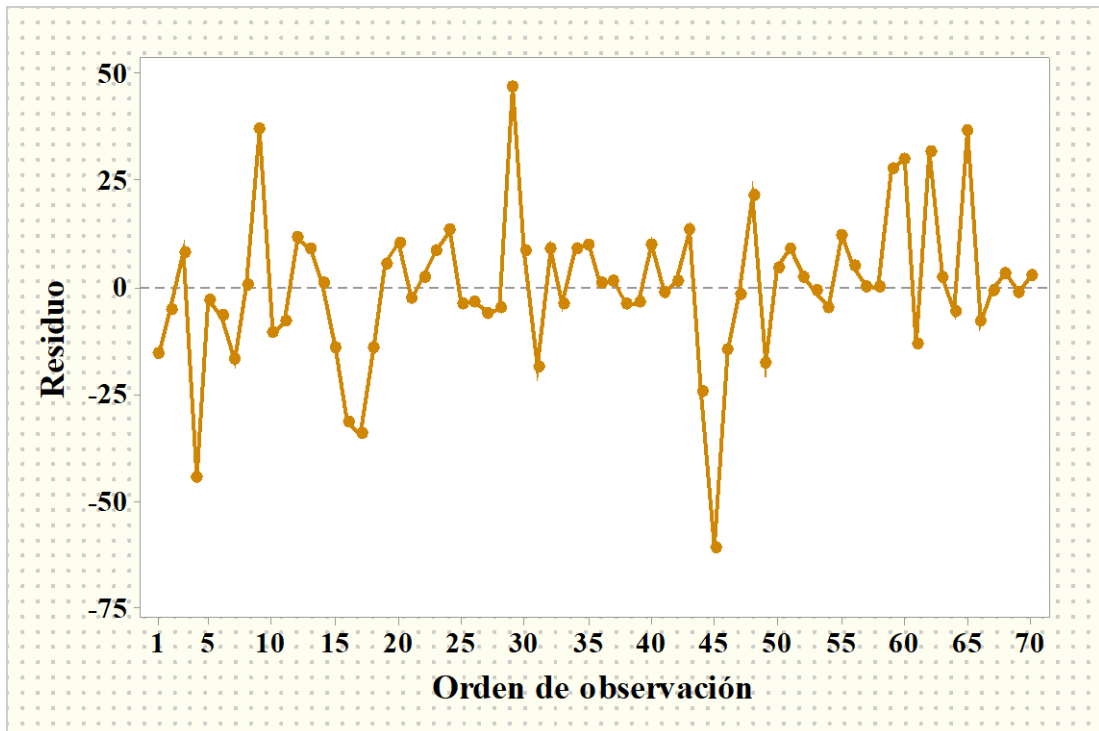
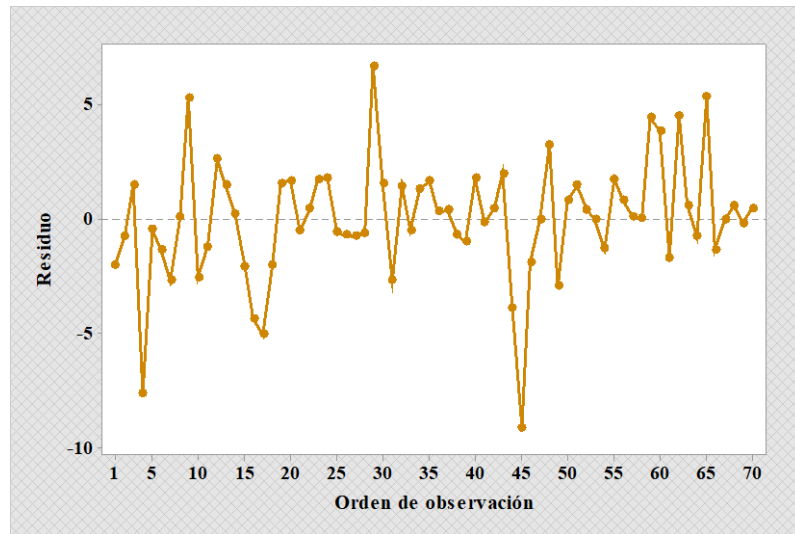
**Tabla 4.59** Verificación del supuesto de igualdad de varianza de datos transformados del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de flexión tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de flexión no tienen varianzas iguales.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
<b>Estadístico de prueba:</b> Levene = 1.81		<b>Valor-p</b> = 0.063	
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los tratamientos de los datos transformados del esfuerzo máximo de flexión <b>tienen igual varianza.</b>		

Fuente: Autor

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos de los datos transformados del esfuerzo máximo de flexión, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.20, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia de residuos.



**Figura 4.20** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de datos transformados del esfuerzo máximo de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

#### 4.2.5.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores

planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

### Diseño completamente aleatorizado

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación del esfuerzo máximo de flexión la configuración del material y el error aleatorio.

**Tabla 4.60** ANOVA para el DCA del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	2356.91	6	392.82	14.77	0.000
Error	1675.96	63	26.60		
Total	4032.87	69			

**Fuente:** Autor

En el análisis de varianza en la Tabla 4.60 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos.

Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.60, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, además de este estadístico también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste, los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.61.

**Tabla 4.61** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Coficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
58.44 %	54.48 %

**Fuente:** Autor

### Diseño en bloques completos al azar

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los factores anteriormente mencionados. El análisis de varianza de este diseño del esfuerzo máximo de flexión se especifica en la Tabla 4.62.

**Tabla 4.62** ANOVA para el DBCA del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	2356.91	6	392.82	23.40	0.000
Tipo de Secado	635.10	1	635.10	37.83	0.000
Error	1040.86	62	16.79		
Total	4032.87	69			

**Fuente:** Autor

Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ambos factores influyen significativamente en esta propiedad, también se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.63.

**Tabla 4.63** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
74.19 %	71.28 %

**Fuente:** Autor

### **Diseño Factorial Completo**

Al aplicar este diseño experimental se tiene presente que se requiere igual interés en ambos factores a analizar: la configuración y el tipo de secado, dentro del mismo también se incluye el efecto asociado a la interacción de los factores anteriormente

mencionado, por lo que dependiendo de los resultados del ANOVA se establece si este contribuye significativamente o no al esfuerzo máximo de flexión.

**Tabla 4.64** ANOVA para el Diseño factorial completo del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Modelo	3556.42	13	273.57	32.15	0.000
Configuración	2356.91	6	392.82	46.17	0.000
Tipo de Secado	635.10	1	635.10	74.65	0.000
Conf. * Secado	564.41	6	94.07	11.06	0.000
Error	476.45	56	8.51		
Total	4032.87	69			

**Fuente:** Autor

De acuerdo a la Tabla 4.64 se puede entender que los efectos de los factores configuración, tipo de secado y la interacción de estos factores, son significativos; además se deduce que existen diferencias significativas en los tratamientos planteados.

**Tabla 4.65** Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del esfuerzo máximo de flexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
88.19 %	85.44 %

**Fuente:** Autor

En la Tabla 4.65 se describen los coeficientes de determinación para el Diseño Factorial Completo, notamos que presenta un ajuste mucho mejor que modelos anteriormente analizados.

#### **4.2.5.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE**

##### **Comparación de coeficientes de determinación**

Para seleccionar el modelo y así el diseño que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.66.

**Tabla 4.66** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al esfuerzo máximo de flexión.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
$R^2$	58.44 %	74.19 %	88.19 %
$R^2_{aj}$	54.48 %	71.28 %	85.44 %

**Fuente:** Autor

Es claramente apreciable que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica el 88.19% de la variabilidad del esfuerzo máximo de flexión, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

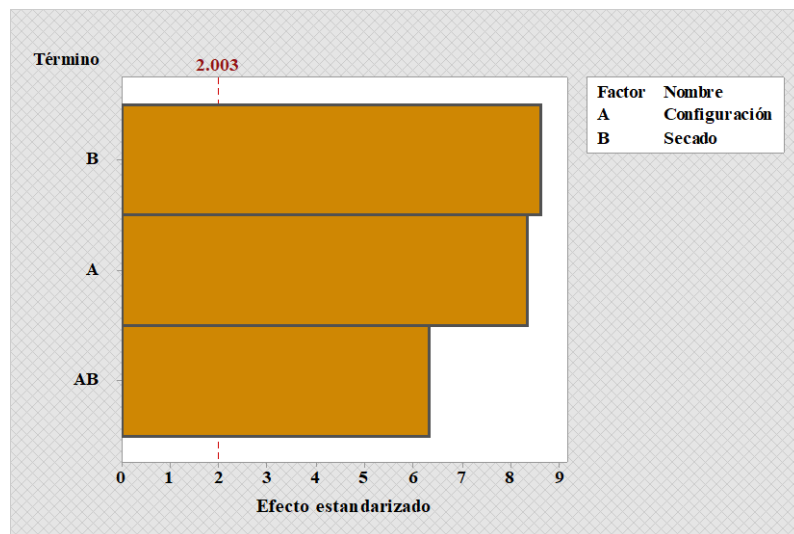
### **Resultados del análisis del diseño factorial del esfuerzo máximo de flexión.**

Para representar los efectos que influyen en el esfuerzo máximo de flexión, estos se muestran en la Figura 4.21, esta ilustración detalla que los efectos del factor B correspondiente al tipo de secado, son estadísticamente significativos, siendo estos efectos los más grandes sobre esta propiedad; seguidos muy cercanamente a estos, están los efectos del factor A, que pertenecen a la configuración.

Por debajo de los efectos principales e igual estadísticamente significativos se encuentran los efectos de la interacción AB, que pertenecen a la interacción entre la configuración y el tipo de secado.

Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.64, se puede concluir claramente que se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia suficiente en los datos.

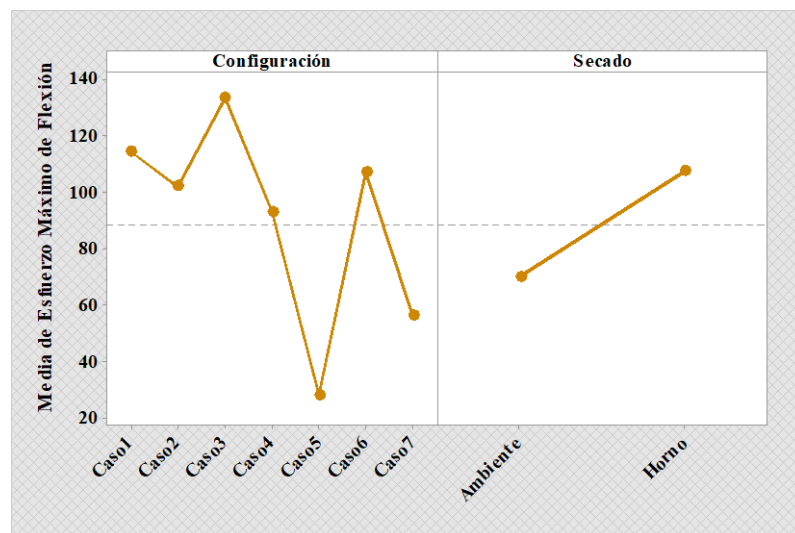




**Figura 4.21** Diagrama de Pareto de los efectos para el esfuerzo máximo de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.22 en la que se puede corroborar que existe una particular similitud entre la influencia de los efectos del tipo de secado y de la configuración sobre el esfuerzo máximo de flexión.

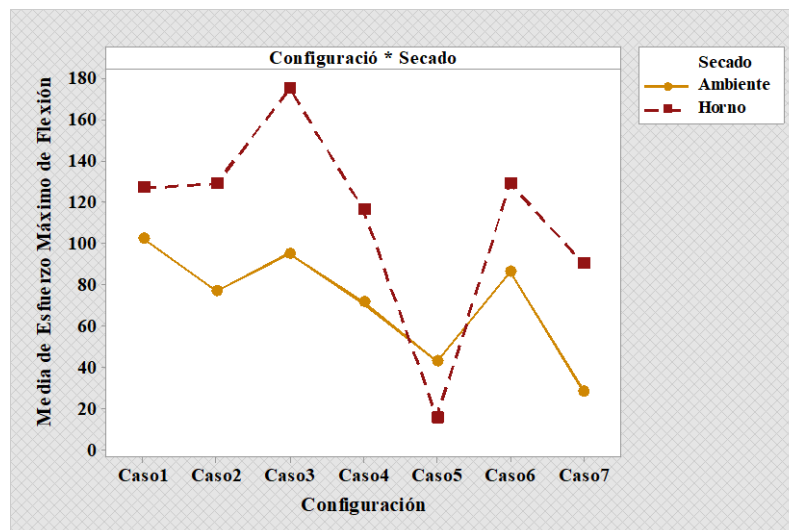


**Figura 4.22** Gráfica de efectos principales para el esfuerzo máximo de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

De la misma forma representamos la interacción de los efectos en la Figura 4.23, donde notamos una marcada diferencia entre las pendientes de cada par de líneas entre la

mayoría de niveles de la configuración, por lo que se confirma que existe interacción entre los factores configuración y tipo de secado.



**Figura 4.23** Gráfica de interacción para el esfuerzo máximo de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Haciendo un análisis más profundo a manera de ejemplo, se puede citar el Caso 2 y Caso 3, en donde para el secado al Ambiente el esfuerzo máximo de flexión aumenta sutilmente, por lo que podemos afirmar que ocurre una pequeña diferencia entre ambos casos, sin embargo para el secado al Horno la diferencia es más considerable, ya que en el Caso 3 el esfuerzo es por mucho mayor al del Caso 2, por ello es que se entiende que el factor tipo de secado influye determinadamente sobre el valor que el esfuerzo máximo de flexión tendrá en cada configuración.

Debido a la conclusión del ANOVA del Diseño Factorial Completo del esfuerzo máximo de flexión, es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la discapacidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

#### 4.2.5.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión factorial del Diseño Factorial Completo se estiman las respuestas predichas del esfuerzo máximo de flexión, las cuales son la herramienta

clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.67.

**Tabla 4.67** Respuestas predichas del esfuerzo máximo de flexión.

Factores		Respuestas predichas [MPa]
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	102.178
Caso 2	Ambiente	76.913
Caso 3	Ambiente	95.032
Caso 4	Ambiente	71.362
Caso 5	Ambiente	42.917
Caso 6	Ambiente	86.329
Caso 7	Ambiente	28.109
Caso 1	Horno	126.944
Caso 2	Horno	129.102
Caso 3	Horno	174.957
Caso 4	Horno	116.483
Caso 5	Horno	15.714
Caso 6	Horno	128.978
Caso 7	Horno	90.071

Fuente: Autor

### Cálculo de la deseabilidad individual

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{m\acute{a}x}$  e inferior  $y_{m\acute{i}n}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.68.

**Tabla 4.68** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del esfuerzo máximo de flexión.

Respuestas observadas	Respuestas predichas
-----------------------	----------------------

Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
11.25 MPa	205.28 MPa	15.714 MPa	174.957 MPa

Fuente: Autor

Es así que se considera el valor del mínimo observado como la especificación inferior y el valor del máximo predicho como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es maximizar la respuesta de salida, empelando la ecuación 2.16, se calculan las deseabilidades individuales, las cuales se visualizan en la Tabla 4.69.

**Tabla 4.69** Deseabilidad individual del esfuerzo máximo de flexión.

Factores		$d_5$
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	0.5554
Caso 2	Ambiente	0.4011
Caso 3	Ambiente	0.5118
Caso 4	Ambiente	0.3672
Caso 5	Ambiente	0.1934
Caso 6	Ambiente	0.4586
Caso 7	Ambiente	0.1030
Caso 1	Horno	0.7067
Caso 2	Horno	0.7199
Caso 3	Horno	1.0000
Caso 4	Horno	0.6428
Caso 5	Horno	0.0273
Caso 6	Horno	0.7191
Caso 7	Horno	0.4815

Fuente: Autor

Con las deseabilidades individuales se puede estimar que la combinación óptima individual para el esfuerzo máximo de flexión es el Caso 3, secado al Horno.

## 4.2.6 ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD SECANTE DE FLEXIÓN

### 4.2.6.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

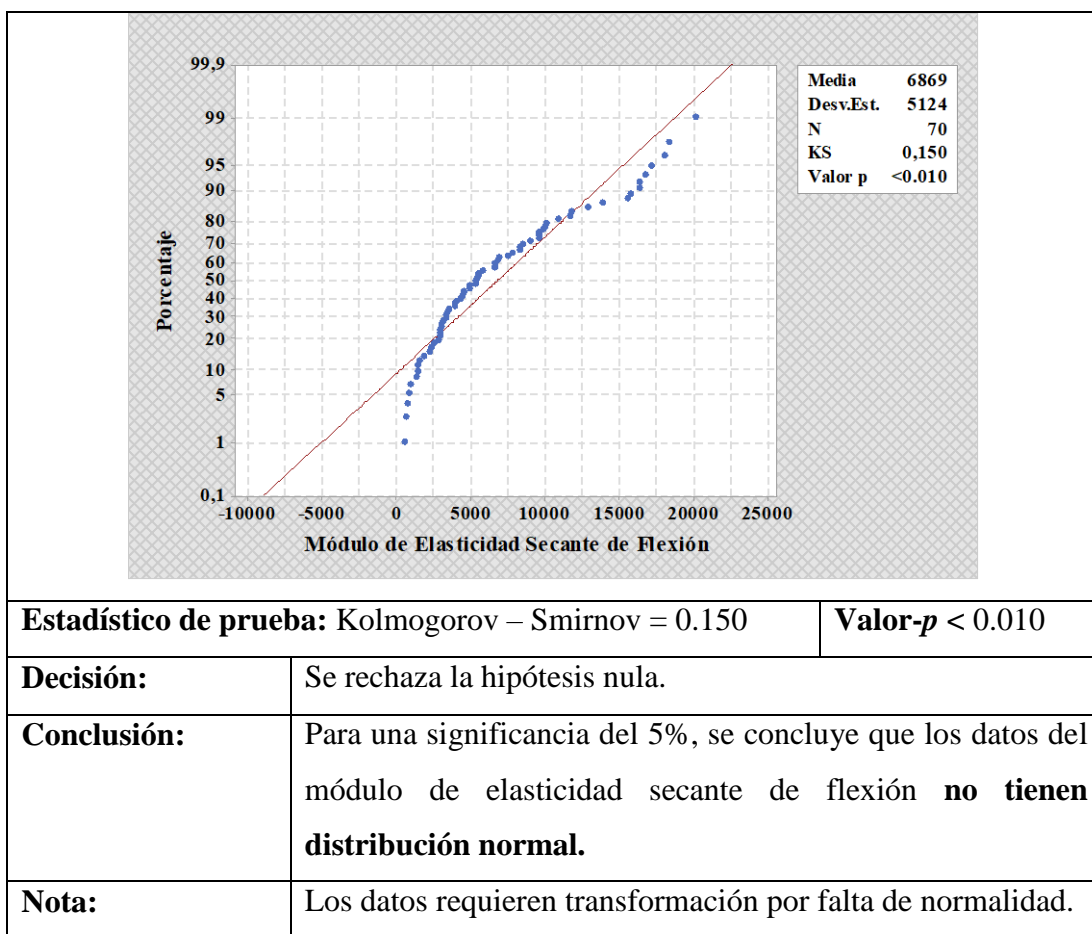
Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

#### Prueba de normalidad

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad de los datos del módulo de elasticidad secante de flexión. El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.70, aclara que los datos originales no cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$  es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este menor a 0.010; por lo que se requiere transformar los datos para su verificación y posterior análisis.

**Tabla 4.70** Verificación del supuesto de normalidad del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Hipótesis:</b>	<b><math>H_0</math>:</b> El módulo de elasticidad secante de flexión tiene distribución normal.		
	<b><math>H_1</math>:</b> El módulo de elasticidad secante de flexión no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



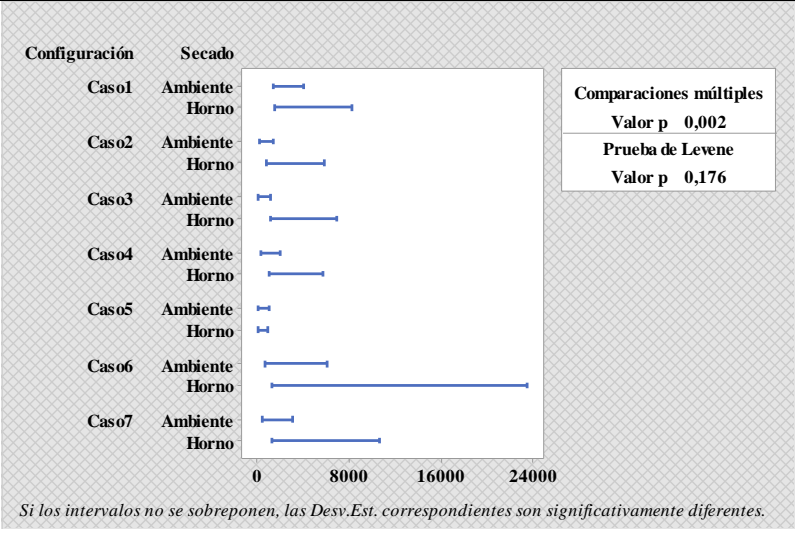
**Fuente:** Autor

### Prueba de igualdad de varianza

Para la verificación del supuesto de igualdad de varianza de los tratamientos del módulo de elasticidad secante de flexión, empleamos la prueba de Levene.

**Tabla 4.71** Verificación del supuesto de igualdad de varianza del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos del módulo de elasticidad secante de flexión tienen igual varianza.
	$H_1$ : Los tratamientos del módulo de elasticidad secante de flexión no tienen igual varianza.

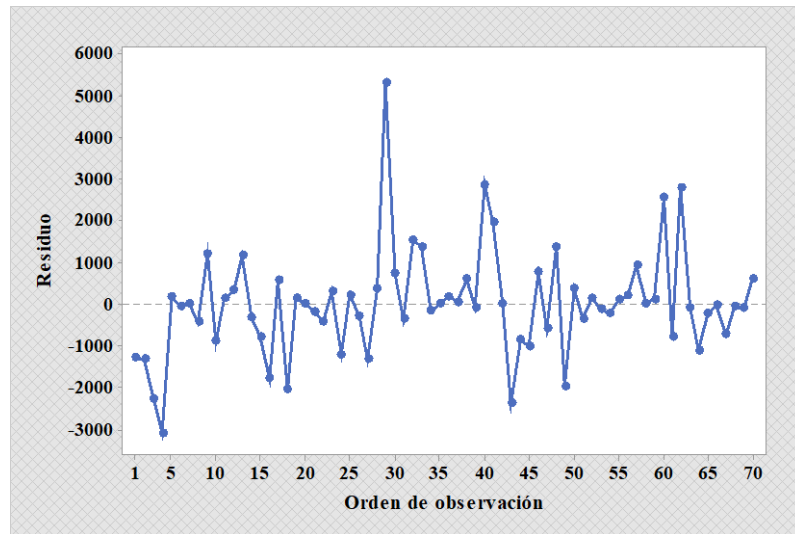
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
			
<b>Estadístico de prueba:</b> Levene = 1.43		<b>Valor-p</b> = 0.176	
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los tratamientos del módulo de elasticidad secante de flexión <b>tienen igual varianza.</b>		
<b>Nota:</b>	Los datos requieren verificación después de la transformación por falta de normalidad.		

**Fuente:** Autor

Tras su aplicación se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.71, se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.248 y 0.05, respectivamente.

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos del módulo de elasticidad secante de flexión, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.24, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia de los residuos de esta propiedad.



**Figura 4.24** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos del módulo de elasticidad secante de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

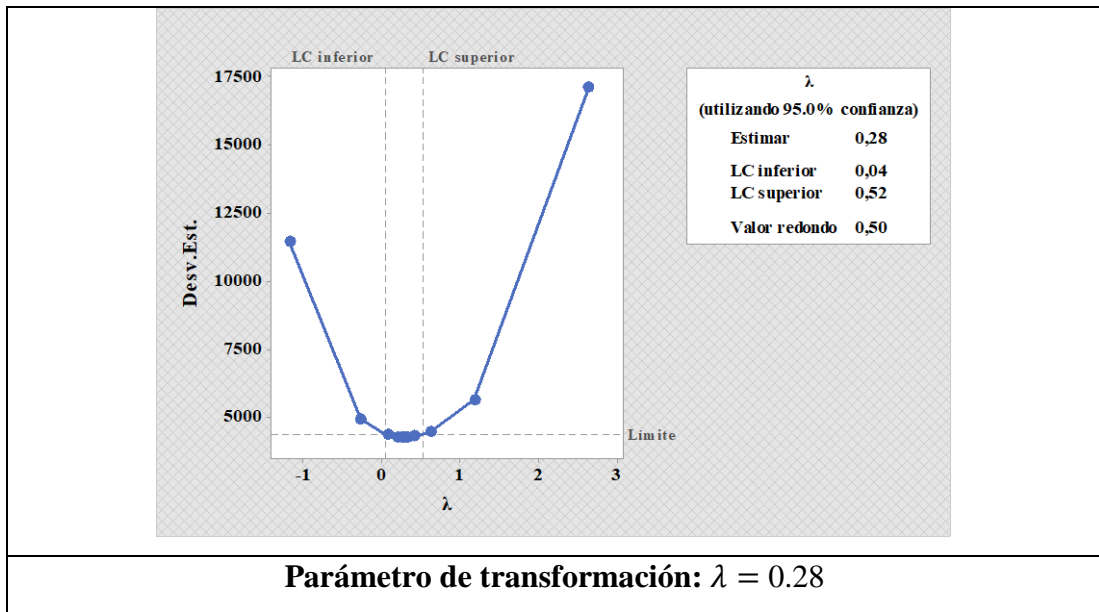
#### 4.2.6.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS

Debido al incumplimiento del supuesto de normalidad, los datos requieren ser transformados, por lo que se especifica el parámetro de transformación  $\lambda$  descrito en la Tabla 4.72 a ser empleado para dicha transformación.

**Tabla 4.72** Transformación de Box-Cox del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
--------------------------------	-----------------	-------------------------	----------





Fuente: Autor

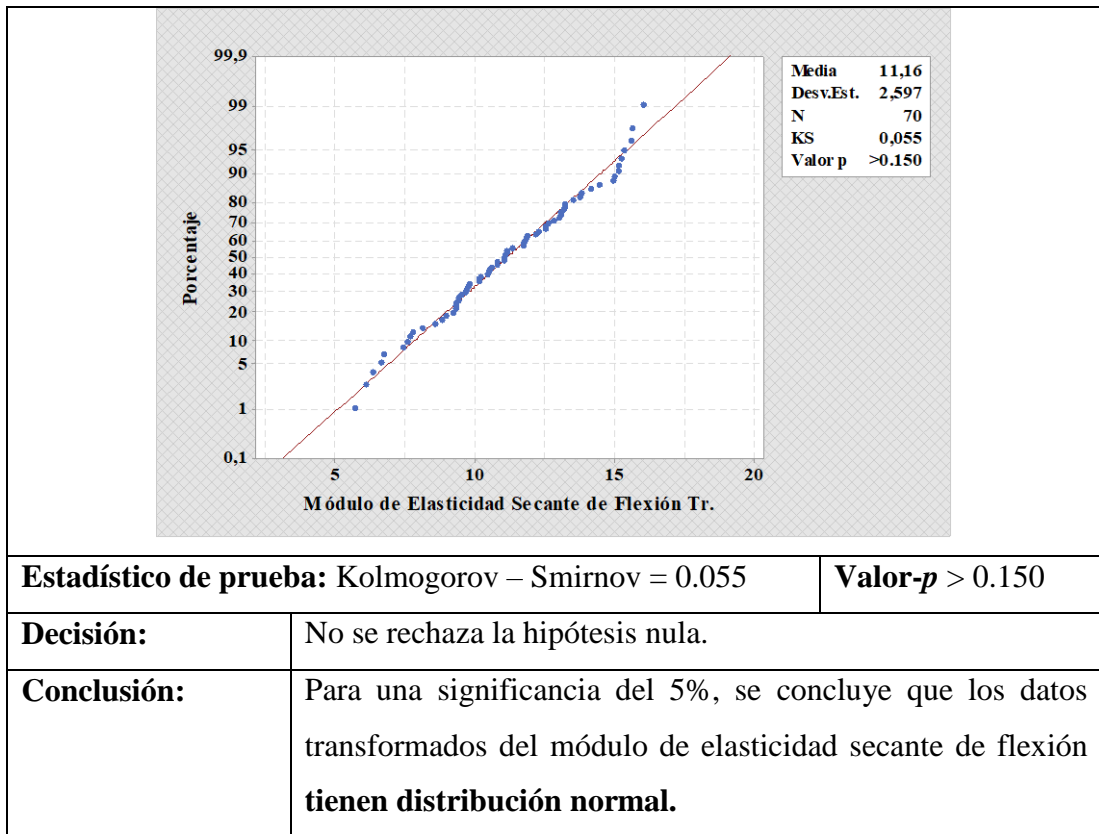
#### 4.2.6.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS

##### Prueba de normalidad

Para verificar el supuesto de normalidad, se aplica nuevamente la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, esta vez en los datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión.

**Tabla 4.73** Verificación del supuesto de normalidad de datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : El módulo de elasticidad secante de flexión tiene distribución normal.		
	$H_1$ : El módulo de elasticidad secante de flexión no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$



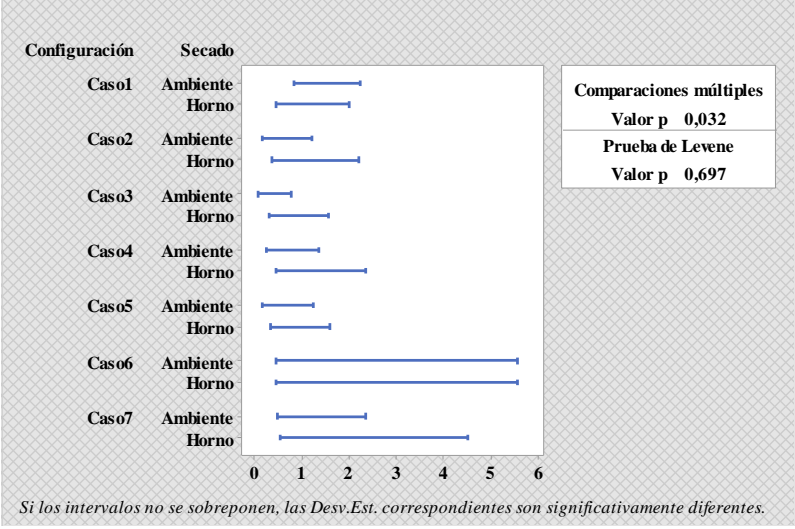
Fuente: Autor

El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.73, aclara que los datos transformados cumplen con el supuesto de normalidad, ya que se requerir un valor-p mayor o igual a 0.05 para no rechazar  $H_0$ , en este caso el valor-p es mayor que 0.150.

### Prueba de igualdad de varianza

Para verificar el supuesto de igualdad de varianza en los tratamientos de los datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión, empleamos la prueba de Levene, tras su aplicación se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, al igual que el caso sin transformar, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.74, se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.697 y 0.05, respectivamente.

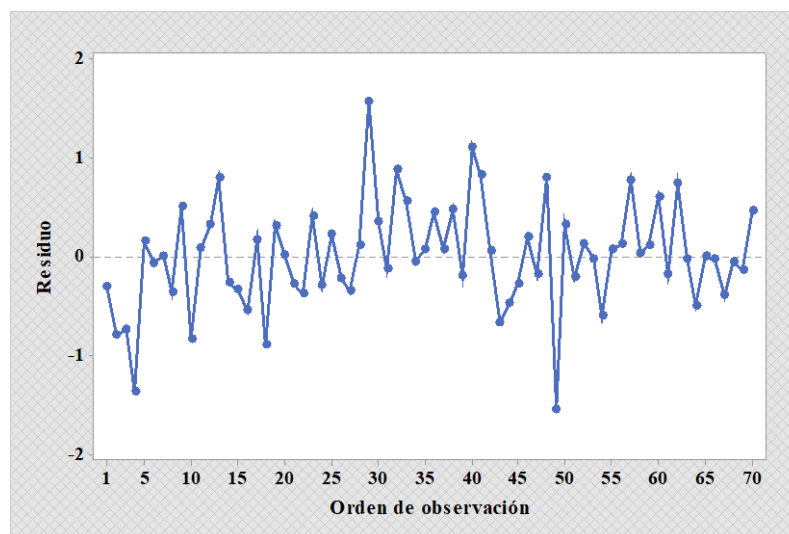
**Tabla 4.74** Verificación del supuesto de igualdad de varianza de datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos del esfuerzo máximo de tracción no tienen igual varianza.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
			
<b>Estadístico de prueba:</b> Levene = 0.76			<b>Valor-p</b> = 0.697
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los tratamientos de los datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión <b>tienen igual varianza.</b>		

Fuente: Autor

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos de los datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.25, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia de residuos.



**Figura 4.25** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de datos transformados del módulo de elasticidad secante de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

#### 4.2.6.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

##### **Diseño completamente aleatorizado**

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación del módulo de elasticidad secante de flexión la configuración del material y el error aleatorio.

**Tabla 4.75** ANOVA para el DCA del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	254.89	6	42.48	12.72	0.000
Error	210.48	63	3.34		
Total	465.37	69			

**Fuente:** Autor

En el análisis de varianza en la Tabla 4.75 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos.

Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.75, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, además de este estadístico también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste, los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.76.

**Tabla 4.76** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
54.77 %	50.46 %

Fuente: Autor

### Diseño en bloques completos al azar

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los factores anteriormente mencionados. El análisis de varianza de este diseño del módulo de elasticidad secante de flexión se especifica en la Tabla 4.77.

**Tabla 4.77** ANOVA para el DBCA del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	$F_0$	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	254.89	6	42.48	34.89	0.000
Tipo de Secado	135.00	1	135.00	110.88	0.000
Error	75.48	62	1.22		
Total	465.37	69			

Fuente: Autor

Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ambos factores influyen significativamente en esta propiedad, también se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.78.

**Tabla 4.78** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
83.78 %	81.95 %

Fuente: Autor

### Diseño Factorial Completo

Al aplicar este diseño experimental se tiene presente que se requiere igual interés en ambos factores a analizar: la configuración y el tipo de secado, dentro del mismo también se incluye el efecto asociado a la interacción de los factores anteriormente mencionado, por lo que dependiendo de los resultados del ANOVA se establece si este contribuye significativamente o no al módulo de elasticidad secante de flexión.

**Tabla 4.79** ANOVA para el Diseño factorial completo del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Modelo	445.45	13	34.27	96.32	0.000
Configuración	254.89	6	42.48	119.42	0.000
Tipo de Secado	135.00	1	135.00	379.49	0.000
Conf. * Secado	55.56	6	9.26	26.03	0.000
Error	19.92	56	0.36		
Total	465.37	69			

Fuente: Autor

De acuerdo a la Tabla 4.79 se puede entender que los efectos de los factores configuración, tipo de secado y la interacción de estos factores, son significativos; además se deduce que existen diferencias significativas en los tratamientos planteados.

**Tabla 4.80** Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
95.72 %	94.73 %

Fuente: Autor

En la Tabla 4.80 se describen los coeficientes de determinación para el Diseño Factorial Completo, notamos que presenta un ajuste mucho mejor que modelos anteriormente analizados.

#### 4.2.6.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE

##### Comparación de coeficientes de determinación

Para seleccionar el modelo y así el diseño que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.81.

**Tabla 4.81** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado al módulo de elasticidad secante de flexión.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
$R^2$	54.77 %	83.78 %	95.72 %
$R^2_{aj}$	50.46 %	81.95 %	94.73 %

Fuente: Autor

Es claramente apreciable que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica el 95.72% de la variabilidad del módulo de elasticidad

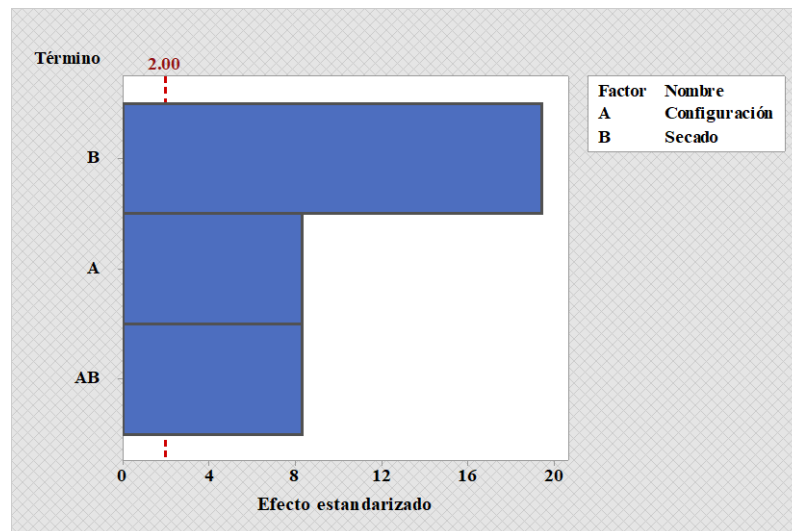
secante de flexión, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

### Resultados del análisis del diseño factorial del módulo de elasticidad secante de flexión.

Para representar los efectos que influyen en el módulo de elasticidad secante de flexión, estos se muestran en la Figura 4.26, esta ilustración detalla que son estadísticamente significativos los efectos del factor B, correspondiente al tipo de secado, llegando a ser los efectos más grandes sobre esta propiedad.

Por debajo de los efectos del factor B e igual estadísticamente significativos se encuentran los efectos del factor A y los efectos de la interacción AB, que pertenecen a la configuración y a la interacción entre la configuración y el tipo de secado, respectivamente.

Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.79, se puede concluir claramente que se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia suficiente en los datos.

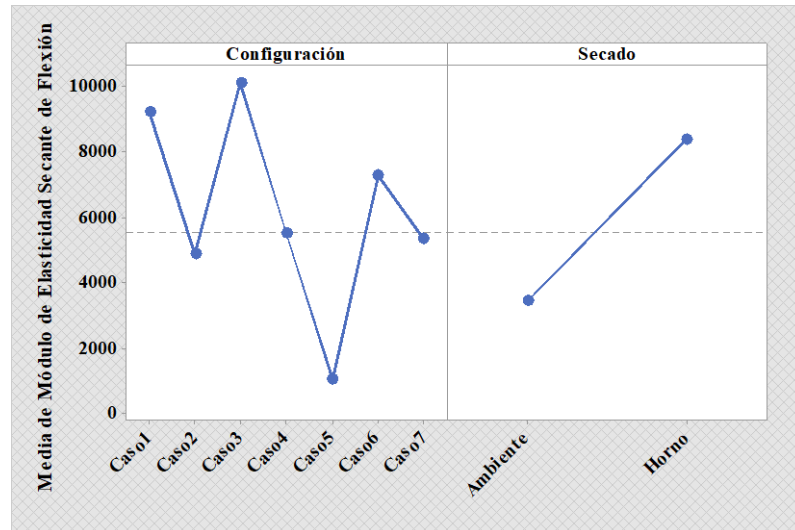


**Figura 4.26** Diagrama de Pareto de los efectos para el módulo de elasticidad secante de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software



Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.27 en la que se puede corroborar que predomina de manera evidente entre la mayoría de niveles la influencia de los efectos del tipo de secado sobre el módulo de elasticidad secante de flexión.

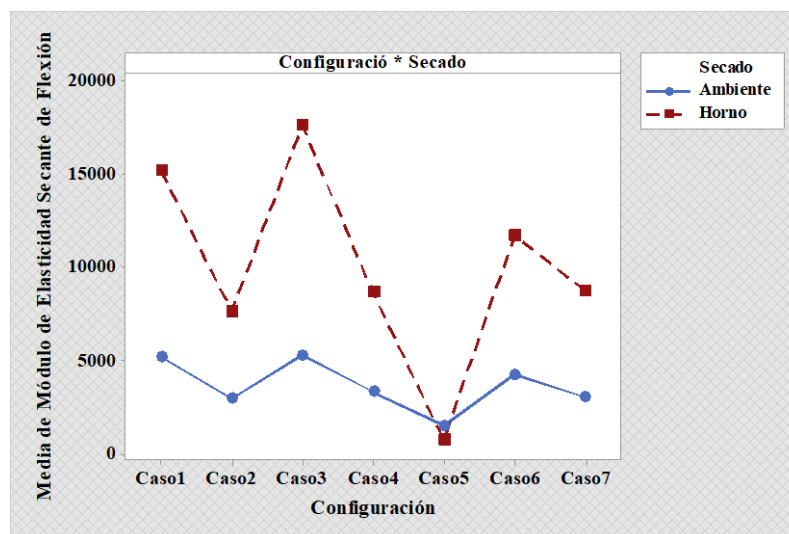


**Figura 4.27** Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad secante de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

De la misma forma representamos la interacción de los efectos en la Figura 4.28, donde notamos una marcada diferencia entre las pendientes de cada par de líneas entre la mayoría de niveles de la configuración, por lo que se confirma que existe interacción entre los factores configuración y tipo de secado.

Haciendo un análisis más profundo a manera de ejemplo, se puede citar el Caso 5 y Caso 6, en donde para el secado al Ambiente el módulo de elasticidad secante de flexión aumenta ligeramente, por lo que existe una pequeña diferencia entre ambos casos, sin embargo para el secado al Horno la diferencia es más considerable, ya que en el Caso 6 el esfuerzo es por mucho mayor al del Caso 5, por ello es que se entiende que el factor tipo de secado influye determinadamente sobre el valor que el módulo de elasticidad secante de flexión tendrá en cada configuración.



**Figura 4.28** Gráfica de interacción para el módulo de elasticidad secante de flexión.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Debido a la conclusión del ANOVA del Diseño Factorial Completo del módulo de elasticidad secante de flexión, es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la deseabilidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

#### 4.2.6.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión factorial del Diseño Factorial Completo se estiman las respuestas predichas del módulo de elasticidad secante de flexión, las cuales son la herramienta clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.82.

**Tabla 4.82** Respuestas predichas del módulo de elasticidad secante de flexión.

Factores		Respuestas predichas [MPa]
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	5145.841
Caso 2	Ambiente	2914.889
Caso 3	Ambiente	5250.363

Caso 4	Ambiente	3283.132
Caso 5	Ambiente	1468.695
Caso 6	Ambiente	4194.244
Caso 7	Ambiente	2998.428
Caso 1	Horno	15161.312
Caso 2	Horno	7601.904
Caso 3	Horno	17563.577
Caso 4	Horno	8587.961
Caso 5	Horno	710.975
Caso 6	Horno	11661.356
Caso 7	Horno	8728.500

Fuente: Autor

### Cálculo de la deseabilidad individual

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{m\acute{a}x}$  e inferior  $y_{m\acute{i}n}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.83.

**Tabla 4.83** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas del módulo de elasticidad secante de flexión.

Respuestas observadas		Respuestas predichas	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
495.37 MPa	20156.01 MPa	710.975 MPa	17563.577 MPa

Fuente: Autor

Es así que se considera el valor del mínimo observado como la especificación inferior y el valor del máximo predicho como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es maximizar la respuesta de salida, empelando la ecuación 2.16, se calculan las deseabilidades individuales, las cuales se visualizan en la Tabla 4.84.

**Tabla 4.84** Deseabilidad individual del módulo de elasticidad secante de flexión.

<b>Factores</b>		<b><math>d_6</math></b>
<b>Configuración</b>	<b>Tipo de Secado</b>	
Caso 1	Ambiente	0.2725
Caso 2	Ambiente	0.1418
Caso 3	Ambiente	0.2786
Caso 4	Ambiente	0.1633
Caso 5	Ambiente	0.0570
Caso 6	Ambiente	0.2167
Caso 7	Ambiente	0.1467
Caso 1	Horno	0.8593
Caso 2	Horno	0.4164
Caso 3	Horno	1.0000
Caso 4	Horno	0.4741
Caso 5	Horno	0.0126
Caso 6	Horno	0.6542
Caso 7	Horno	0.4824

**Fuente:** Autor

Con las deseabilidades individuales se puede estimar que la combinación óptima individual para el módulo de elasticidad secante de flexión es el Caso 3, secado al Horno.

#### **4.2.7 ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA**

##### **4.2.7.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS**

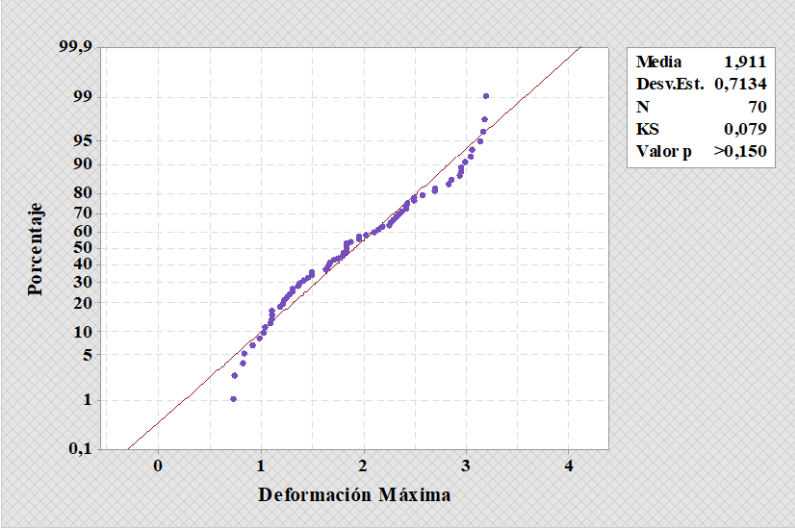
Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

### Prueba de normalidad

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad en los datos de la deformación máxima. El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.85, aclara que los datos cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este mayor que 0.150.

**Tabla 4.85** Verificación del supuesto de normalidad de la deformación máxima.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : La deformación máxima tiene distribución normal.		
	$H_1$ : La deformación máxima no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
			
<b>Estadístico de prueba:</b> Kolmogorov – Smirnov = 0.079			<b>Valor-<math>p</math></b> > 0.150
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los datos de la deformación máxima <b>tienen distribución normal.</b>		

Fuente: Autor

## Prueba de igualdad de varianza

Para la verificación del supuesto de igualdad de varianza en los tratamientos de la deformación máxima, empleamos la prueba de Levene, después de su aplicación, se indica que la varianza de los tratamientos no tiene diferencias significativas, por lo que no se puede rechazar  $H_0$ , esto se describe en la Tabla 4.86, se aclara que la significancia calculada es mayor que la significancia dada, en valores de 0.911 y 0.05, respectivamente.

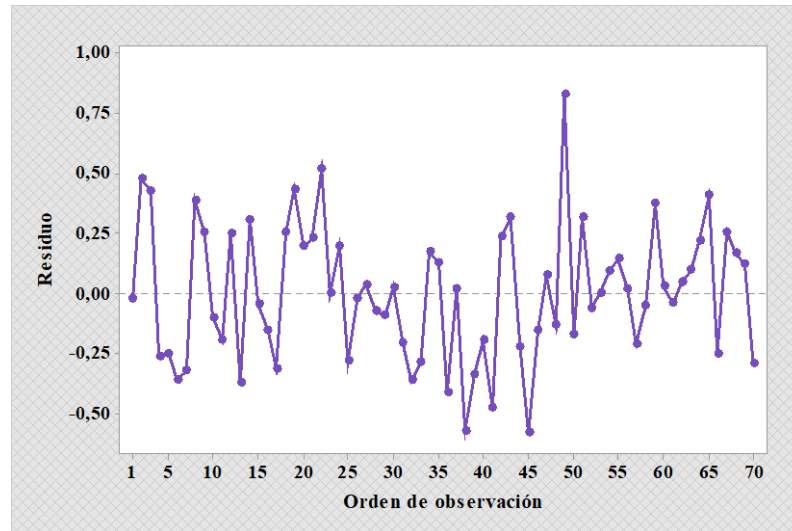
**Tabla 4.86** Verificación del supuesto de igualdad de varianza de la deformación máxima.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : Los tratamientos de la deformación máxima tienen igual varianza.		
	$H_1$ : Los tratamientos de la deformación máxima no tienen igual varianza.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 70$
<b>Estadístico de prueba:</b> Levene = 0.51			<b>Valor-p</b> = 0.911
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los tratamientos de la deformación máxima <b>tienen igual varianza.</b>		

Fuente: Autor

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos de la deformación máxima, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.29, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia en los residuos de esta propiedad.



**Figura 4.29** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la deformación máxima.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

#### 4.2.7.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS

No se requiere transformar los datos de la deformación máxima ya que cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### 4.2.7.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS

No se pueden verificar los supuestos en los datos transformados ya que no fue necesario transformar los datos originales pues cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

#### 4.2.7.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

##### Diseño completamente aleatorizado

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación de la deformación máxima, la configuración del material y el error aleatorio, en el análisis de varianza en la Tabla 4.87 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos.

**Tabla 4.87** ANOVA para el DCA de la deformación máxima.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	21.489	6	3.582	16.55	0.000
Error	13.631	63	0.216		
Total	35.120	69			

**Fuente:** Autor

Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.87, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, además de este estadístico, también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste, los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.88.

**Tabla 4.88** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la deformación máxima.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
61.19 %	57.49 %

**Fuente:** Autor



### Diseño en bloques completos al azar

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los factores anteriormente mencionados. El análisis de varianza de este diseño de la deformación máxima se especifica en la Tabla 4.89.

**Tabla 4.89** ANOVA para el DBCA de la deformación máxima.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	21.489	6	3.582	24.88	0.000
Tipo de Secado	4.706	1	4.706	32.69	0.000
Error	8.925	62	0.144		
Total	35.120	69			

Fuente: Autor

Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ambos factores influyen significativamente en la respuesta, también se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.90.

**Tabla 4.90** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la deformación máxima.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
74.59 %	71.72 %

Fuente: Autor

### Diseño Factorial Completo

Al aplicar este diseño experimental se tiene presente que se requiere igual interés en ambos factores a analizar: la configuración y el tipo de secado, dentro del mismo también se incluye el efecto asociado a la interacción de los factores anteriormente

mencionado por lo que dependiendo de los resultados del ANOVA se establece si este contribuye significativamente o no a la deformación máxima.

**Tabla 4.91** ANOVA para el Diseño factorial completo de la deformación máxima

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Modelo	29.616	13	2.278	23.18	0.000
Configuración	21.489	6	3.582	36.44	0.000
Tipo de Secado	4.706	1	4.706	47.88	0.000
Conf. * Secado	3.421	6	0.570	5.80	0.000
Error	5.504	56	0.098		
Total	35.120	69			

**Fuente:** Autor

De acuerdo a la Tabla 4.91 se puede entender que los efectos de los factores configuración, tipo de secado y la interacción de estos factores, son significativamente importantes, además se deduce que los tratamientos planteados son significativamente diferentes.

**Tabla 4.92** Coeficientes de determinación del modelo de regresión factorial general de la deformación máxima.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
84.33 %	80.69 %

**Fuente:** Autor

En la Tabla 4.92 se describen los coeficientes de determinación para el Diseño Factorial Completo, notamos que presenta un ajuste mucho mejor para los datos de la deformación máxima que modelos anteriores.

#### 4.2.7.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE

##### Comparación de coeficientes de determinación

Para seleccionar un diseño como el que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.93.

**Tabla 4.93** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la deformación máxima.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
$R^2$	61.19 %	74.59 %	84.33 %
$R^2_{aj}$	57.49 %	71.72 %	80.69 %

Fuente: Autor

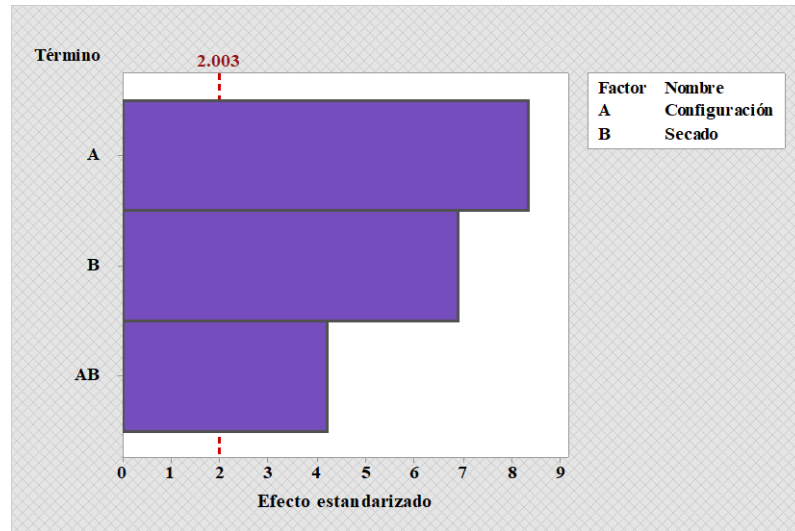
Es claramente apreciable que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica el 84.33% de la variabilidad de la deformación máxima, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

##### Resultados del análisis del diseño factorial de la deformación máxima.

Para representar los efectos que influyen en la deformación máxima, estos se muestran en la Figura 4.30, esta ilustración detalla que son estadísticamente significativos los efectos del factor A, correspondiente a la configuración, llegando a ser los efectos más grandes sobre esta propiedad.

Seguido de los efectos del factor A, se encuentran los efectos del factor B, que corresponde al tipo de secado, luego de los mismos se encuentran los efectos de la interacción AB, correspondiente a la interacción entre la configuración y el tipo de secado; ambos son estadísticamente significativos sobre la deformación máxima.

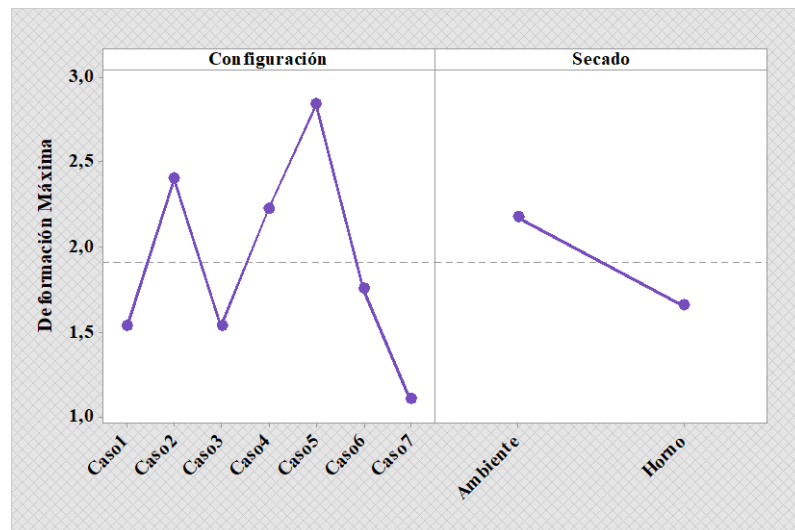
Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.91, se puede concluir claramente que se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia suficiente en los datos.



**Figura 4.30** Diagrama de Pareto de los efectos para la deformación máxima.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.31 en la que se puede corroborar que predomina de manera evidente la influencia de los efectos de la configuración sobre la deformación máxima.

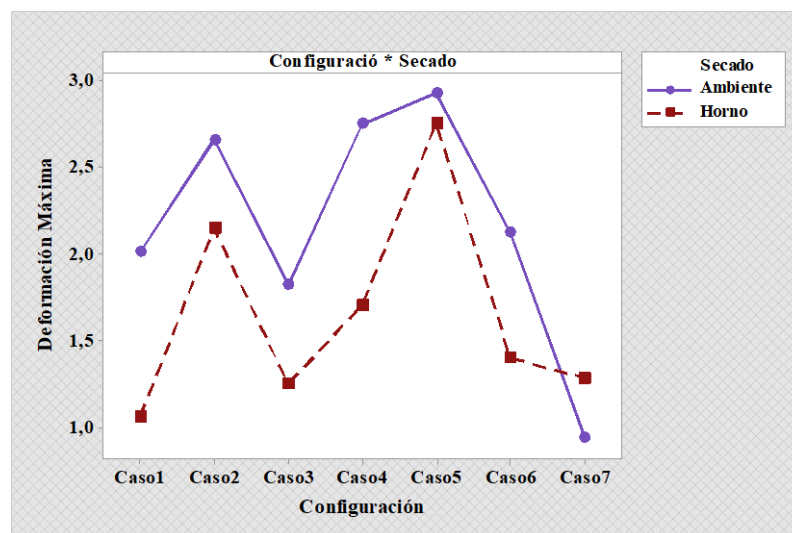


**Figura 4.31** Gráfica de efectos principales para la deformación máxima.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

De la misma forma representamos la interacción de los efectos en la Figura 4.32, donde notamos una marcada diferencia entre las pendientes de cada par de líneas entre la mayoría de niveles de la configuración, por lo que se confirma que existe interacción entre los factores configuración y tipo de secado.

Haciendo un análisis más profundo a manera de ejemplo, se puede citar el Caso 6 y Caso 7, en donde para el secado al Horno la deflexión disminuye sutilmente, por lo que podemos afirmar que existe una pequeña diferencia entre ambos casos, sin embargo para el secado al Ambiente la diferencia es más grande, ya que en el Caso 7 la deflexión es por mucho menor al del Caso 6, por ello es que se entiende que el factor tipo de secado influye determinadamente sobre el valor que la deflexión tendrá en cada configuración.



**Figura 4.32** Gráfica de interacción para la deformación máxima.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Debido a la conclusión del ANOVA del Diseño Factorial Completo de la deformación máxima, es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la deseabilidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

#### 4.2.7.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión factorial del Diseño Factorial Completo se estiman las respuestas predichas de la deformación máxima, las cuales son la herramienta clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.94.

**Tabla 4.94** Respuestas predichas de la deformación máxima.

<b>Factores</b>		<b>Respuestas predichas [%]</b>
<b>Configuración</b>	<b>Tipo de Secado</b>	
Caso 1	Ambiente	2.006
Caso 2	Ambiente	2.654
Caso 3	Ambiente	1.816
Caso 4	Ambiente	2.744
Caso 5	Ambiente	2.922
Caso 6	Ambiente	2.114
Caso 7	Ambiente	0.934
Caso 1	Horno	1.056
Caso 2	Horno	2.140
Caso 3	Horno	1.244
Caso 4	Horno	1.700
Caso 5	Horno	2.748
Caso 6	Horno	1.394
Caso 7	Horno	1.278

**Fuente:** Autor

#### **Cálculo de la deseabilidad individual**

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{m\acute{a}x}$  e inferior  $y_{m\grave{i}n}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.95.

**Tabla 4.95** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la deformación máxima.

Respuestas observadas		Respuestas predichas	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
0.72 %	3.18 %	0.934 %	2.922 %

Fuente: Autor

Es así que se considera el valor del mínimo predicho como la especificación inferior y el valor del máximo observado como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es minimizar la respuesta de salida.

**Tabla 4.96** Deseabilidad individual de la deformación máxima.

Factores		$d_7$
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	0.5227
Caso 2	Ambiente	0.2342
Caso 3	Ambiente	0.6073
Caso 4	Ambiente	0.1941
Caso 5	Ambiente	0.1149
Caso 6	Ambiente	0.4746
Caso 7	Ambiente	1.0000
Caso 1	Horno	0.9457
Caso 2	Horno	0.4630
Caso 3	Horno	0.8620
Caso 4	Horno	0.6589
Caso 5	Horno	0.1923
Caso 6	Horno	0.7952
Caso 7	Horno	0.8468

Fuente: Autor

Empelando la ecuación 2.17, se calculan las deseabilidades individuales, las cuales se visualizan en la Tabla 4.96.

Con las deseabilidades individuales se puede estimar que la combinación óptima individual para la deformación máxima es el Caso 7, secado al Ambiente.

## 4.2.8 ANÁLISIS DE LA ENERGÍA MEDIA DE FALLO

### 4.2.8.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

Teniendo presente el objetivo del análisis a realizar y en términos generales sabiendo que se aplicarán pruebas paramétricas, hay que asegurar que los datos cumplan con los supuestos mencionados en la sección 2.1.4; para contar con la veracidad de los resultados.

Es así que previo a la aplicación de cualquier experimento se procese a realizar las pruebas y análisis respectivos.

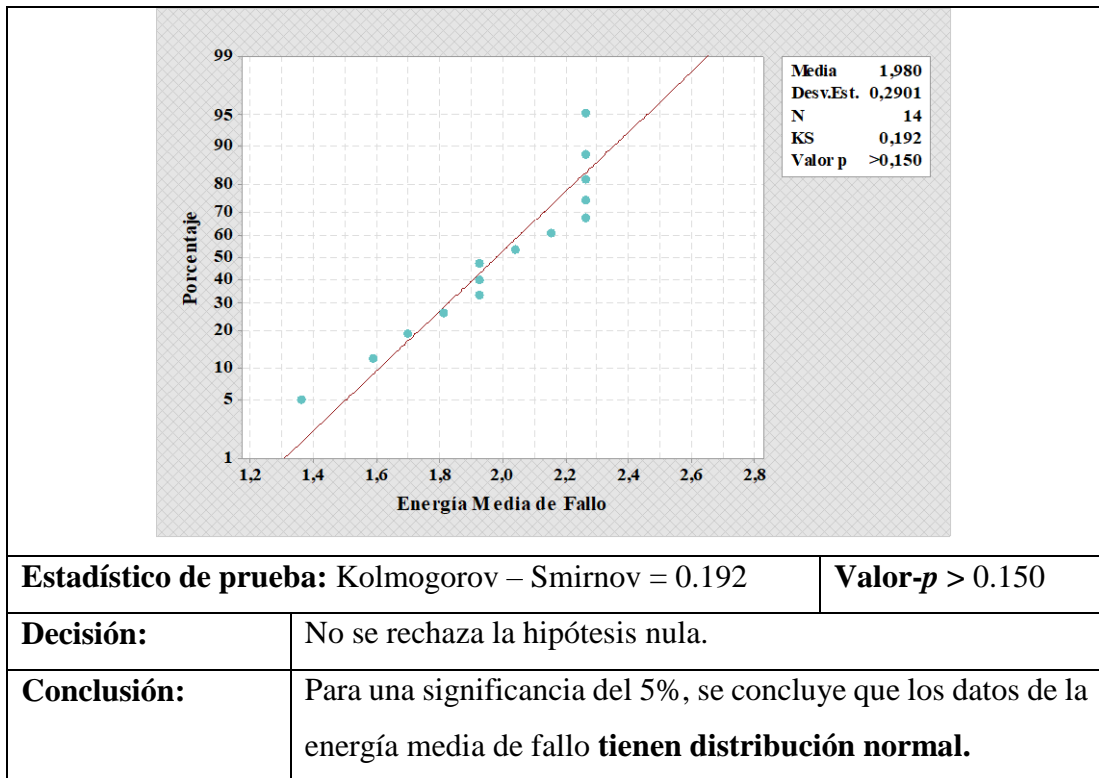
#### Prueba de normalidad

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, para verificar el supuesto de normalidad en los datos de la energía media de fallo. El estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la Tabla 4.19, aclara que los datos cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este mayor que 0.150.

**Tabla 4.97** Verificación del supuesto de normalidad del módulo de elasticidad.

<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : La energía media de fallo tiene distribución normal.		
	$H_1$ : La energía media de fallo no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 14$

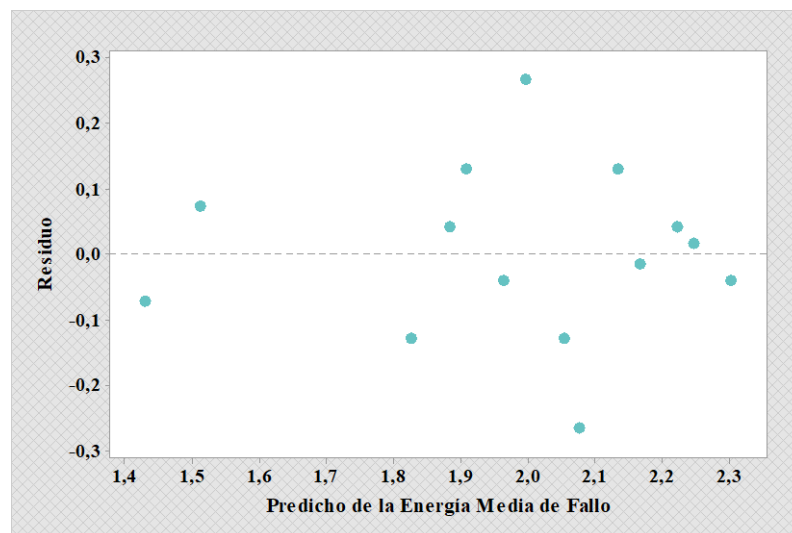




Fuente: Autor

### Verificación de igualdad de varianza

Para verificar que los tratamientos cumplan con el supuesto de igualdad de varianza es necesario que se analice el gráfico de los predichos contra los residuos.



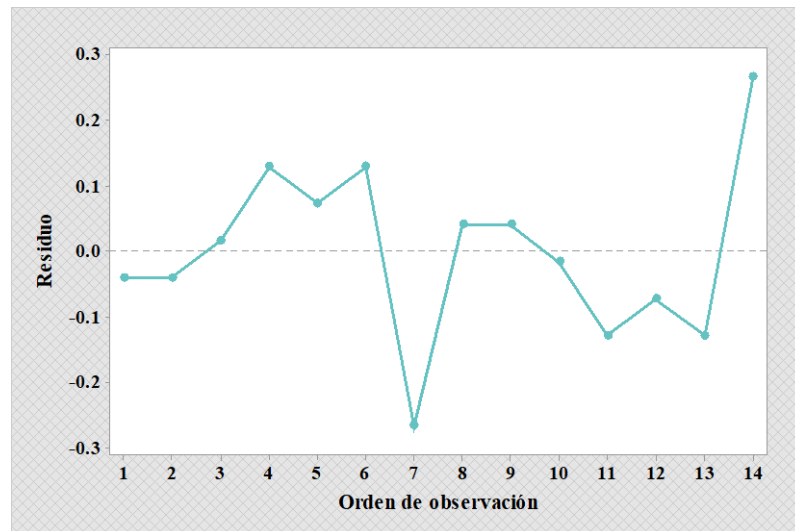
**Figura 4.33** Gráfica de Predichos vs. Residuos de la energía media de fallo.

Fuente: Minitab® Statistical Software

Como se observa en la Figura 4.33 donde podemos notar que los puntos se distribuyen aleatoriamente sin un patrón contundente detectable, esto indica que se cumple el supuesto de igualdad de varianza.

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos de la energía media de fallo, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.34, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia en los residuos de esta propiedad.



**Figura 4.34** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la energía media de fallo.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

### 4.2.8.2 TRANSFORMACIÓN DE DATOS

No se requiere transformar los datos de la energía media de fallo ya que cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

### 4.2.8.3 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DE LOS DATOS TRANSFORMADOS

No se pueden verificar los supuestos en los datos transformados ya que no fue necesario transformar los datos originales pues cumplen con todos los supuestos requeridos para el análisis.

### 4.2.8.4 APLICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES

Para la aplicación de los diseños experimentales se consideró tres diseños que se especifican en la sección 2.1.3, estos son aplicables de acuerdo a los factores planteados. Para poder determinar el diseño que más se ajusta se analizan a continuación:

#### Diseño completamente aleatorizado

Para este diseño se considera como únicas fuentes de variación de la energía media de fallo, la configuración del material y el error aleatorio, en el análisis de varianza en la Tabla 4.98 se puede determinar si existen o no diferencias significativas en los tratamientos.

**Tabla 4.98** ANOVA para el DCA de la energía media de fallo.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	0.845	6	0.141	3.95	0.048
Error	0.250	7	0.036		
Total	1.094	13			

Fuente: Autor

Con el valor- $p$  posterior al análisis descrito en la Tabla 4.98, se concluye que si hay diferencias significativas entre las configuraciones, aunque con un valor muy cercano al límite, además de este estadístico, también nos interesa considerar los coeficientes de determinación para poder tomar una decisión al momento de elegir el mejor ajuste, los coeficientes de determinación se detallan en la Tabla 4.99.

**Tabla 4.99** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DCA de la energía media de fallo.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
77.19 %	57.64 %

Fuente: Autor

### Diseño en bloques completos al azar

Al notar que los datos se pueden ajustar mejor a otro modelo, se procede a aplicar el diseño en bloques completos al azar, tomando en consideración como factor principal a la configuración, mientras que como factor de bloque el tipo de secado, el análisis en este tipo de diseño se restringe a no considerar el efecto de interacción entre los factores anteriormente mencionados. El análisis de varianza de este diseño de la energía media de fallo se especifica en la Tabla 4.100.

**Tabla 4.100** ANOVA para el DBCA de la energía media de fallo.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	$F_0$	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	0.845	6	0.141	3.73	0.067
Tipo de Secado	0.023	1	0.023	0.60	0.466
Error	0.227	6	0.038		
Total	1.094	13			

Fuente: Autor

Con la tabla de ANOVA de este diseño se concluye que ni la configuración ni el tipo de secado influyen significativamente en la respuesta, lo cual contrasta con la conclusión del análisis anterior teniendo que poner claro interés al aumento de otra fuente de variabilidad en el presente modelo. También se analizan los coeficientes de determinación que se describe en la Tabla 4.101.

**Tabla 4.101** Coeficientes de determinación del modelo de regresión del DBCA de la energía media de fallo.

<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación ajustado (<math>R^2_{aj}</math>)</b>
79.28 %	55.11 %

Fuente: Autor

### Diseño Factorial Completo

Para la aplicación del Diseño Factorial Completo como se describe en el punto 2.1.3.3 de la fundamentación teórica, es necesario que existan al menos dos réplicas para evitar que el cuadrado medio de error se anule, truncando el cálculo de los estadísticos necesarios para análisis de la varianza del Diseño Factorial Completo.

#### 4.2.8.5 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DEL DISEÑO QUE MEJOR SE AJUSTE

##### Comparación de coeficientes de determinación

Para seleccionar un diseño como el que más se ajusta a los datos, basta con comparar los coeficientes de determinación obtenidos anteriormente, para una decisión más práctica se los contrasta en la Tabla 4.102.

**Tabla 4.102** Coeficientes de determinación de cada diseño aplicado a la energía media de fallo.

	<b>Diseño completamente aleatorizado</b>	<b>Diseño en bloques completos al azar</b>	<b>Diseño Factorial Completo</b>
$R^2$	77.19 %	79.28 %	-
$R^2_{aj}$	57.64 %	55.11 %	-

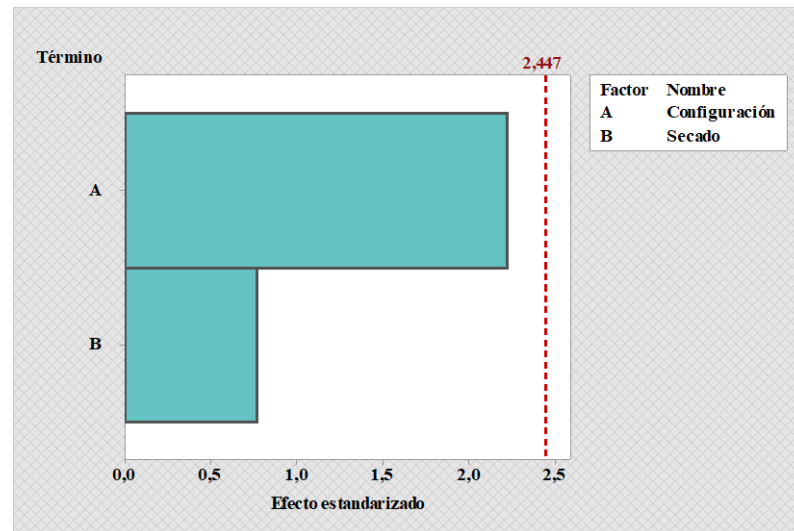
Fuente: Autor

Es claramente apreciable que el modelo de regresión del Diseño en Bloques Completos al Azar explica el 79.28 % de la variabilidad de la energía media de fallo, por lo que se considera el modelo que mejor se ajusta a los datos analizados.

### Resultados del análisis del diseño en bloques completos al azar de la energía media de fallo.

Para representar los efectos que influyen en el módulo de elasticidad, estos se muestran en la Figura 4.35, esta ilustración detalla que son estadísticamente insignificantes los efectos del factor A y del factor B, correspondiente a la configuración y al tipo de secado, respectivamente, pudiendo llegar a considerarse el más próximos a influir en la energía media de fallo el factor A.

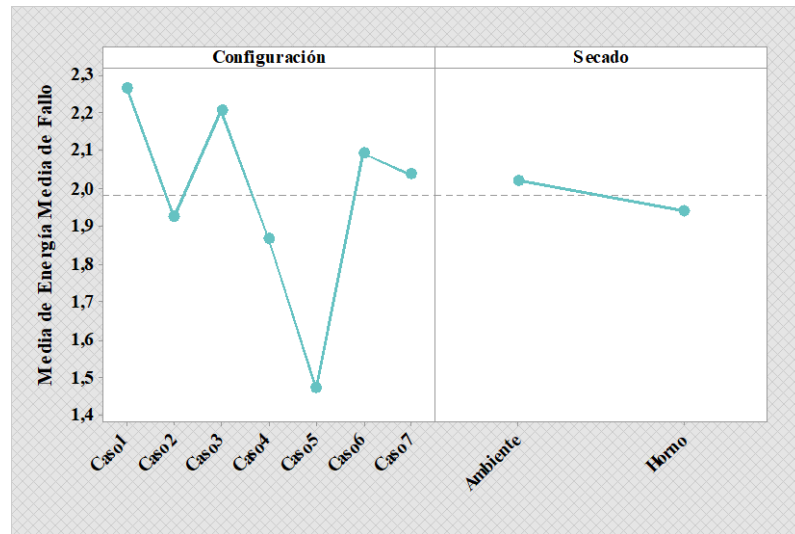
Este diagrama corrobora la información brindada por el análisis de la varianza descrito en la Tabla 4.100, se puede concluir claramente que no se puede rechazar  $H_0$  debido a evidencia insuficiente en los datos.



**Figura 4.35** Diagrama de Pareto de los efectos para la energía media de fallo.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Realizando una interpretación más específica tenemos la gráfica de los efectos principales en la Figura 4.36, en la que se puede corroborar que los efectos de la configuración están cerca de influir en la energía media de fallo, lejos de esto, los efectos del tipo de secado apenas influyen en esta propiedad.



**Figura 4.36** Gráfica de efectos principales para la energía media de fallo.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Debido a la conclusión del ANOVA del diseño en bloques completos al azar de la energía media de fallo, no es estricto efectuar el análisis de las respuestas predichas para el cálculo de la deseabilidad individual ya que las diferencias existentes entre los tratamientos son estadísticamente insignificantes, sin embargo para contar con una apreciación más exacta al momento de realizar la optimización simultanea de las respuestas el investigador ve necesario incluir en el cálculo la deseabilidad individual de esta respuesta.

#### 4.2.8.6 ANÁLISIS DE RESPUESTAS PREDICHAS

Con el modelo de regresión del diseño en bloques completos al azar se estiman las respuestas predichas de la energía media de fallo, las cuales son la herramienta clave para proceder a la aplicación de la función de deseabilidad. Estas respuestas predichas se detallan en la Tabla 4.103.

**Tabla 4.103** Respuestas predichas de la energía media de fallo.

Factores		Respuestas predichas [J]
Configuración	Tipo de Secado	
Caso 1	Ambiente	2.303
Caso 2	Ambiente	1.963
Caso 3	Ambiente	2.246
Caso 4	Ambiente	1.907
Caso 5	Ambiente	1.511
Caso 6	Ambiente	2.133
Caso 7	Ambiente	2.077
Caso 1	Horno	2.222
Caso 2	Horno	1.883
Caso 3	Horno	2.165
Caso 4	Horno	1.826
Caso 5	Horno	1.430
Caso 6	Horno	2.052
Caso 7	Horno	1.996

Fuente: Autor

### Cálculo de la deseabilidad individual

Previo al cálculo de la deseabilidad individual, es necesario definir las especificaciones superior  $y_{máx}$  e inferior  $y_{mín}$ , las cuales a criterio del investigador se seleccionan de los máximos y mínimos predichos y observados que se detallan en la Tabla 4.29.

**Tabla 4.104** Máximos y mínimos de las respuestas observadas y predichas de la energía media de fallo.

Respuestas observadas		Respuestas predichas	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1.3574 J	2.2624 J	1.4302 J	2.3028 J

Fuente: Autor



Es así que se considera el valor del mínimo observado como la especificación inferior y el valor del máximo predicho como la especificación superior, también se asigna a la constante que define la forma de la función de deseabilidad  $r$  el valor de 1, luego de eso y teniendo en cuenta que el objetivo es maximizar la respuesta de salida, empelando la ecuación 2.16, se calculan las deseabilidades individuales, las cuales se visualizan en la Tabla 4.105.

**Tabla 4.105** Deseabilidad individual de la energía media de fallo.

<b>Factores</b>		<b><math>d_8</math></b>
<b>Configuración</b>	<b>Tipo de Secado</b>	
Caso 1	Ambiente	1.0000
Caso 2	Ambiente	0.6410
Caso 3	Ambiente	0.9402
Caso 4	Ambiente	0.5812
Caso 5	Ambiente	0.1624
Caso 6	Ambiente	0.8205
Caso 7	Ambiente	0.7607
Caso 1	Horno	0.9145
Caso 2	Horno	0.5556
Caso 3	Horno	0.8547
Caso 4	Horno	0.4957
Caso 5	Horno	0.0770
Caso 6	Horno	0.7350
Caso 7	Horno	0.6752

**Fuente:** Autor

Con las deseabilidades individuales se puede estimar que la combinación óptima individual para la energía media de fallo es el Caso 1, secado al Ambiente.

#### 4.2.9 CÁLCULO DE LA DESEABILIDAD GLOBAL

Para contar con una única respuesta analizable de manera objetiva se realiza el cálculo de la deseabilidad global, la cual incluye todas las deseabilidades individuales obtenidas mediante los análisis anteriormente descritos.

Para el cálculo de la deseabilidad global se disponen las deseabilidades de cada propiedad mecánica analizada, estas se detallan en la Tabla 4.18, Tabla 4.30, Tabla 4.42, Tabla 4.54, Tabla 4.69, Tabla 4.84, Tabla 4.96 y Tabla 4.105.

**Tabla 4.106** Cálculo de la deseabilidad global de las propiedades mecánicas.

Factores		Deseabilidades individuales								DG	Rank
Conf.	Tipo de Secado	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$		
Caso 1	Ambiente	1.000	0.736	0.691	0.519	0.555	0.273	0.523	1.000	0.617	4
Caso 2	Ambiente	0.687	0.700	0.438	0.208	0.401	0.142	0.234	0.641	0.373	10
Caso 3	Ambiente	0.616	0.670	0.401	0.685	0.512	0.279	0.607	0.940	0.557	6
Caso 4	Ambiente	0.436	0.612	0.264	0.200	0.367	0.163	0.194	0.581	0.314	12
Caso 5	Ambiente	0.651	0.618	0.485	0.185	0.193	0.057	0.115	0.162	0.229	13
Caso 6	Ambiente	0.902	1.000	0.349	0.510	0.459	0.217	0.475	0.821	0.530	7
Caso 7	Ambiente	0.279	0.520	0.159	1.000	0.103	0.147	1.000	0.761	0.357	11
Caso 1	Horno	0.837	0.602	0.715	0.962	0.707	0.859	0.946	0.915	0.808	2
Caso 2	Horno	0.789	0.428	1.000	0.463	0.720	0.416	0.463	0.556	0.576	5
Caso 3	Horno	0.824	0.661	0.620	0.864	1.000	1.000	0.862	0.855	0.825	1
Caso 4	Horno	0.194	0.334	0.304	0.604	0.643	0.474	0.659	0.496	0.431	9
Caso 5	Horno	0.048	0.051	0.684	0.481	0.027	0.013	0.192	0.077	0.089	14
Caso 6	Horno	0.620	0.517	0.590	0.862	0.719	0.654	0.795	0.735	0.678	3
Caso 7	Horno	0.211	0.263	0.433	0.857	0.482	0.482	0.847	0.675	0.478	8

Fuente: Autor

Se especifica la importancia relativa  $w_i$  de cada una de las propiedades con el valor de 1, para mantener un criterio de importancia equitativa entre todas las respuestas; el valor calculado de la deseabilidad global se define en la Tabla 4.106, donde se puede señalar como punto óptimo simultáneo al correspondiente al que combina la

Configuración Caso 3, Tipo de Secado al Horno, con una deseabilidad global de 0.8250.

### 4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Para verificar la hipótesis “El análisis estadístico del material híbrido con fibra de vidrio y abacá en matriz polimérica de resina poliéster permitirá la optimización de propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto”, se plantea realizar el análisis de varianza de los valores de deseabilidad global, ya que esta abarca las múltiples propiedades mecánicas analizadas en el numeral 4.2; con este análisis se pretende contrastar la significancia calculada y la significancia predefinida.

#### 4.3.1 ANÁLISIS DE LA DESEABILIDAD GLOBAL

La deseabilidad global tiene la capacidad de expresar de manera conjunta lo que se anhela conseguir de cada propiedad mecánica analizada, por lo que, si el objetivo de una optimización se enfoca en sentido opuesto al resto, la deseabilidad individual de esa propiedad la califica bajo la mismo pauta que las otras.

Es así que el coeficiente de deseabilidad global, se mantiene siempre objetivo, a la par de los intereses que el investigador tiene sobre cada propiedad; logrando distinguir de un único grupo de valores que resumen las 8 propiedades tratadas, el valor más deseable, optimizado así todas las propiedades mecánicas analizadas.

**Tabla 4.107** Deseabilidad global de las propiedades mecánicas.

<b>Factores</b>		<b>Deseabilidad Global (DG)</b>	<b>Rank</b>
<b>Configuración</b>	<b>Tipo de Secado</b>		
Caso 1	Ambiente	0.6166	4
Caso 2	Ambiente	0.3728	10
Caso 3	Ambiente	0.5566	6
Caso 4	Ambiente	0.3143	12
Caso 5	Ambiente	0.2285	13

Caso 6	Ambiente	0.5298	7
Caso 7	Ambiente	0.3571	11
Caso 1	Horno	0.8083	2
Caso 2	Horno	0.5757	5
Caso 3	Horno	0.8250	1
Caso 4	Horno	0.4306	9
Caso 5	Horno	0.0894	14
Caso 6	Horno	0.6783	3
Caso 7	Horno	0.4782	8

**Fuente:** Autor

Hay que entender que si el coeficiente de deseabilidad global de la Tabla 4.107, abarca las 8 propiedades mecánicas, ese valor, por sí solo no indica si existe una clara diferencia estadística entre cada combinación de factores, por lo que afirmar de manera exclusiva la existencia de una combinación que resalte del resto, no estaría estadísticamente probada.

Es así que para lograr verificar la existencia de una media muestral diferente del resto, se pretende efectuar el análisis de varianza correspondiente a los datos de la deseabilidad global.

#### **4.3.1.1 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS**

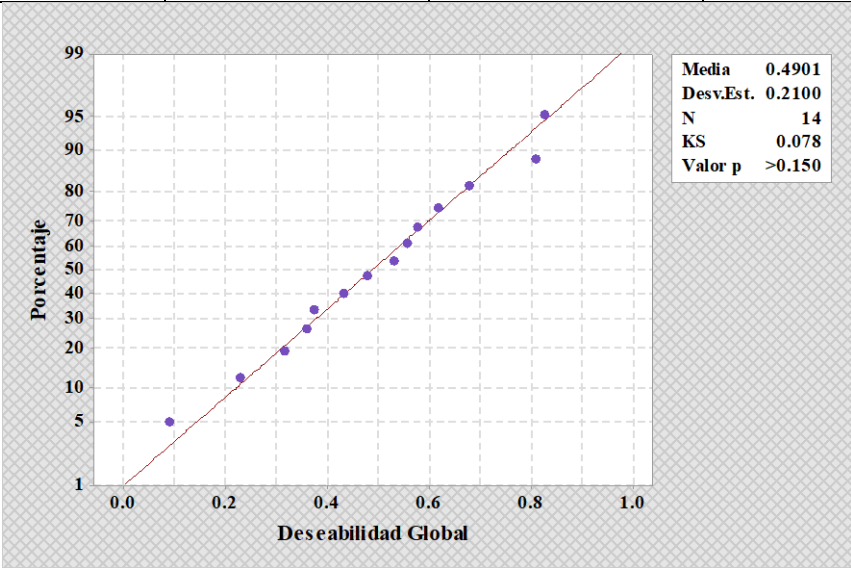
Para no perder la precisión de los resultados, previo a la realizar el análisis de la varianza, se verifican los supuestos paramétricos de los datos de la deseabilidad global:

##### **Prueba de normalidad**

Se emplea la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, el estadístico de prueba y la significancia calculada, como se puede observar en la

Tabla **4.108**, aclara que los datos cumplen con el supuesto de normalidad, ya que para no rechazar  $H_0$ , es necesario que el valor- $p$  sea mayor o igual a 0.05, siendo este mayor que 0.150.

**Tabla 4.108** Verificación del supuesto de normalidad de la deseabilidad global.

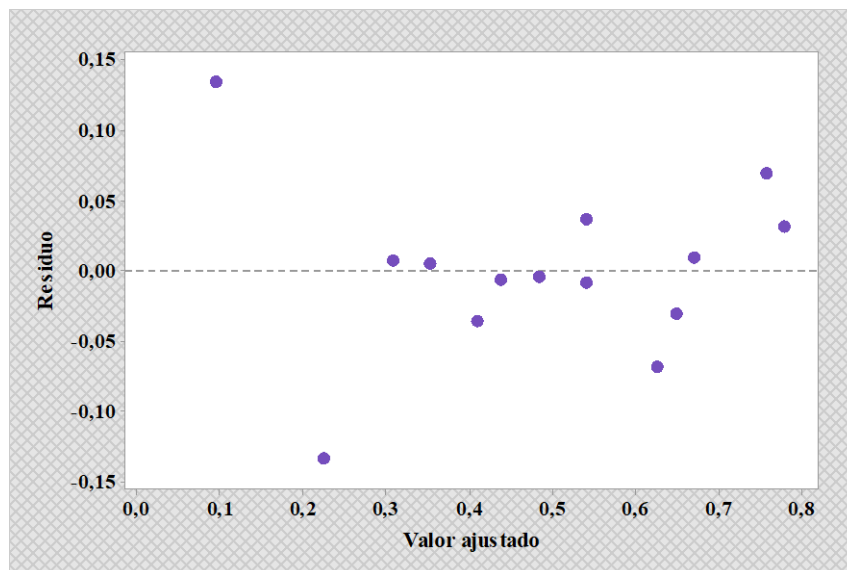
<b>Hipótesis:</b>	$H_0$ : La deseabilidad global tiene distribución normal.		
	$H_1$ : La deseabilidad global no tiene distribución normal.		
<b>Nivel de significancia:</b>	$\alpha = 0.05$	<b>Número de datos:</b>	$N = 14$
			
<b>Estadístico de prueba:</b> Kolmogorov – Smirnov = 0.078			<b>Valor-p</b> > 0.150
<b>Decisión:</b>	No se rechaza la hipótesis nula.		
<b>Conclusión:</b>	Para una significancia del 5%, se concluye que los datos de la deseabilidad global <b>tienen distribución normal.</b>		

Fuente: Autor

### Verificación de igualdad de varianza

Para verificar que los tratamientos cumplan con el supuesto de igualdad de varianza es necesario que se analice el gráfico de los predichos contra los residuos.

Como se observa en la Figura 4.37 donde podemos notar que los puntos se distribuyen aleatoriamente sin un patrón contundente detectable, esto indica que se cumple el supuesto de igualdad de varianza.

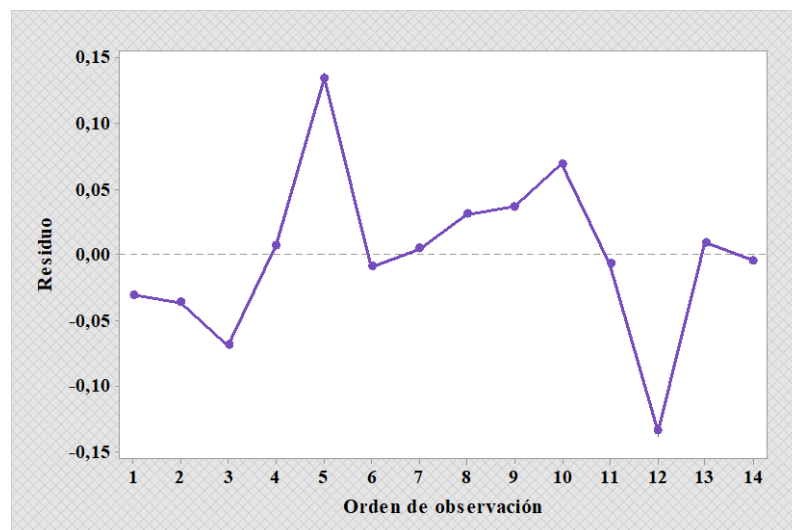


**Figura 4.37** Gráfica de Predichos vs. Residuos de la deseabilidad global.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

### Verificación de independencia de residuos

Para verificar que exista independencia en los residuos de la deseabilidad global, nos apoyamos en la información brindada por la Figura 4.38, la cual nos indica que no existe ninguna tendencia o patrón definido, por lo que se puede concluir que existe independencia en los residuos de esta propiedad.



**Figura 4.38** Gráfica del Orden de observación vs. Residuos de la deseabilidad global.

**Fuente:** Minitab® Statistical Software

Comprobando que los datos de la deseabilidad global cumplan con los supuestos paramétricos se puede efectuar sin inconveniente el análisis de la varianza.

#### 4.3.1.2 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA DESEABILIDAD GLOBAL

El análisis de la varianza en este caso, se realiza de manera similar al diseño en bloques completos al azar, considerando como fuentes de variabilidad a la configuración, el tipo de secado y el error aleatorio.

La hipótesis a probar es la siguiente:

$H_0$ : Las deseabilidades globales medias poblacionales de las configuraciones considerando el tiempo de secado son iguales.

$H_1$ : Al menos dos deseabilidades globales medias poblacionales de las configuraciones considerando el tiempo de secado son diferentes.

El objetivo del ANOVA a más de probar la hipótesis, es descubrir cuál de estos factores afecta significativamente y en qué porcentaje al esfuerzo máximo de tracción, el módulo de elasticidad, la elongación, la deflexión, el esfuerzo máximo de flexión, el módulo de elasticidad secante de flexión, la deformación máxima y la energía media de fallo; simultáneamente.

**Tabla 4.109** ANOVA de la deseabilidad global.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>Valor-<math>p</math></b>
Configuración	0.4634	6	0.0772	9.15	0.008
Tipo de Secado	0.0591	1	0.0591	7.01	0.038
Error	0.0506	6	0.0084		
Total	0.5731	13			

**Fuente:** Autor

Ya efectuado el análisis y con los resultados dispuestos en la Tabla 4.109, se puede constatar lo significativos que resultan ser los factores configuración y tipo de secado para las propiedades mecánicas anteriormente mencionadas.

Al obtener un valor- $p$  igual a 0.008, siendo este menor a 0.05 se rechaza la hipótesis  $H_0$ , por lo que se puede declarar que existen diferencias en los tratamientos, dejando en evidencia que existe al menos un tratamiento mejor que los demás. Esta aseveración concluye como posible el hecho de obtener mediante la metodología estadística aplicada, una combinación que optimice las propiedades mecánicas del material híbrido analizado.

**Tabla 4.110** Contribución de cada factor a la deseabilidad global.

<b>Fuente de variabilidad</b>	<b>Contribución</b>
Configuración	80.85 %
Tipo de Secado	10.32 %
Error	8.83 %
Total	100.00 %

**Fuente:** Autor

Para ser más precisos y de una manera más ampliada, se describe la contribución de cada una de las fuentes de variabilidad de las propiedades en la Tabla 4.110, con todo esto se hace especial énfasis de que el modelo de regresión del ANOVA aplicado, explica un 91.17 % de la variabilidad total de los datos.

Se puntualiza que la configuración del material es el factor que más influye en las propiedades mecánicas del híbrido analizado, llegando a contener el 80.85 % de la variabilidad total de los datos.

### **4.3.1.3 PRUEBA DE CONFIRMACIÓN**

Para tener una visualización más clara de lo que se concluye con el análisis de la varianza se contrastan los valores predichos y los valores experimentales de las



propiedades en el punto óptimo obtenido, la confirmación de los resultados se visualiza en la Tabla 4.111.

Se puede apreciar que los valores predichos están muy cerca a los valores experimentales, por lo tanto, el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo es adecuado para explicar la variabilidad de: el esfuerzo máximo de tracción, el módulo de elasticidad, la elongación, la deflexión, el esfuerzo máximo de flexión, el módulo de elasticidad secante de flexión y la deformación máxima; mientras que el modelo de regresión del Diseño en Bloques Completos al Azar explica adecuadamente la variabilidad de la energía media de fallo.

**Tabla 4.111** Resultados de la prueba de confirmación.

<b>Configuración Caso 3, Secado al Horno</b>		
<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Valores Experimentales</b>	<b>Valores Predichos</b>
Esfuerzo Máximo de Tracción [MPa]	66.908 MPa	66.964 MPa
Módulo de Elasticidad [MPa]	1780.592 MPa	1780.592 MPa
Elongación [%]	3.780 %	3.780 %
Deflexión [mm]	6.549 mm	6.549 mm
Esfuerzo Máximo de Flexión [MPa]	175.260 MPa	174.957 MPa
Módulo de Elasticidad Secante de Flexión [MPa]	17606.456 MPa	17563.577 MPa
Deformación Máxima [%]	1.244 %	1.244 %
Energía Media de Fallo [J]	2.149 J	2.165 J

**Fuente:** Autor

### **4.3.2 VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA APLICADA**

De manera adicional al análisis efectuado, se busca estimar la precisión de la metodología estadística basada en el DOE y la función de deseabilidad, aplicada en este trabajo experimental; con respecto a la metodología de criterios ponderados, presente en el trabajo de investigación con tema: “Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como

Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses” del Ing. Mg. Juan Gilberto Paredes Salinas. [18]

**Tabla 4.112** Tabla de resumen criterios ponderados.

EVALUACIÓN DE COMBINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS													
Tipo de ensayo	Espesor Promedio	Diferencia	TRACCIÓN				FLEXIÓN				IMPACTO		Acepta o no
			Esfuerzo Máximo	Diferencia	Módulo Elasticidad	Diferencia	Esfuerzo Máximo	Diferencia	Módulo de Flexión	Diferencia	Res. Máx. Impacto	Diferencia	
FCo2-30%	3.30	0.09	51.88	20.76	6258	1216	114.06	48.6	8229	7430	2.38	0.38	7.5
FL 30%	3.01	0.20	78.24	5.60	5272	230	120.52	42.1	8053	7606	2.38	0.38	9.3
FL 40%	3.00	0.21	92.20	19.56	5577	535	59.28	103	1799	13860	1.54	0.46	5.5
TP 30%	2.83	0.38	59.46	13.18	7948	2906	121.95	40.7	6751	8908	2.38	0.38	6.3
Parámetro	3.21		72.64		5042		162.64		15659		2.00		
Desv. Est.	0.20		7.50		2417		85.49		8121		0.42		

Fuente: [18]

Es así que en base a la información tomada de dicho trabajo experimental se procede a aplicar la metodología descrita en la sección 4.2.

### Verificación de supuestos

El cumplimiento de los supuestos es sustancial para que los valores obtenidos mediante la aplicación del ANOVA tengan la validez necesaria, es así que para las cinco respuestas experimentales a analizar se resumen los resultados de las pruebas aplicadas a los datos, en la Tabla 4.113.

**Tabla 4.113** Verificación de supuestos de los datos.

Respuestas experimentales	Supuestos				
	Normalidad		Igualdad de varianza		Independencia de residuos
	Valor-p		Valor-p		
Espesor [mm]	0.061	Cumple	0.198	Cumple	Cumple

Esfuerzo Máximo de Tracción [MPa]	> 0.150	Cumple	0.116	Cumple	Cumple
Módulo de Elasticidad [MPa]	> 0.150	Cumple	0.056	Cumple	Cumple
Esfuerzo Máximo de Flexión [MPa]	0.050	Cumple	0.115	Cumple	Cumple
Módulo de Elasticidad Secante de Flexión [MPa]	0.124	Cumple	0.099	Cumple	Cumple

Fuente: Autor

Los datos que no cumplieron con los supuestos fueron transformados para su correcto análisis.

#### Aplicación del diseño experimental (DCA)

El diseño que se aplicó a los datos, posterior a que cumplieran los supuestos, es el diseño completamente aleatorizado, debido a que solo se cuenta con dos fuentes de variabilidad: la configuración y el error experimental. En la Tabla 4.114, se resume los resultados claves del ANOVA de cada respuesta experimental.

**Tabla 4.114** Significancias y coeficientes de determinación de cada respuesta.

Respuestas experimentales	Valor- <i>p</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
Espesor [mm]	0.000	93.54 %
Esfuerzo Máximo de Tracción [MPa]	0.000	82.45 %
Módulo de Elasticidad [MPa]	0.044	28.18 %
Esfuerzo Máximo de Flexión [MPa]	0.000	82.64 %
Módulo de Elasticidad Secante de Flexión [MPa]	0.000	79.61 %

Fuente: Autor

De la Tabla 4.114 se entiende que el efecto de la configuración es significativo, por lo que al menos dos medias poblacionales de cada respuesta, son diferentes; adicional a

esto, también se puede entender que un en la mayoría de respuestas, un gran porcentaje de la variabilidad de los datos, es explicada por la configuración del material.

### **Análisis de respuestas predichas**

Mediante la ecuación de regresión que se genera tras el ANOVA de cada respuesta experimental, se obtienen las respuestas predichas que se detallan en la Tabla 4.115.

**Tabla 4.115** Respuestas predichas para cada configuración.

<b>Configuración</b>	<b>Respuestas experimentales</b>					
	<b>Espesor [mm]</b>	<b>Esfuerzo Máximo de Tracción [MPa]</b>	<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>	<b>Esfuerzo Máximo de Flexión [MPa]</b>	<b>Módulo de Elasticidad Secante de Flexión [MPa]</b>	<b>Energía Media de Fallo [J]</b>
FCo2-30%	3.1354	51.913	6270.686	114.273	8277.298	2.380
FL 30%	3.0191	78.266	5257.556	121.377	8263.620	2.380
FL 40%	3.5782	92.590	7073.297	60.721	1801.202	1.540
TP 30%	2.8766	67.340	8947.094	122.454	6805.747	2.380

**Fuente:** Autor

### **Optimización de múltiples respuestas**

Tendiendo definidas cada una de las respuestas predichas se da paso al cálculo de las deseabilidades individuales y la deseabilidad global, teniendo el coeficiente comprendido entre 0 y 1 que es objetivamente analizable. Las deseabilidades individuales y global se disponen en la Tabla 4.116.

Mediante el análisis aplicado a los datos se elige como la configuración que mejor aprovecha las propiedades mecánicas del material, el Caso 2, que se entiende por el híbrido de fibra larga, con 70% de matriz y 30% de refuerzo a estratificación a compresión, siguiendo el orden de capas de refuerzo FV + FC + FV.

**Tabla 4.116** Deseabilidades individuales y globales para cada configuración.

Conf.	Deseabilidades individuales						DG	Rank
	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$		
FCo2-30%	0.6951	0.1490	0.6041	0.8900	1.0000	1.0000	0.6180	2
FL 30%	0.8008	0.7003	0.4543	0.9855	0.9980	1.0000	0.7940	1
FL 40%	0.2925	1.0000	0.7229	0.1697	0.0451	0.3679	0.2900	4
TP 30%	0.0696	0.4718	1.0000	1.0000	0.7830	1.0000	0.5433	3

Fuente: Autor

Para contrastar de cierta manera la metodología aplicada en cada documento, disponemos la información final de los análisis en la Tabla 4.117.

**Tabla 4.117** Contraste de metodologías.

Configuración	Metodología aplicada			
	Valores ponderados		DOE y Deseabilidad	
	Calific.	Distancia media	Calific.	Distancia media
FCo2-30%	7.5	4.90%	0.6180	10.09%
FL 30%	9.3	30.07%	0.7940	41.45%
FL 40%	5.5	23.08%	0.2900	48.33%
TP 30%	6.3	11.89%	0.5433	3.21%
<b>Promedio</b>		17.48%		25.77%

Fuente: Autor

Es evidente el hecho de que en ambos casos se selecciona la misma configuración como óptima, sin embargo se recalca que:

- La metodología que emplea el diseño de experimentos junto con la función de deseabilidad tiene una distancia media más grande en cada una de las configuraciones, que la metodología de los valores ponderados, como vemos en la Tabla 4.117, por lo que su calificación es más apreciable, dejando más exactitud para un contraste y selección de alternativas, ya que este resulta más preciso y con un menor error de elegir un configuración como óptima.

- Hay que tener presente que la metodología de criterios ponderados involucra un conocimiento exhaustivo de la teoría de resistencia de materiales y experiencia en el ámbito de caracterización de materiales.
- La metodología estadística permite contar con estadísticos de prueba que se derivan de los datos muestrales tomados en los ensayos, los cuales nos ayudan a entender de mejor manera el comportamiento de factores de entrada en las respuestas experimentales medidas, con la facilidad de proyectar esta información a una población controlada de materiales similares.
- La metodología estadística brinda un valor cuantificable de cometer el error de considerar un factor que influye significativamente en una propiedad mecánica, cuando en realidad no lo hace, logrando así verificar de manera adecuada la hipótesis planteada.
- La metodología estadística requiere un alto grado de conocimiento de la teoría estadística a aplicar y de conceptos generales en base a análisis estadísticos para entender de manera eficiente resultados que interpretados de manera correcta nos brindan información valiosa; fuera de esto, el conocimiento de teoría de resistencia de materiales y de caracterización de materiales, puede ser no tan exhaustivo como en la metodología de criterios ponderados.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo experimental empleó una metodología estadística basada en el diseño de experimentos y la función de deseabilidad, para la optimización de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material compuesto híbrido fabricado de un tejido de abacá (FAb) y algodón (FAI) más fibra de vidrio (FV), combinado con una matriz polimérica de resina poliéster; tomando como factores de entrada la configuración y el tipo de secado. A partir de los resultados de la investigación, se puede extraer las siguientes conclusiones:

- Con el Diseño de Experimentos y la función de Deseabilidad, se analizan los factores configuración y tipo de secado, con cada uno de sus niveles; con lo que se describe la importancia y contribución que tiene cada uno de estos factores a las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto, siendo esta contribución de manera global en un 80.85 % y 10.32 %, respectivamente.
- Tras la evaluación consistente de la idoneidad de los datos para el análisis paramétrico; se transformaron los mismos en caso de no cumplir con los supuestos, aplicando una transformación Box-Cox.
- Del análisis realizado a las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto; se establece que el modelo de regresión factorial general del Diseño Factorial Completo explica hasta el 95.72% la variabilidad de estas propiedades, mientras que para la propiedad mecánica a impacto el modelo de regresión del Diseño en Bloques Completos al Azar explica el 79.28 % de la variabilidad de la energía media de fallo.
- Mediante la función de deseabilidad se determina la condición óptima en el que se aprovechan al máximo las propiedades mecánicas del material híbrido, esto se da cuando se emplea: 20% de fibra de vidrio, 7.75% de fibra de abacá dispuesta a 45°

tejida con 2.25% de fibra de algodón a 135°, en una matriz polimérica de resina poliéster y secada al horno.

- La función de deseabilidad conjuntamente con el diseño factorial completo convierte el análisis subjetivo de las propiedades mecánicas, en un análisis objetivo mediante un valor comparable en cada combinación, lo que hace práctico este análisis al momento de optimizar factores.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Para la aplicación de cualquier diseño de experimentos, es necesario que el investigador conozca el contexto en el que encuentran los datos que se están analizando, en este caso, la teoría de resistencia de materiales ayuda al investigador a entender de mejor manera mucho de los valores e interpretaciones estadísticas que se obtienen de las propiedades mecánicas.
- La metodología estadística proporciona una visión más amplia de los datos, brinda una perspectiva más clara de los factores analizados pudiendo conocer el grado de contribución de estos uno de ellos a la propiedad mecánica evaluada. Al contar con valores que miden el error, generalmente se establece una significancia estadística del 5%.
- Es importante que se realicen un número adecuado de réplicas para entre muchas otras cosas, poder entender de mejor manera la variabilidad de los datos, el diseño factorial acepta como mínimo 2 réplicas, sin embargo, un enfoque más estricto dentro del contexto de caracterización de materiales emplearía como mínimo 4 réplicas.
- La función de deseabilidad califica de manera adecuada los tratamientos que se están analizando, dando una visión clara de lo que se quiere en la práctica, por lo que hay que tener presente que se requiere que existan amplias diferencias en los valores de deseabilidad global para cada tratamiento, para que la calificación sea más apreciable, es decir que las deseabilidades globales deben ser estadísticamente diferentes.



- Existen otras metodologías con un enfoque diferente, dentro de la que se puede abordar la metodología de superficie de respuesta (MSR), la cual aplicada de manera adecuada puede brindarnos un análisis preciso dentro del tema de optimización, ya que se puede generar puntos óptimo globales, que se extienden más allá de la región de experimentación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Barari, R. Morgan, and P. Barnard, “A design of experiments (DOE) approach to optimise temperature measurement accuracy in Solid Oxide Fuel Cell (SOFC),” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 547, no. 1, pp. 0–10, 2014.
- [2] M. Velasco peña, J. Rodríguez suárez, and D. Restrepo ardila, “Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM,” *XXI Congr. Nac. Ing. Mecánica*, no. January, pp. 716–722, 2016.
- [3] H. Majumder and K. Maity, “Multi-Response Optimization of WEDM Process Parameters Using Taguchi Based Desirability Function Analysis,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 338, no. 1, pp. 0–6, 2018.
- [4] A. Nurulhuda *et al.*, “Analysis on Flexural Strength of A36 Mild Steel by Design of Experiment (DOE),” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 226, no. 1, pp. 0–8, 2017.
- [5] E. H. Agung, S. M. Sapuan, M. M. Hamdan, H. M. D. K. Zaman, and U. Mustofa, “Optimization of the Mechanical Properties of Abaca Fibre-Reinforced High Impact Polystyrene (HIPS) Composites Using Box-Behnken Design of Experiments,” *Polym. Polym. Compos.*, vol. 19, no. 8, pp. 697–710, 2011.
- [6] T. Rajmohan, K. Yogeswar, S. Gayatri, G. M. Dinesh, G. V. Raghavendra, and K. R. Charan Reddy, “Multi response optimization of drilling performance of MWCNT filled banana-glass fibre reinforced composite,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 390, no. 1, pp. 0–7, 2018.
- [7] Suardi, H. Homma, and Abubakar, “Identification of tensile strength properties of abaca fiber by weakest-linkage approach-statistic property of fiber diameter,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 308, no. 1, 2018.

- [8] La Hora, “Sector carrocerero de Tungurahua mejoró en los últimos cinco meses,” 2018. [Online]. Available: <https://lahora.com.ec/tungurahua/noticia/1102138004/sector-carrocerero-de-tungurahua-mejoro-en-los-ultimos-cinco-meses>. [Accessed: 20-Aug-2006].
- [9] I. Espejo Miranda *et al.*, *Inferencia Estadística. Teoría y Problemas*. Cádiz: Universidad de Cádiz, 2009.
- [10] H. Gutierrez Pulido and R. De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Tercera Ed. México: McGRAW-HILL, 2012.
- [11] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia*, Novena Edi. México: Person, 2012.
- [12] D. C. Montgomery, *Libro analisis y diseno de experimentos*, Segunda Ed. Limusa Wiley, 2004.
- [13] C. Guisande González, “Tratamiento de datos.” [Online]. Available: [https://books.google.com.ec/books?id=AhNx24025ZoC&printsec=frontcover&dq=castor+guisande+estadística&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj0\\_PO0o6\\_fAhULbq0KHTWYCHMQ6AEILzAB#v=onepage&q=castor guisande estadística&f=true](https://books.google.com.ec/books?id=AhNx24025ZoC&printsec=frontcover&dq=castor+guisande+estadística&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj0_PO0o6_fAhULbq0KHTWYCHMQ6AEILzAB#v=onepage&q=castor guisande estadística&f=true).
- [14] A. García Pérez, “La interpretación de los datos. Una introducción a la Estadística Aplicada.” [Online]. Available: [https://books.google.com.ec/books?id=wtwIBgAAQBAJ&pg=PT96&dq=transformación+de+box+cox&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiw7rHIpK\\_fAhUSW a0KHdJXCb4Q6AEIPTAE#v=onepage&q=transformación de box cox&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=wtwIBgAAQBAJ&pg=PT96&dq=transformación+de+box+cox&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiw7rHIpK_fAhUSW a0KHdJXCb4Q6AEIPTAE#v=onepage&q=transformación de box cox&f=false).
- [15] Minitab, “Transformación de Box-Cox.” [Online]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/control-charts/how-to/box-cox-transformation/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>.
- [16] G. Fabila Carrera, “Diseño y Análisis de Experimentos Industriales.” [Online].

Available: [https://books.google.com.ec/books?id=G622oQ8-RFQC&pg=PA28&lpg=PA28&dq=fabila+deseabilidad&source=bl&ots=w1PtVvliK1&sig=PvRg3E8-oIwxKBrPyRxHbl3Zcec&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj26rWJpq\\_fAhWlZ4MKHZa\\_B3AQ6AEwBnoECAcQAQ#v=onepage&q=fabila+deseabilidad&f=true](https://books.google.com.ec/books?id=G622oQ8-RFQC&pg=PA28&lpg=PA28&dq=fabila+deseabilidad&source=bl&ots=w1PtVvliK1&sig=PvRg3E8-oIwxKBrPyRxHbl3Zcec&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj26rWJpq_fAhWlZ4MKHZa_B3AQ6AEwBnoECAcQAQ#v=onepage&q=fabila+deseabilidad&f=true).

- [17] R. C. Hibbeler, *Mecánica de materiales*, Octava Ed. México, 2011.
- [18] J. G. Paredes Salinas, “Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses,” UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO, 2012.

# **ANEXOS**

## Anexo 1: Factura de adquisición de licencia del software estadístico Minitab®

Resumen de pedido	Información del pedido
Número de pedido: 100651383162	Nombre: Henry Erazo
Fecha del pedido: 2019-01-28 14:54	Correo electrónico: herazo1189@uta.edu.ec
Hora estándar del Este	Tarjeta de crédito: Visa *****3529
	Esta transacción puede reflejarse como "estore.onthehub.com" en su estado de su cuenta.

### Dirección de facturación

Henry Erazo  
Unión  
Simón Bolívar  
Ambato 180165  
Ecuador

Ítems (Todos los precios están en Dólares estadounidenses)

[Vea los detalles para recuperar los artículos de su pedido.](#)

	Cantidad	Precio unitario	Importe
1. Minitab 18 (Multilanguage) (12-Month Rental) - Descargar	1	\$49.99	\$49.99
		<b>Subtotal:</b>	\$49.99
		<b>Impuestos:</b>	--
		<b>Total:</b>	\$49.99



## Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 3039/D 3039M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

<sup>ε1</sup> NOTE—Eq 5 was revised editorially in December 2002.

### 1. Scope

1.1 This test method determines the in-plane tensile properties of polymer matrix composite materials reinforced by high-modulus fibers. The composite material forms are limited to continuous fiber or discontinuous fiber-reinforced composites in which the laminate is balanced and symmetric with respect to the test direction.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

- D 792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement<sup>2</sup>
- D 883 Terminology Relating to Plastics<sup>2</sup>
- D 2584 Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins<sup>3</sup>
- D 2734 Test Method for Void Content of Reinforced Plastics<sup>3</sup>
- D 3171 Test Methods for Constituent Content of Composites Materials<sup>4</sup>
- D 3878 Terminology for Composite Materials<sup>4</sup>
- D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption

Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials<sup>4</sup>

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>5</sup>

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing<sup>5</sup>

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers<sup>5</sup>

E 111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus<sup>5</sup>

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process<sup>6</sup>

E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature<sup>5</sup>

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods<sup>6</sup>

E 251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages<sup>5</sup>

E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics<sup>6</sup>

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method<sup>6</sup>

E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading<sup>5</sup>

E 1237 Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages<sup>5</sup>

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology D 883 defines terms relating to plastics. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other standards.

#### 3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

NOTE—If the term represents a physical quantity, its analytical dimensions are stated immediately following the term (or letter symbol) in fundamental dimension form, using the following ASTM standard symbology for fundamental

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 10, 2000. Published July 2000. Originally published as D 3039 – 71T. Last previous edition D 3039 – 95a.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

<sup>6</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.



Designation: D 7264/D 7264M – 07

## Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 7264/D 7264M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This test method determines the flexural stiffness and strength properties of polymer matrix composites.

1.1.1 *Procedure A*—A three-point loading system utilizing center loading on a simply supported beam.

1.1.2 *Procedure B*—A four-point loading system utilizing two load points equally spaced from their adjacent support points, with a distance between load points of one-half of the support span.

NOTE 1—Unlike Test Method D 6272, which allows loading at both one-third and one-half of the support span, in order to standardize geometry and simplify calculations this standard permits loading at only one-half the support span.

1.2 For comparison purposes, tests may be conducted according to either test procedure, provided that the same procedure is used for all tests, since the two procedures generally give slightly different property values.

1.3 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:<sup>2</sup>

D 790 Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials  
D 2344/D 2344M Test Method for Short-Beam Strength of

Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

D 3878 Terminology for Composite Materials

D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials

D 5687/D 5687M Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation

D 6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending

D 6856 Guide for Testing Fabric-Reinforced “Textile” Composite Materials

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E 18 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials

E 122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With a Specified Tolerable Error, the Average for a Characteristic of a Lot or Process

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics

E 1309 Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials in Databases

E 1434 Guide for Recording Mechanical Test Data of Fiber-Reinforced Composite Materials in Databases

2.2 *Other Documents*:

ANSI Y14.5-1999 Dimensioning and Tolerancing—Includes Inch and Metric<sup>3</sup>

ANSI B46.1-1995 Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)<sup>3</sup>

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines the terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other documents.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 1, 2007. Published April 2007. Originally approved in 2006. Last previous edition approved in 2006 as D 7264/D 7264M – 06.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard’s Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, http://www.ansi.org.





## Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D5628; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope\*

1.1 This test method covers the determination of the threshold value of impact-failure energy required to crack or break flat, rigid plastic specimens under various specified conditions of impact of a free-falling dart (tup), based on testing many specimens.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* Specific hazard statements are given in Section 8.

NOTE 1—This test method and ISO 6603-1 are technically equivalent only when the test conditions and specimen geometry required for Geometry FE and the Bruceton Staircase method of calculation are used.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

- D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing
- D883 Terminology Relating to Plastics
- D1600 Terminology for Abbreviated Terms Relating to Plastics
- D1709 Test Methods for Impact Resistance of Plastic Film by the Free-Falling Dart Method
- D2444 Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight)
- D3763 Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors

D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials

D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens

D6779 Classification System for Polyamide Molding and Extrusion Materials (PA)

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 ISO Standards:<sup>3</sup>

ISO 291 Standard Atmospheres for Conditioning and Testing

ISO 6603-1 Plastics—Determination of Multiaxial Impact Behavior of Rigid Plastics—Part 1: Falling Dart Method

### 3. Terminology

#### 3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions of plastic terms used in this test method, see Terminologies D883 and D1600.

#### 3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *failure (of test specimen)*—the presence of any crack or split, created by the impact of the falling tup, that can be seen by the naked eye under normal laboratory lighting conditions.

3.2.2 *mean-failure energy (mean-impact resistance)*—the energy required to produce 50 % failures, equal to the product of the constant drop height and the mean-failure mass, or, to the product of the constant mass and the mean-failure height.

3.2.3 *mean-failure height (impact-failure height)*—the height at which a standard mass, when dropped on test specimens, will cause 50 % failures.

NOTE 2—Cracks usually start at the surface opposite the one that is struck. Occasionally incipient cracking in glass-reinforced products, for example, is difficult to differentiate from the reinforcing fibers. In such cases, a penetrating dye can confirm the onset of crack formation.

3.2.4 *mean-failure mass (impact-failure mass)*—the mass of the dart (tup) that, when dropped on the test specimens from a standard height, will cause 50 % failures.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved July 1, 2010. Published July 2010. Originally approved in 1994. Last previous edition approved in 2007 as D5628 - 07. DOI: 10.1520/D5628-10.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, http://www.ansi.org.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.



**LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**ENSAYO DE TRACCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS**  
**INFORME DE RESULTADOS N°: 1865027520201710810-ETC**

**DATOS GENERALES**

**Datos informativos: N° de proforma:** RM\_2017\_039  
**Empresa / Cliente:** Ing. Juan Paredes.  
**RUC/C.I.:** 1865027520001                      **Ciudad:** Ambato.  
**Dirección:** Av. Los Chasquis y Rio Guayllabmaba, Edif. Ciencias Básicas.  
**Teléfono:** 0983017390                      **Correo:** jgparedes@uta.edu.ec  
**Datos del ensayo:**  
**Lugar de Ejecución del Ensayo:** Laboratorio de Resistencia de Materiales.  
**Dirección:** Ambato/Catiglata. Toronto y Rio de Janeiro.  
**Método de ensayo:** ASTM D3039-2015. Método de prueba estándar para propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz de polimérica.  
**Tipo de ensayo:** Cuantitativo.                      **Tipo de probeta:** Plana.  
**Equipo utilizado:** Maquina de ensayos universal. Metro test 50 kN  
**Velocidad de ensayo:** 10 mm/min                      **Precarga:** 0 N  
**Fecha de Inicio de Ensayo:** 01/12/2017. **Fecha de Finalización de Ensayo:** 01/12/2017.  
 Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de materiales compuestos. Las probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.

**OBJETOS DE ENSAYO**

**Número de Probetas cuantificadas**

N°	Identificación del grupo	Configuración de la probeta	Probetas a Ensayar
1	186502752020170810 ETC08	20% FV + 10% (FAB 0° + FAI 90°)	6
2	186502752020170810 ETC09	10% FV + 20% (FAB 0° + FAI 90°)	6
3	186502752020170810 ETC10	20% FV + 10% (FAB 45° + FAI 90°)	6
4	186502752020170810 ETC11	10% FV + 20% (FAB 45° + FAI 135°)	6
5	186502752020170810 ETC12	30% (FAB 0°, 45°, 135° + FAI 90°, 135°, 225°)	6
6	186502752020170810 ETC13	10% FV + 20% F. Larga Abacá	6
7	186502752020170810 ETC14	10% FV + 20% F. Corta Abacá	5
<b>Total</b>			41

**Nota:** Las probetas fueron realizadas en un molde con la utilización de mezcla de resina con refuerzo de fibra de hoja de abacá y algodón, la configuración de los porcentajes de fibra y fracción volumétrica se realiza según especificaciones declaradas por el cliente.

**Observaciones:** Ninguna.

<b>Elaborado por:</b>		<b>Aprobado por:</b>
Ing. Fernando Galarza	Ing. Ángel Balseca	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

**Fecha de entrega de Informe:** Ambato, 06 de diciembre de 2017.  
**N°. Factura:** 001-002-000003896



### Resultados:

Pro beta	Identificación de probeta	Temper atura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
1	186502752020170810-ETC 08-1	20,1	64,8	25,11	3,19	5320,36	66,42	1573,65	4,22	LGM
2	186502752020170810-ETC 08-2	20,1	64,8	25,05	3,03	5263,56	69,35	1654,28	4,19	LGM
3	186502752020170810-ETC 08-3	20,1	64,8	25,16	3,05	5220,96	68,04	1667,72	4,08	LGM
4	186502752020170810-ETC 08-4	20,1	64,8	25,11	3,18	5394,52	67,56	1741,91	3,88	LIT
5	186502752020170810-ETC 08-5	20,1	64,8	25,14	3,08	5202,03	67,18	1683,10	3,99	LGM
6	186502752020170810-ETC 08-6	20,1	64,8	25,14	3,11	4963,78	63,49	1330,75	4,77	GAT
Promedio $\bar{x}$						5227,54	67,01	1608,57	4,07	
Desviación estándar $S_{n-1}$						147,01	1,98	146,51	1,12	
Coeficiente de variación CV						2,81	2,96	9,11	27,47	

Pro beta	Identificación de probeta	Temper atura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
7	186502752020170810-ETC 09-1	22,2	52,4	25,05	3,27	4618,24	56,38	1291,09	4,37	LIT
8	186502752020170810-ETC 09-2	22,2	52,4	25,15	2,86	4977,98	69,21	1422,02	4,87	LIT
9	186502752020170810-ETC 09-3	22,2	52,4	25,03	2,91	5085,27	69,82	1333,20	5,24	GAT
10	186502752020170810-ETC 09-4	22,2	52,4	25,07	3,01	5175,21	68,58	1270,78	5,40	LGM
11	202017186502750810-ETC 09-5	22,2	52,4	25,05	2,9	4406,81	60,66	1258,97	4,82	LGM
12	202017186502750810-ETC 09-6	22,2	52,4	25,16	2,74	5836,31	84,66	1425,34	5,94	LGM
Promedio $\bar{x}$						v	68,22	1333,57	4,94	
Desviación estándar $S_{n-1}$						496,75	9,71	74,24	1,52	
Coeficiente de variación CV						9,90	14,23	5,57	30,78	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
13	186502752020170810-ETC 10-1	20,3	65,3	25,59	3,27	4665,57	55,76	1938,10	2,88	LGM
14	186502752020170810-ETC 10-2	20,3	65,3	25,09	2,72	5138,92	75,30	1884,04	4,00	LIT
15	186502752020170810-ETC 10-3	20,3	65,3	25,26	2,76	4357,9	62,51	1614,02	3,87	LGM
16	186502752020170810-ETC 10-4	20,3	65,3	25	2,82	4955,89	70,30	1781,82	3,95	LIT
17	186502752020170810-ETC 10-5	20,3	65,3	25,72	2,74	5001,65	70,97	1672,94	4,24	LGM
18	186502752020170810-ETC 10-6	20,3	65,3	25,13	2,96	4627,71	62,21	1626,06	3,83	LGM
Promedio $\bar{x}$						4791,27	66,17	1752,83	3,79	
Desviación estándar $S_{n-1}$						290,72	7,23	137,19	0,53	
Coeficiente de variación CV						6,07	10,92	7,83	14,03	

LGM

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
19	186502752020170810-ETC 11-1	21,2	62,4	25,13	2,87	2477,16	34,35	1159,25	2,96	LIT
20	186502752020170810-ETC 11-2	21,2	62,4	25,33	3,29	2297,29	27,57	940,97	2,93	GAT
21	186502752020170810-ETC 11-3	21,2	62,4	25,21	2,87	2098,48	29,00	942,90	3,08	LGM
22	186502752020170810-ETC 11-4	21,2	62,4	25,08	2,75	2090,59	30,31	1607,87	1,89	GAT
23	186502752020170810-ETC 11-5	21,2	62,4	25,07	2,76	2188,42	31,63	983,57	3,22	LGM
24	186502752020170810-ETC 11-6	21,2	62,4	25,1	2,75	2087,44	30,24	814,26	3,71	LGM
Promedio $\bar{x}$						2206,56	30,52	1074,80	2,81	
Desviación estándar $S_{n-1}$						155,63	2,32	283,83	1,18	
Coeficiente de variación CV						7,05	7,62	26,41	42,06	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
25	186502752020170810-ETC 12-1	24,6	52,3	25,62	3,7	1771,88	18,69	503,28	3,71	LIT
26	186502752020170810-ETC 12-2	24,6	52,3	25,23	3,76	2066,93	21,79	586,78	3,71	LIT
27	186502752020170810-ETC 12-3	24,6	52,3	25,4	3,48	2320,95	26,26	706,07	3,72	LIT
28	186502752020170810-ETC 12-4	24,6	52,3	25,8	3,9	1950,17	19,38	458,58	4,23	LGM
29	186502752020170810-ETC 12-5	24,6	52,3	25,66	4,02	2022,75	19,61	475,72	4,12	LIT
30	186502752020170810-ETC 12-6	24,6	52,3	25,66	3,64	2202,62	23,58	575,34	4,10	LGM
Promedio $\bar{x}$						2055,88	21,55	550,96	3,90	
Desviación estándar $S_{n-1}$						192,27	2,93	92,09	0,61	
Coeficiente de variación CV						9,35	13,60	16,71	15,63	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
31	186502752020170810-ETC 13-1	22,5	52,3	25,95	3,51	4832,82	53,06	1476,64	3,59	LGM
32	186502752020170810-ETC 13-2	22,5	52,3	25,12	3,91	6180,27	62,92	1623,41	3,88	LGM
33	186502752020170810-ETC 13-3	22,5	52,3	24,93	3,67	4581,95	50,08	1395,45	3,59	LIT
34	186502752020170810-ETC 13-4	22,5	52,3	24,97	3,77	4086,52	43,41	1423,29	3,05	LGM
35	186502752020170810-ETC 13-5	22,5	52,3	25,43	3,64	5113,67	55,24	1502,67	3,68	GAT
36	186502752020170810-ETC 13-6	22,5	52,3	25,27	3,86	5321,94	54,56	1470,95	3,71	GAT
Promedio $\bar{x}$						5019,53	53,21	1482,07	3,56	
Desviación estándar $S_{n-1}$						713,37	6,42	79,39	0,54	
Coeficiente de variación CV						14,21	12,07	5,36	15,31	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
37	186502752020170810-ETC 14-1	24,6	51,5	25,1	3,27	2308,33	28,12	923,07	3,05	LIT
38	186502752020170810-ETC 014-2	24,6	51,5	25,12	3,1	2735,92	35,13	1045,89	3,36	GAT
39	186502752020170810-ETC 14-3	24,6	51,5	25,16	3,08	2238,91	28,89	1039,57	2,78	LGM
40	186502752020170810-ETC 14-4	24,6	51,5	25,19	3,12	2775,36	35,31	957,83	3,69	GAT
41	186502752020170810-ETC 14-5	24,6	51,5	25,13	3,29	2507,13	30,32	952,87	3,18	LIT
Promedio $\bar{x}$						2513,13	31,56	983,85	3,21	
Desviación estándar $S_{n-1}$						242,68	3,44	55,42	0,34	
Coeficiente de variación CV						9,66	10,90	5,63	10,59	

**Nomenclatura:**

**De tipo de falla evaluado:** El tipo de falla evaluado se lo realiza mediante los criterios de la norma ASTM D3039-2015.

Primer carácter		Segundo carácter		Tercer carácter	
L	Lateral	A	En el agarre	T	Parte superior
L	Lateral	I	Dentro del agarre	T	Parte superior
A	Angular	G	Zona calibrada	M	Medio



**LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**ENSAYO DE TRACCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS**  
**INFORME DE RESULTADOS N°: 186502752020170810-ETC**

**DATOS GENERALES**

**Datos informativos: N° de proforma:** RM\_2017\_039  
**Empresa / Cliente:** Ing. Juan Paredes.  
**RUC/C.I.:** 1865027520001                      **Ciudad:** Ambato.  
**Dirección:** Av. Los Chasquis y Rio Guayllabmaba, Edif. Ciencias Básicas.  
**Teléfono:** 0983017390                      **Correo:** jgparedes@uta.edu.ec  
**Datos del ensayo:**  
**Lugar de Ejecución del Ensayo:** Laboratorio de Resistencia de Materiales.  
**Dirección:** Ambato/Catiglata. Toronto y Rio de Janeiro.  
**Método de ensayo:** ASTM D3039-2015. Método de prueba estándar para propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz de polimérica.  
**Tipo de ensayo:** Cuantitativo.                      **Tipo de probeta:** Plana.  
**Equipo utilizado:** Maquina de ensayos universal. Metro test 50 kN  
**Velocidad de ensayo:** 10 mm/min                      **Precarga:** 0 N  
**Fecha de Inicio de Ensayo:** 26/09/2017. **Fecha de Finalización de Ensayo:** 04/10/2017.  
 Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de materiales compuestos. Las probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.

**OBJETOS DE ENSAYO**

**Número de Probetas cuantificadas**

N°	Identificación del grupo	Configuración de la probeta	Probetas a Ensayar
1	186502752020170810 ETC01	20% FV + 10% (FAB - 0° + FAI -90°)	5
2	186502752020170810 ETC02	10% FV + 20% (FAB - 0° + FAI -90°)	5
3	186502752020170810 ETC03	20% FV + 10% (FAB - 45° + FAI -90°)	5
4	186502752020170810 ETC04	10% FV + 20% (FAB - 45° + FAI -135°)	5
5	186502752020170810 ETC05	30% (FAB - 0°, 45°, 135° + FAI -90°, 135°, 225°)	5
6	186502752020170810 ETC06	10% FV + 20% F. Larga Abacá	5
7	186502752020170810 ETC07	10% FV + 20% F. Corta Abacá	5
<b>Total</b>			35

**Nota:** Las probetas fueron realizadas en un molde con la utilización de mezcla de resina con refuerzo de fibra de hoja de abacá y algodón, la configuración de los porcentajes de fibra y fracción volumétrica se realiza según especificaciones declaradas por el cliente.

**Observaciones:** Ninguna.

<b>Elaborado por:</b>		<b>Aprobado por:</b>
Ing. Fernando Galarza	Ing. Ángel Balseca	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

**Fecha de entrega de Informe:** Ambato, 06 de diciembre de 2017.  
**N°. Factura:** 001-002-000003896



### Resultados:

Pro beta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
1	186502752020170810-ETC 01-1	25.1	42.6	24.84	2.72	5940.44	87,92	2109.46	4.17	LGM
2	186502752020170810-ETC 01-2	25.1	42.6	24.56	2.99	5598.06	76,23	1943.51	3.92	LGM
3	186502752020170810-ETC 01-3	25.1	42.6	24.75	2.65	4858.07	74.07	2044.55	3.62	LGM
4	186502752020170810-ETC 01-4	25.1	42.6	24.66	2.99	5607.52	76.05	1799.77	4.23	LGM
5	186502752020170810-ETC 01-5	25.1	42.6	24.81	3.07	5437.12	71.38	1761.36	4.05	LAT
Promedio $\bar{x}$						5488.24	77.13	1931.73	4	
Desviación estándar $S_{n-1}$						397,02	6.34	150.74	0.24	
Coeficiente de variación CV						7,23	8.22	7.80	6	

Pro beta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
6	186502752020170810-ETC 02-1	23.2	50.5	24.91	3.09	4072.32	52.91	1651.89	3.20	LAT
7	186502752020170810-ETC 02-2	23.2	50.5	24.72	3.16	4208.01	53.87	1504.06	3.58	LAT
8	186502752020170810-ETC 02-3	23.2	50.5	24.94	2.94	5017.42	68.43	2519.46	2.72	LAT
9	186502752020170810-ETC 02-4	23.2	50.5	25.08	2.95	4593	62.03	1899.84	3.27	LAT
10	186502752020170810-ETC 02-5	23.2	50.5	24.77	2.91	4166.99	57.81	1721.97	3.36	LAT
						4411.55	59.02	1859.44	3.23	
Desviación estándar $S_{n-1}$						392.53	6.39	395.45	0.32	
Coeficiente de variación CV						8.90	10.82	21.27	9.88	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
11	186502752020170810-ETC 03-1	23.2	50.5	25.02	3.26	4485.7	55	1740.36	3.16	LGM
12	186502752020170810-ETC 03-2	23.2	50.5	24.86	3.23	4596.15	57.24	1859.61	3.08	LAT
13	186502752020170810-ETC 03-3	23.2	50.5	24.51	3.44	4544.08	53.89	1514.57	3.56	LGM
14	186502752020170810-ETC 03-4	23.2	50.5	24.54	3.46	4405.24	51.88	2229	2.33	LIT
15	186502752020170810-ETC 03-5	23.2	50.5	24.89	3.27	4622.97	56.80	1657.91	3.43	LGM
Promedio $\bar{x}$						4530.83	54.96	1800.29	3.11	
Desviación estándar $S_{n-1}$						87.67	2.19	270.56	0.48	
Coeficiente de variación CV						1.93	3.98	15.03	15.39	

LGM

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
16	186502752020170810-ETC 04-1	24.4	47.1	25.13	3.23	3338.64	41.13	2025.78	2.03	LIT
17	186502752020170810-ETC 04-2	24.4	47.1	25.13	2.93	3401.75	46.20	1744.45	2.65	LGM
18	186502752020170810-ETC 04-3	24.4	47.1	25.12	2.94	3179.28	43.05	1404.62	3.06	LAT
19	186502752020170810-ETC 04-4	24.4	47.1	25.06	2.97	3275.53	44.01	1450.92	3.03	LIT
20	186502752020170810-ETC 04-5	24.4	47.1	25.12	2.8	3414.37	48.54	1789.17	2.71	LGM
Promedio $\bar{x}$						3321.91	44.59	1682.99	2.70	
Desviación estándar $S_{n-1}$						97.08	2.87	256.86	0.42	
Coeficiente de variación CV						2.92	6.43	15.29	15.45	



Pro beta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
21	186502752020170810-ETC 05-1	25.9	43.7	25.25	2.98	4318.46	57.39	1740.84	3.30	LAT
22	186502752020170810-ETC 05-2	25.9	43.7	25.19	2.8	3988,69	56.55	1801	3.14	LGM
23	186502752020170810-ETC 05-3	25.9	43.7	25.17	2.87	4149,63	57.44	1604.76	3.58	LAT
24	186502752020170810-ETC 05-4	25.9	43.7	25.2	3.09	4037,61	51.85	1489.66	3.48	LIT
25	186502752020170810-ETC 05-5	25.9	43.7	25.35	2.66	4159.1	61.68	1842.05	3.35	LGM
Promedio $\bar{x}$						4130,70	56.98	1695.66	3.37	
Desviación estándar $S_{n-1}$						127,72	3.50	146.01	0.17	
Coeficiente de variación CV						3,09	6.14	8.61	5.03	

Pro beta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
26	186502752020170810-ETC 06-1	24.1	49.8	24.91	3.31	4581.95	55.57	1740.95	3.19	LIT
27	186502752020170810-ETC 06-2	24.1	49.8	24.8	2.87	5765,31	81	2627.51	3.08	LAT
28	186502752020170810-ETC 06-3	24.1	49.8	24.55	3.13	5269,87	68.58	2302.30	2.98	LGM
29	186502752020170810-ETC 06-4	24.1	49.8	24.58	3.21	5569,66	70.59	2283.87	3.09	LAT
30	186502752020170810-ETC 06-5	24.1	49.8	24.8	2.84	5717,97	81.18	3344.77	2.43	LAT
Promedio $\bar{x}$						5380,95	71.39	2459.88	2.95	
Desviación estándar $S_{n-1}$						486.74	10.57	588.18	0.30	
Coeficiente de variación CV						9.05	14.81	23.91	10.30	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Calculado) (MPa)	% Elongación (Calculado)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor					
31	186502752020170810-ETC 07-1	23.7	49.6	24.79	3.2	3016.77	38.03	1511.49	2.52	LIT
32	186502752020170810-ETC 07-2	23.7	49.6	24.93	3.08	2668.07	34.75	1717.46	2.02	LIT
33	186502752020170810-ETC 07-3	23.7	49.6	24.7	3.34	2791.14	33.83	1440.92	2.35	LGM
34	186502752020170810-ETC 07-4	23.7	49.6	24.81	3.26	2472.42	30.57	1347.12	2.27	LGM
35	186502752020170810-ETC 07-5	23.7	49.6	24.78	3.15	3130.37	40.10	1479.62	2.71	LGM
Promedio $\bar{x}$						2815.75	35.46	1499.32	2.37	
Desviación estándar $S_{n-1}$						264.43	3.72	136.65	0.26	
Coeficiente de variación CV						9.39	10.48	9.11	10.91	

**Nomenclatura:**

**De tipo de falla evaluado:** El tipo de falla evaluado se lo realiza mediante los criterios de la norma ASTM D3039-2015.

Primer carácter		Segundo carácter		Tercer carácter	
L	Lateral	A	En el agarre	T	Parte superior
L	Lateral	I	Dentro del agarre	T	Parte superior
A	Angular	G	Zona calibrada	M	Medio



**LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**ENSAYO DE FLEXIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS**  
**INFORME DE RESULTADOS N°: 186502752020170810-EFC**

**DATOS GENERALES**

**Datos informativos: N° de proforma:** RM\_2017\_039  
**Empresa / Cliente:** Ing. Juan Paredes  
**RUC/C.I.:** 1865027520001      **Ciudad:** Ambato.  
**Dirección:** Av. Los Chasquis y Río Guayllabamba, Edif. Ciencias Básicas. UTA  
**Teléfono:** 0984427607      **Correo:** jgparedes@uta.edu.ec  
**Datos del ensayo:**  
**Lugar de Ejecución del Ensayo:** Laboratorio de Resistencia de Materiales.  
**Dirección:** Ambato/Catiglata. Toronto y Rio de Janeiro.  
**Método de ensayo:** ASTM D7264-2015. Método de prueba estándar para propiedades de flexión de materiales compuestos de matriz de polímero.  
**Tipo de ensayo:** Cuantitativo.      **Procedimiento:** A  
**Equipo utilizado:** Máquina de ensayos universal. Metro test 50 kN  
**Velocidad de ensayo:** 10 mm/min    **Precarga:** 0 N    **Distancia entre apoyos:** 100 mm  
**Fecha de Inicio de Ensayo:** 26/09/2017.    **Fecha de Finalización de Ensayo:** 04/10/2017.  
 Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de materiales compuestos. Las probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.

**OBJETOS DE ENSAYO**

**Número de Probetas cuantificadas**

N°	Identificación del grupo	Configuración de la probeta	Probetas a Ensayar
1	186502752020170810 ETC01	20% FV + 10% (FAB - 0° + FAI -90°) S.H.	5
2	186502752020170810 ETC02	10% FV + 20% (FAB - 0° + FAI -90°) S.H.	5
3	186502752020170810 ETC03	20% FV + 10% (FAB - 45° + FAI -135°) S.H.	5
4	186502752020170810 ETC04	10% FV + 20% (FAB - 45° + FAI -135°) S.H.	5
5	186502752020170810 ETC05	30% (FAB - 0°, 45°, 135° + FAI -90°, 135°, 225°) S.H.	5
6	186502752020170810 ETC06	10% FV + 20% F. Larga Abacá S.H.	5
7	186502752020170810 ETC07	10% FV + 20% F. Corta Abacá S.H.	5
<b>Total</b>			35

**Nota:** Las probetas fueron realizadas en un molde con la utilización de mezcla de resina con refuerzo de fibra de hoja de abacá y algodón, la configuración de los porcentajes de fibra y fracción volumétrica se realiza según especificaciones declaradas por el cliente.

**Observaciones:** Ninguna.

<b>Elaborado por:</b>		<b>Aprobado por:</b>
Ing. Fernando Galarza	Ing. Ángel Balseca	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

**Fecha de entrega de Informe:** Ambato, 06 de diciembre de 2017.  
**N°. Factura:** 001-002-000003896



### Resultados:

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
1	186502752020170810-EFC 01-1	18.7	52.4	12.58	3.2	83.62	12.938	97.37	3919.70	2.48	OAB
2	186502752020170810-EFC 01-2	18.7	52.4	12.9	2.98	85.2	9.199	111.56	6782.67	1.64	OAB
3	186502752020170810-EFC 01-3	18.7	52.4	12.59	3.18	66.27	9.329	78.08	4386.47	1.78	OAB
4	186502752020170810-EFC 01-4	18.7	52.4	12.53	2.87	85.2	10.857	123.83	6623.28	1.87	OAB
5	186502752020170810-EFC 01-5	18.7	52.4	13.06	2.86	72.58	13.182	101.91	4505.41	2.26	OAB
Promedio $\bar{x}$						78.57	11.10	102.55	5243.50	2.01	
Desviación estándar $S_{n-1}$						8.67	1.91	17.03	1351.35	0.35	
Coeficiente de variación CV						11.03	17.16	16.61	25.77	17.51	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
6	186502752020170810-EFC 02-1	22	42.3	12.96	3.06	59.96	13.093	74.11	3083.14	2.40	OAB
7	186502752020170810-EFC 02-2	22	42.3	13.09	2.94	59.96	17.952	79.49	2510.19	3.17	OAB
8	186502752020170810-EFC 02-3	22	42.3	13.07	2.94	61.53	14.076	81.70	3290.26	2.48	OAB
9	186502752020170810-EFC 02-4	22	42.3	13.2	2.79	47.33	14.323	69.09	2881.75	2.40	OAB
10	186502752020170810-EFC 02-5	22	42.3	13.23	2.83	56.8	16.608	80.41	2851.36	2.82	OBB
Promedio $\bar{x}$						57.12	15.21	76.96	2923.34	2.65	
Desviación estándar $S_{n-1}$						5.73	2	5.26	290.59	0.33	
Coeficiente de variación CV						10.4	13.16	6.84	9.94	12.61	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
11	186502752020170810-EFC 03-1	24.6	41.2	12.98	3.41	78.89	7.298	78.40	5250.74	1.49	OAB
12	186502752020170810-EFC 03-2	24.6	41.2	12.98	3.42	88.36	7.901	87.30	5384.69	1.62	OAB
13	186502752020170810-EFC 03-3	24.6	41.2	13.05	3.39	105.71	9.875	105.73	5263.92	2.01	OAB
14	186502752020170810-EFC 03-4	24.6	41.2	12.71	3.43	104.13	10.359	104.46	4899.71	2.13	OAB
15	186502752020170810-EFC 03-5	24.6	41.2	12.91	3.34	96.25	9.152	100.25	5465.87	1.83	OAB
Promedio $\bar{x}$						94.67	8.92	95.23	5252.98	1.82	
Desviación estándar $S_{n-1}$						11.21	1.29	11.90	216.56	0.26	
Coeficiente de variación CV						11.84	14.52	12.50	4.12	14.54	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
16	186502752020170810-EFC 04-1	24.5	41.2	13.07	2.98	69.42	17.492	71.77	2868.54	3.13	OAB
17	186502752020170810-EFC 04-2	24.5	41.2	13.13	3.06	74.16	16.619	72.38	2965.35	3.05	OAB
18	186502752020170810-EFC 04-3	24.5	41.2	13.09	3.14	72.58	11.506	67.48	3891.38	2.17	OAB
19	186502752020170810-EFC 04-4	24.5	41.2	13.09	2.87	66.27	15.538	73.76	3445.69	2.68	OAB
20	186502752020170810-EFC 04-5	24.5	41.2	13.14	2.91	66.27	15.428	71.47	3316.45	2.69	OAB
Promedio $\bar{x}$						69.74	15.32	71.37	3297.48	2.74	
Desviación estándar $S_{n-1}$						3.60	2.29	2.34	409.07	0.38	
Coeficiente de variación CV						5.16	14.96	3.29	12.41	13.89	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
21	186502752020170810-EFC 05-1	24.4	42.2	13.25	3.13	31.56	13.627	36.47	1425.04	2.56	OAB
22	186502752020170810-EFC 05-2	24.4	42.2	13.16	3.13	34.71	16.749	40.38	1283.86	3.15	OAB
23	186502752020170810-EFC 05-3	24.4	42.2	13.22	3.06	42.6	15.885	51.62	1769.97	2.92	OAB
24	186502752020170810-EFC 05-4	24.4	42.2	13.1	3.05	36.29	16.081	44.67	1517.90	2.94	OAB
25	186502752020170810-EFC 05-5	24.4	42.2	13.24	3.33	41.02	15.213	41.91	1378.80	3.04	OAB
Promedio $\bar{x}$						37.24	15.51	43.01	1475.11	2.92	
Desviación estándar $S_{n-1}$						4.54	1.19	5.65	185.16	0.22	
Coeficiente de variación CV						12.20	7.65	13.14	12.55	7.58	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
26	186502752020170810-EFC 06-1	24.8	41.6	12.54	3.05	74.16	9.521	95.36	5473.06	1.74	OAB
27	186502752020170810-EFC 06-2	24.8	41.6	12.98	3.15	71	9.68	82.69	4519.77	1.83	OAB
28	186502752020170810-EFC 06-3	24.8	41.6	12.59	3.09	77.31	12.085	96.47	4305.54	2.24	OAB
29	186502752020170810-EFC 06-4	24.8	41.6	12.77	3.28	63.11	14.954	68.91	2341.36	2.94	OAB
30	186502752020170810-EFC 06-5	24.8	41.6	12.95	3.07	72.58	9.875	89.20	4903.83	1.82	OAB
Promedio $\bar{x}$						71.63	11.22	86.20	4308.71	2.11	
Desviación estándar $S_{n-1}$						5.30	2.33	11.28	1185.84	0.50	
Coeficiente de variación CV						7.41	20.78	13.04	27.52	23.75	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
31	186502752020170810-EFC 07-1	24.7	41.8	12.89	3.36	17.35	4.125	17.88	2150.53	0.83	OAB
32	186502752020170810-EFC 07-2	24.7	41.8	12.76	3.34	37.87	5.894	39.91	3378.59	1.18	OAB
33	186502752020170810-EFC 07-3	24.7	41.8	12.92	3.2	22.09	4.739	25.05	2752.56	0.91	OAB
34	186502752020170810-EFC 07-4	24.7	41.8	12.94	3.2	25.24	3.745	28.57	3973.68	0.72	OAB
35	186502752020170810-EFC 07-5	24.7	41.8	12.93	3.28	28.4	5.255	30.62	2961.19	1.03	OAB
Promedio $\bar{x}$						26.19	4.75	28.41	3043.31	0.94	
Desviación estándar $S_{n-1}$						7.70	0.86	8.05	683.07	0.18	
Coeficiente de variación CV						29.40	18.12	28.34	22.45	19.16	

### Nomenclatura:

**De tipo de falla evaluado:** el tipo de falla evaluado se lo realiza mediante los criterios de la norma ASTM D7264-2015.

Primer carácter		Segundo carácter		Tercer carácter	
O	Otros	A	En el punto de carga	B	Fondo
O	Otros	L	Entre la carga y el punto de apoyo	V	varios





**LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES  
ENSAYO DE FLEXIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS**

**INFORME N°: 186502752020170810-EFC**

**Datos informativos: N° de proforma:** RM\_2017\_039  
**Empresa / Cliente:** Ing. Juan Paredes  
**RUC/C.I.:** 1865027520001      **Ciudad:** Ambato.  
**Dirección:** Av. Los Chasquis y Río Guayllabamba, Edif. Ciencias Básicas. UTA  
**Teléfono:** 0984427607      **Correo:** jgparedes@uta.edu.ec  
**Datos del ensayo:**  
**Lugar de Ejecución del Ensayo:** Laboratorio de Resistencia de Materiales.  
**Dirección:** Ambato/Catiglata. Toronto y Rio de Janeiro.  
**Método de ensayo:** ASTM D7264-2015. Método de prueba estándar para propiedades de flexión de materiales compuestos de matriz de polímero.  
**Tipo de ensayo:** Cuantitativo.      **Procedimiento:** A  
**Equipo utilizado:** Máquina de ensayos universal. Metro test 50 kN  
**Velocidad de ensayo:** 10 mm/min    **Precarga:** 0 N    **Distancia entre apoyos:** 100 mm  
**Fecha de Inicio de Ensayo:** 30/11/2017.    **Fecha de Finalización de Ensayo:** 01/12/2017.

Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de materiales compuestos. Las probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.

**OBJETOS DE ENSAYO**

**Número de Probetas cuantificadas**

N°	Identificación del grupo	Configuración de la probeta	Probetas a Ensayar
1	186502752020170810 EFC 08	20% FV + 10% (FAB 0° + FAI 90°) S.H.	6
2	186502752020170810 EFC 09	10% FV + 20% (FAB 0° + FAI 90°) S.H.	6
3	186502752020170810 EFC 10	20% FV + 10% (FAB 45° + FAI 135°) S.H.	6
4	186502752020170810 EFC 11	10% FV + 20% (FAB 45° + FAI 135°) S.H.	6
5	186502752020170810 EFC 12	30% (FAB 0°, 45°, 135° + FAI 90°, 135°, 225°) S.H.	6
6	186502752020170810 EFC 13	10% FV + 20% F. Larga Abacá S.H.	6
7	186502752020170810 EFC 14	10% FV + 20% F. Corta Abacá S.H.	5
<b>Total</b>			<b>41</b>

**Nota:** Las probetas fueron realizadas en un molde con la utilización de mezcla de resina con refuerzo de fibra de hoja de abacá y algodón, la configuración de los porcentajes de fibra y fracción volumétrica se realiza según especificaciones declaradas por el cliente.

**Observaciones:** Ninguna.

<b>Elaborado por:</b>		<b>Aprobado por:</b>
Ing. Fernando Galarza	Ing. Ángel Balseca	Ing. Esteban López Espinel
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

**Ambato, 04 de Diciembre del 2017.  
N°. Factura. 001-002-000003896**



## Resultados:

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
1	186502752020170810-EFC 08-1	21,6	54,5	13,2	3,37	116,76	3,659	93,46	15790,94	0,74	OAB
2	186502752020170810-EFC 08-2	21,6	54,5	13,13	3,34	148,31	5,451	121,50	13903,69	1,09	OAV
3	186502752020170810-EFC 08-3	21,6	54,5	13,17	3,32	148,31	4,932	122,60	15598,66	0,98	OAB
4	186502752020170810-EFC 08-4	21,6	54,5	13,34	3,49	116,76	3,185	86,23	16161,90	0,67	OAM
5	186502752020170810-EFC 08-5	21,6	54,5	13,21	3,42	181,45	6,681	140,92	12849,15	1,37	OAV
6	186502752020170810-EFC 08-6	21,6	54,5	13,18	3,33	194,07	5,528	159,34	18033,59	1,10	OAB
Promedio $\bar{x}$						150,94	4,91	120,68	15389,66	0,99	
Desviación estándar $S_{n-1}$						32,07	1,29	27,70	1814,04	0,26	
Coeficiente de variación CV						21,24	26,34	22,95	11,79	26,10	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
7	186502752020170810-EFC 09-1	22,5	52,1	13,37	3,12	124,65	11,162	114,93	6875,35	2,09	OAV
8	186502752020170810-EFC 09-2	22,5	52,1	13,1	3,05	140,42	12,613	138,27	7488,24	2,31	OAT
9	186502752020170810-EFC 09-3	22,5	52,1	13,24	2,9	99,4	9,146	107,12	8414,21	1,59	OAM
10	186502752020170810-EFC 09-4	22,5	52,1	13,13	2,83	112,02	9,794	127,83	9608,41	1,66	OAB
11	186502752020170810-EFC 09-5	22,5	52,1	13,06	2,9	129,38	13,108	141,35	7747,00	2,28	OAT
12	186502752020170810-EFC 09-6	22,5	52,1	13,11	3,15	134,11	12,506	123,71	6542,57	2,36	OAT
Promedio $\bar{x}$						123,33	11,39	125,54	7779,30	2,05	
Desviación estándar $S_{n-1}$						15,15	1,63	13,21	1111,86	0,34	
Coeficiente de variación CV						12,28	14,34	10,52	14,29	16,62	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
13	186502752020170810-EFC 10-1	20,5	57,2	13,39	3,12	173,56	6,539	159,79	16316,76	1,22	OAV
14	186502752020170810-EFC 10-2	20,5	57,2	13,14	3,2	211,43	7,489	188,56	16392,21	1,44	OAM
15	186502752020170810-EFC 10-3	20,5	57,2	13,2	3,3	192,49	5,525	160,69	18361,16	1,09	OAM
16	186502752020170810-EFC 10-4	20,5	57,2	13,07	2,97	197,22	7,144	205,28	20156,01	1,27	OAB
17	186502752020170810-EFC 10-5	20,5	57,2	13,19	3,08	159,36	6,385	152,83	16190,55	1,18	OAM
18	186502752020170810-EFC 10-6	20,5	57,2	13,15	3,32	195,65	6,048	161,98	16806,14	1,20	OAM
Promedio $\bar{x}$						188,29	6,52	171,52	17370,47	1,24	
Desviación estándar $S_{n-1}$						18,66	0,72	20,62	1582,32	0,12	
Coeficiente de variación CV						9,91	10,97	12,02	9,11	9,34	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
19	186502752020170810-EFC 11-1	21,5	56,1	13,33	2,7	124,65	12,045	153,93	9860,62	1,95	OAB
20	186502752020170810-EFC 11-2	21,5	56,1	13,14	2,97	99,4	10,954	102,91	6590,05	1,95	OAB
21	186502752020170810-EFC 11-3	21,5	56,1	13,08	2,94	47,33	10,845	50,24	3282,44	1,91	OAT
22	186502752020170810-EFC 11-4	21,5	56,1	13,19	2,93	93,09	8,472	98,65	8279,60	1,49	OAB
23	186502752020170810-EFC 11-5	21,5	56,1	13,3	2,77	96,25	8,491	113,18	10025,15	1,41	OAB
24	186502752020170810-EFC 11-6	21,5	56,1	13,24	2,85	104,13	9,964	116,19	8524,32	1,70	OAB
Promedio $\bar{x}$						94,14	10,13	105,85	7760,36	1,74	
Desviación estándar $S_{n-1}$						25,51	1,44	33,54	2522,50	0,24	
Coeficiente de variación CV						27,10	14,18	31,69	32,50	13,91	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
25	186502752020170810-EFC 12-1	21,8	60,5	13,54	4,27	44,18	12,411	21,47	844,22	3,18	OAM
26	186502752020170810-EFC 12-2	21,8	60,5	13,41	3,66	25,24	10,59	16,86	906,28	2,33	OAB
27	186502752020170810-EFC 12-3	21,8	60,5	13,76	3,82	20,51	10,532	12,26	634,73	2,41	OAM
28	186502752020170810-EFC 12-4	21,8	60,5	13,6	3,81	17,35	7,631	10,55	755,69	1,74	OAM
29	186502752020170810-EFC 12-5	21,8	60,5	13,61	3,79	28,4	13,105	17,43	731,22	2,98	OAM
30	186502752020170810-EFC 12-6	21,8	60,5	13,61	4,16	22,09	11,378	11,25	495,37	2,84	OAM
Promedio $\bar{x}$						26,30	10,94	14,97	727,92	2,58	
Desviación estándar $S_{n-1}$						9,56	1,91	4,31	147,57	0,52	
Coeficiente de variación CV						36,34	17,48	28,76	20,27	20,34	

Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
31	186502752020170810-EFC 13-1	22,6	63,1	13,12	3,61	198,8	8,414	139,52	9569,70	1,82	OAM
32	186502752020170810-EFC 13-2	22,6	63,1	13,1	3,55	137,27	5,813	99,78	10073,00	1,24	OAV
33	186502752020170810-EFC 13-3	22,6	63,1	13,14	3,55	91,51	4,374	66,31	8897,12	0,93	OAV
34	186502752020170810-EFC 13-4	22,6	63,1	13,13	3,61	254,03	5,99	178,15	17163,74	1,30	OAV
35	186502752020170810-EFC 13-5	22,6	63,1	13,28	3,51	96,25	3,861	70,59	10852,29	0,81	OAB
36	186502752020170810-EFC 13-6	22,6	63,1	13,1	3,41	213	8,802	167,80	11646,72	1,80	OAB
Promedio $\bar{x}$						165,14	6,21	120,36	11367,10	1,32	
Desviación estándar $S_{n-1}$						66,74	2,03	48,54	2998,34	0,42	
Coeficiente de variación CV						40,41	32,75	40,33	26,38	32,18	



Probeta	Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad secante de flexión (Mpa)	Deformación máxima (%)	Tipo de falla evaluado
				Ancho	Espesor						
37	186502752020170810-EFC 14-1	22,9	55,3	13,13	3,51	63,11	4,802	46,82	5786,69	1,01	OAV
38	186502752020170810-EFC 14-2	22,9	55,3	13,16	3,11	105,71	6,944	99,66	9614,12	1,30	OAB
39	186502752020170810-EFC 14-3	22,9	55,3	13,09	3,07	104,13	5,849	101,28	11751,13	1,08	OAB
40	186502752020170810-EFC 14-4	22,9	55,3	13,18	3,2	100,98	7,054	89,78	8286,57	1,35	OAB
41	186502752020170810-EFC 14-5	22,9	55,3	13,22	3,22	135,69	8,531	118,79	9009,25	1,65	OAB
Promedio $\bar{x}$						101,92	6,64	91,27	8889,55	1,28	
Desviación estándar $S_{n-1}$						25,82	1,40	26,96	2163,29	0,25	
Coeficiente de variación CV						25,33	21,10	29,53	24,34	19,75	

### Nomenclatura:

**De tipo de falla evaluado:** el tipo de falla evaluado se lo realiza mediante los criterios de la norma ASTM D2764-2015.

Primer carácter		Segundo carácter		Tercer carácter	
O	Otros	A	En el punto de carga	B	Fondo
		L	Entre la carga y el punto de apoyo	V	Varios
				T	Superior