



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:

“ESTUDIO DEL PROCESO DE CORTE LÁSER DE CO₂ DEL MATERIAL
COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADA CON CASCARILLA
DE ARROZ”

AUTOR: Juan Carlos Tonato Tonato

TUTOR: Ing. Cristian Pérez Mg.

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: “ESTUDIO DEL PROCESO DE CORTE LÁSER DE CO₂ DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADA CON CASCARILLA DE ARROZ” elaborado por el señor JUAN CARLOS TONATO TONATO, estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Certifico:

- Que la presente tesis es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos.
- Es concluida y puede continuar con el trámite correspondiente.

Ambato, enero del 2019

.....

Ing. Cristian Pérez Mg.

DOCENTE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE TRABAJO

Declaro que los criterios expresados en el Trabajo Experimental denominado: “ESTUDIO DEL PROCESO DE CORTE LÁSER DE CO₂ DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADA CON CASCARILLA DE ARROZ”, así como también las ideas análisis, conclusiones son auténticas y de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor del presente proyecto.

Ambato, enero del 2019

EL AUTOR

.....
Juan Carlos Tonato Tonato

C.I. 185009034-9

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 proceso de investigación según las normas de la institución.

Cedo los derechos en línea patrimonial de este 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, enero del 2019

EL AUTOR

.....

Juan Carlos Tonato Tonato

C.I. 185009034-9

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por el egresado Juan Carlos Tonato Tonato de la Carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “ESTUDIO DEL PROCESO DE CORTE LÁSER DE CO₂ DEL MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADA CON CASCARILLA DE ARROZ”.

Ambato, enero del 2019

Para constancia firman:

.....

Ing. Christian Castro Mg.

.....

Ing. Santiago Cabrera Mg.

DEDICATORIA

“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica” Aristóteles

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para introducirse en el bello y maravilloso mundo del saber” Albert Einstein

El esfuerzo que realizaron mis padres para que pueda cumplir mis metas y llegue a ser una persona de bien, mediante la educación y la perseverancia, es incalculable, es por esta razón que el presente trabajo de titulación se la dedico a Dios por darme la fortaleza de seguir superándome cada día, a mis adorables y cariñosos padres Adolfo Tonato y Salome Tonato quienes son mi motivación para seguir en adelante, y que gracias a ellos pude alcanzar mi meta de ser un profesional. También se la dedico a mis hermanos, hermanas, sobrinos y sobrinas quienes también formaron parte de este gran logro.

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento más grande que le puedo dar a la vida es a Dios quien me dio la sabiduría y la fuerza necesaria para seguir adelante. A mis padres Adolfo y Salome, a mis hermanos y hermanas Elvia, Verónica, Jorge, Olguita, Miguel, Víctor, Enrique, Mónica, Antonio y de una manera muy especial a mi hermano Luis quien me apoyó moral y condicionalmente. También agradezco a mis cuñados y cuñadas por los consejos brindados, que siempre los tengo presente.

Agradezco infinitamente a la facultad de Ingeniería Mecánica que a través de sus docentes compartieron sus conocimientos y experiencias vividas en el campo de la ingeniería, que son de mucha utilidad para forjarme como profesional.

También agradezco a mi tutor Ing. Cristian Pérez Mg. por la confianza depositada en mí para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Por ultimo agradezco a la Universidad Técnica de Ambato por permitirme ser parte de esta gran familia universitaria, en el cual pude conocer a unos excelentes amigos y compañeros durante estos 5 años de estudio.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA	i
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DE TRABAJO	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN EJECUTIVO	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO I.	1
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Fundamentación teórica	4
1.2.1 Materiales compuestos	4
1.2.2 Matriz	5
1.2.2.1 Resina epoxi.....	5
1.2.2.2 Resina poliéster.....	5
1.2.3 Refuerzo	6
1.2.3.1 Fibras naturales	6
1.2.3.2 Fibra de cascarilla de arroz	7
1.2.4 Manufactura de materiales compuestos	8
1.2.5 Corte láser (LBC)	8
1.2.5.1 Componentes del láser	9
1.2.5.2 Resonador óptico	9
1.2.5.3 Medio de ganancia del láser.....	10
1.2.5.4 Fuente de bombeo	10
1.2.6 Propiedades del láser	10
1.2.7 Tipos de láser.....	11
1.2.7.1 Láser Nd-YAG.....	11
1.2.7.2 Láser de CO ₂	11
1.2.8 Parámetros del proceso.....	12
1.2.8.1 Potencia del haz láser.....	13
1.2.8.2 Velocidad de corte	13

1.2.8.3	Gas de asistencia o protección	13
1.2.9	Parámetros del material	14
1.2.9.1	Densidad	14
1.2.9.2	Difusividad térmica.....	14
1.2.10	Pulso de energía en la superficie	15
1.2.11	Distribución de temperatura	15
1.2.12	Calidad de corte	17
1.2.13	Rugosidad del acabado	17
1.2.14	Medición de la rugosidad	18
1.2.15	Zona afectada térmicamente.....	19
1.2.16	Diseño de experimentos (DOE).....	20
1.2.16.1	Verificación de los supuestos del modelo.....	20
1.2.16.2	Diseño factorial.....	20
1.2.16.3	Metodología de superficie de respuesta.....	21
1.2.16.4	Diseño de superficie de respuesta.....	22
1.2.16.5	Diseño central compuesto.....	23
1.2.16.6	Diseño de Box-Behnken	24
1.2.16.7	Verificación de la hipótesis de investigación	24
1.2.16.7.1	Significancia observada frente a significancia predefinida..	25
1.2.16.7.2	Criterio de aceptación y rechazo	25
1.2.17	Ensayo de inflamabilidad	26
1.2.18	Norma ISO 3795	26
1.2.18.1	Equipos	27
1.2.18.2	Muestras de materiales.....	27
1.2.18.3	Muestreo	28
1.2.18.4	Acondicionamiento.....	28
1.2.18.5	Procedimiento	28
1.2.18.6	Cálculo de la velocidad de combustión	29
1.3	Objetivos	29
1.3.1	Objetivo General	29
1.3.2	Objetivos Específicos	29
CAPÍTULO II.	30
2.	METODOLOGÍA	30
2.1	Materiales	30

2.2	Métodos.....	31
2.2.1	Nivel o tipo de investigación.....	31
2.3	Diseño experimental	31
2.3.1	Formas geométricas de corte.....	33
2.3.2	Espesor del material compuesto.....	34
2.3.3	Parámetros de entrada para el material compuesto	37
2.3.4	Modelo del experimento.....	39
2.3.4.1	Compuesto de matriz poliéster	39
2.3.4.2	Compuesto de matriz epóxica.....	39
2.3.5	Software Estadístico	40
2.4	Hipótesis.....	42
2.4.1	Señalamiento de variables de la hipótesis	42
2.4.1.1	Variable independiente	42
2.4.1.2	Variable dependiente	42
2.4.1.3	Termino de relación	42
2.5	Operalización de variables.....	43
2.5.1.1	Variable Independiente.....	43
2.5.2	Variable Dependiente	44
2.6	Plan de recolección de información.....	45
2.7	Plan de procesamiento y análisis	45
2.8	Diagrama de proceso	45
2.8.1	Procesamiento	48
2.8.1.1	Composición de los materiales	48
2.8.1.1.1	Material compuesto de matriz polimérica.....	48
2.8.1.1.2	Material compuesto de matriz epoxi.....	51
2.8.1.2	Tabulación de masas totales de la matriz y refuerzo	53
2.8.1.3	Fabricación de láminas del material compuesto mediante estratificación a compresión.....	53
2.8.1.4	Ensayos de corte por láser	56
2.8.1.5	Equipo de medición	58
2.8.1.5.1	Calibración del Rugosímetro.....	59
2.8.1.5.2	Medición de la rugosidad.....	60
2.8.1.6	Efecto térmico.....	61
2.8.1.7	Ensayo de inflamabilidad.....	62
CAPÍTULO III.....		67

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
3.1 Análisis e interpretación de resultados	67
3.1.1 Recolección de datos	67
3.1.2 Datos y resultados de corte por láser	67
3.1.2.1 Compuesto de matriz poliéster	67
3.1.2.1.1 Temperaturas medidas con el pirómetro	67
3.1.2.1.2 Medición de rugosidades.....	69
3.1.2.1.3 Cálculo de la densidad	71
3.1.2.1.4 Tiempo de pulso láser	72
3.1.2.1.5 Cálculo de la temperatura superficial.....	73
3.1.2.1.6 Tabulación y selección de temperaturas superficiales	75
3.1.2.1.7 Distribución de temperaturas a diferentes espesores	75
3.1.2.2 Compuesto de matriz epóxica.....	79
3.1.2.2.1 Temperaturas medidas con el pirómetro	79
3.1.2.2.2 Medición de rugosidades.....	80
3.1.2.2.3 Cálculo de la densidad	82
3.1.2.2.4 Tiempo de pulso láser	83
3.1.2.2.5 Cálculo de la temperatura superficial.....	83
3.1.2.2.6 Tabulación y selección de temperaturas superficiales	86
3.1.2.2.7 Distribución de temperaturas a diferentes espesores	86
3.1.3 Datos y resultados del ensayo de inflamabilidad	90
3.1.3.1 Ficha de reporte de los ensayos de inflamabilidad del Banco de pruebas UTA del compuesto de matriz poliéster	90
3.1.3.2 Ficha de reporte de los ensayos de inflamabilidad del Banco de pruebas UTA del compuesto de matriz epóxica.....	96
3.1.4 Pérdida de masa.....	101
3.2 Análisis de resultados	102
3.2.1 Análisis de la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz	102
3.2.1.1 Prueba de normalidad	102
3.2.1.2 Prueba de igualdad de varianzas.....	104
3.2.1.3 Análisis de varianza – términos de mayor y menor afectación ..	105
3.2.1.4 Gráfica de superficie de respuesta	109
3.2.2 Análisis de la temperatura (°C) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz	112

3.2.2.1	Prueba de normalidad	112
3.2.2.2	Prueba de igualdad de varianzas	113
3.2.2.3	Análisis de varianza – términos de mayor y menor afectación ..	114
3.2.2.4	Gráfica de superficie de respuesta	119
3.3	Verificación de hipótesis.....	121
CAPÍTULO IV.	124
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
4.1	Conclusiones	124
4.2	Recomendaciones	126
Bibliografía	127
ANEXOS	131

ÍNDICE DE GRÁFICOS Y TABLAS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades de la resina poliéster y resina epóxica.	6
Tabla 1.2. Características y propiedades físicas de la fibra de cascarilla de arroz.....	7
Tabla 1.3. Características y propiedades químicas de la fibra de cascarilla de arroz.	8
Tabla 1.4. Aplicaciones generales del rayo láser.	12
Tabla 1.5. Valores de rugosidad medias habituales para procesos de manufactura..	19
Tabla 2.1. Especificaciones y características técnicas de la máquina cortadora láser de CO ₂ empleada en la investigación.....	30
Tabla 2.2. Variables que se pueden controlar.	32
Tabla 2.3. Variables que se no pueden controlar.	32
Tabla 2.4. Variable respuesta.	32
Tabla 2.5. Medición N° 1 de profundidades de corte por láser de CO ₂ del MC de matriz poliéster.	35
Tabla 2.6. Medición N° 2 de profundidades de corte por láser de CO ₂ del MC de matriz poliéster.	35
Tabla 2.7. Promedio de profundidades de corte por láser del MC de matriz poliéster.	36
Tabla 2.8. Medición N°1 de profundidades de corte por láser de CO ₂ del MC de matriz epoxi.....	36
Tabla 2.9. Medición N°2 de profundidades de corte por láser de CO ₂ del MC de matriz epoxi.....	36
Tabla 2.10. Promedio de profundidades de corte por láser del MC de matriz epoxi.	37
Tabla 2.11. Parámetros de entrada con sus respectivos niveles experimentales.....	38
Tabla 2.12. Datos seleccionados para la determinación de corridas.	39
Tabla 2.13. Resumen de corridas base y totales del compuesto de matriz poliéster y epoxi.....	39
Tabla 2.14. Resumen de puntos en el cubo y corridas totales.....	40
Tabla 2.15. Modelo experimental de tratamientos.....	40
Tabla 2.16. Operacionalización de la variable independiente.....	43
Tabla 2.17. Operacionalización de la variable dependiente.....	44
Tabla 2.18. Masas totales de la matriz y refuerzo de los materiales compuestos.	53

Tabla 2.19. Elaboración de probetas para ensayos de corte por láser e inflamabilidad.	53
Tabla 2.20. Resumen de láminas y probetas a ensayar.	56
Tabla 2.21. Combinación de factores y niveles empleados en el corte por láser de CO ₂ del compuesto de matriz poliéster.	57
Tabla 2.22. Combinación de factores y niveles empleados en el corte por láser de CO ₂ del compuesto de matriz epóxica.	58
Tabla 3.1. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz poliéster, réplica 1.	67
Tabla 3.2. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz poliéster, réplica 2.	68
Tabla 3.3. Resultados de las rugosidades superficiales medidas en las probetas de matriz poliéster.	69
Tabla 3.4. Medición de masas de las probetas de matriz poliéster.	71
Tabla 3.5. Determinación del tiempo de pulso a varias velocidades de corte, para el compuesto de matriz poliéster.	73
Tabla 3.6. Parámetros generales de corte por láser, para el compuesto de matriz poliéster.	73
Tabla 3.7. Propiedades del compuesto de matriz poliéster.	73
Tabla 3.8. Cálculo analítico de las temperaturas superficiales generadas en el proceso de corte por láser de CO ₂ del compuesto de matriz poliéster.	74
Tabla 3.9. Comparación de Temperaturas determinadas analíticamente y medidas con el pirómetro en el compuesto de matriz poliéster.	75
Tabla 3.10. Datos de entrada para la distribución de temperaturas internas mediante resistencias térmicas, compuesto de matriz poliéster.	75
Tabla 3.11. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz poliéster, réplica 1.	76
Tabla 3.12. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz poliéster, réplica 2.	77
Tabla 3.13. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz epóxica, replica 1.	79
Tabla 3.14. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz epóxica, replica 2.	79

Tabla 3.15. Resultados de las rugosidades superficiales medidas en las probetas de matriz epóxica.	80
Tabla 3.16. Medición de masas de las probetas de matriz epóxica.....	82
Tabla 3.17. Determinación del tiempo de pulso a varias velocidades de corte, matriz epóxica.	83
Tabla 3.18. Parámetros generales de corte por láser, matriz epóxica.	83
Tabla 3.19. Propiedades del compuesto de matriz epóxica.....	84
Tabla 3.20. Cálculo analítico de las temperaturas superficiales generadas en el proceso de corte por láser de CO ₂ del compuesto de matriz epóxica.....	85
Tabla 3.21. Comparación de Temperaturas determinadas analíticamente y medidas con el pirómetro en el compuesto de matriz epóxica.	86
Tabla 3.22. Datos de entrada para la distribución de temperaturas internas mediante resistencias térmicas, compuesto de matriz epóxica.	86
Tabla 3.23. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz epóxica, réplica 1.	87
Tabla 3.24. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz epóxica, réplica 2.	88
Tabla 3.25. Pérdida de masa del compuesto de matriz poliéster.....	101
Tabla 3.26. Pérdida de masa del compuesto de matriz epóxica.....	102
Tabla 3.27. Verificación de normalidad, rugosidad.	103
Tabla 3.28. Verificación de igualdad de varianzas, rugosidad.....	104
Tabla 3.29. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan y no afectan significativamente al modelo, rugosidad (Ra).	105
Tabla 3.30. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan significativamente al modelo, rugosidad (Ra).	106
Tabla 3.31. Verificación de normalidad, temperatura superficial.	113
Tabla 3.32. Verificación de igualdad de varianzas, temperatura superficial.	114
Tabla 3.33. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan y no afectan significativamente al modelo, temperatura superficial.	115
Tabla 3.34. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan significativamente al modelo, temperatura superficial.	116
Tabla 3.35. Resumen del P-valor del modelo de regresión cuadrática de la rugosidad.	122

Tabla 3.36. Resumen del P-valor del modelo de regresión lineal de la temperatura superficial.....	123
--	-----

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1. La aeronave Boeing 787 posee partes de materiales compuestos a base de fibras de carbono con matriz epoxi.	4
Figura 1.2. Estructura de un material compuesto a base de matiz polimérica reforzado con fibras de vidrio.....	4
Figura 1.3. Campo de aplicación de la resina epóxica.....	5
Figura 1.4. Aplicación de la resina poliéster con fibra de vidrio en la industria automovilística.	6
Figura 1.5. Clasificación de las fibras naturales en base a su origen.	7
Figura 1.6. Diagrama esquemático de corte por láser.....	9
Figura 1.7. Diagrama esquemático del sistema de corte láser de CO ₂	9
Figura 1.8. a) Esquema del maquinado por rayo láser y b) Corte por rayo láser.	12
Figura 1.9. Transferencia de calor a través de una pared plana. a) Distribución de temperaturas en función del espesor a) Resistencia térmica equivalente.	16
Figura 1.10. Aspecto de termoplásticos cortados con rayo láser de CO ₂	17
Figura 1.11. Terminología estándar que describe el acabado superficial de un material manufacturado.....	18
Figura 1.12. a) Elementos que interviene en la medición de la rugosidad superficial. b) Escala macroscópica de la trayectoria que recorre el estilete de diamante para medir la rugosidad.	18
Figura 1.13. Etapas en la que el láser genera el HAZ y va aumentando en un tiempo determinado.....	19
Figura 1.14. Superficie de respuesta: Rendimiento esperado en función de la potencia y velocidad.	21
Figura 1.15. Esquematización de la región de operabilidad que contiene a la región experimental.....	22
Figura 1.16. Superficie de respuesta tridimensional.	22
Figura 1.17. Formación del diseño central compuesto para 2 factores.....	24
Figura 1.18. Presentación geométrica diseño de Box-Behnken para tres factores base.	24
Figura 1.19. Comparacion de significancias, valor-p > significancia predefinida. ..	25
Figura 1.20. Cámara de combustión con soporte de muestra para ensayo de inflamabilidad.	26

Figura 1.21. Forma y dimensiones de la muestra a ensayar.	27
Figura 2.1. Máquina cortadora láser de CO ₂	30
Figura 2.2. Variables del proceso de corte por láser.	32
Figura 2.3. Esquematación general del modelo experimental.	33
Figura 2.4. Formas geométricas empleadas en el corte por láser de poliméricos y compuestos.	33
Figura 2.5. Distribución de los rectángulos y dimensionamiento de la lámina del compuesto.	34
Figura 2.6. Probetas de inflamabilidad y dimensionamiento de la lámina del compuesto.	50
Figura 2.7. Proceso de corte por láser de CO ₂	56
Figura 2.8. Codificación de probetas de material compuesto de matriz poliéster. ...	56
Figura 2.9. Codificación de probetas de material compuesto de matriz epóxica.....	57
Figura 2.10. Codificación de probetas de matriz poliéster cortadas con láser.....	57
Figura 2.11. Codificación de probetas de matriz epóxica cortadas con láser.	58
Figura 2.12. Partes que conforman el Rugosímetro.....	59
Figura 2.13. Ensamble del Rugosímetro.	59
Figura 2.14. Soporte base y galga de calibración.	59
Figura 2.15. Preparación del equipo a ser calibrado.	59
Figura 2.16. Configuración de parámetros de calibración.	60
Figura 2.17. Calibración del Rugosímetro digital.....	60
Figura 2.18. Ubicación adecuada de la probeta y el palpador.	60
Figura 2.19. Medición de la rugosidad de las superficies expuestas al láser.....	61
Figura 2.20. Medición de las temperaturas superficiales del material expuesto al láser.	61
Figura 2.21. Medición de las masas de las probetas.	61
Figura 2.22. Codificación de probetas de inflamabilidad del material compuesto de matriz poliéster.....	62
Figura 2.23. Codificación de probetas de inflamabilidad del material compuesto de matriz epóxica.	63
Figura 2.24. Codificación de probetas de inflamabilidad de matriz poliéster.	63
Figura 2.25. Codificación de probetas de inflamabilidad de matriz epóxica.....	63
Figura 2.26. Medición de masa de probeta de inflamabilidad.	64

Figura 2.27. Ubicación de la probeta en la porta probetas.....	64
Figura 2.28. Configuración de la máquina de ensayos.	64
Figura 2.29. Ubicación del porta probetas en la máquina de ensayos.	65
Figura 2.30. Medición del tiempo de combustión.	65
Figura 2.31. Extracción del porta probetas.	65
Figura 2.32. Medición de masa de la probeta ensayada.....	66
Figura 2.33. Probetas ensayadas del material compuesto de matriz poliéster.	66
Figura 3.1. Diagrama de distribución de temperaturas en el material compuesto de matriz poliéster.....	78
Figura 3.2. Diagrama de distribución de temperaturas en el material compuesto de matriz epóxica.	89
Figura 3.3. Verificación grafica de la normalidad de datos, rugosidad (Ra).	103
Figura 3.4. Pareto de efectos estandarizados, rugosidad (Ra).	106
Figura 3.5. Pareto de efectos estandarizados de términos de mayor significancia, rugosidad (Ra).	107
Figura 3.6. Efectos positivos y negativos de los términos de mayor significancia, rugosidad (Ra).	107
Figura 3.7. Grafica de efectos principales de la rugosidad (Ra) de los compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica	108
Figura 3.8. Grafica de interacción para la rugosidad (Ra).	108
Figura 3.9. Superficie de respuesta de la rugosidad del compuesto de matriz poliéster.	110
Figura 3.10. Superficie de respuesta de la rugosidad del compuesto de matriz epóxica.	110
Figura 3.11. Gráfica 2D del punto óptimo de la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster.....	110
Figura 3.12. Gráfica 2D del punto óptimo de la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz epóxica.	111
Figura 3.13. Verificación grafica de la normalidad de datos, temperatura superficial.	113
Figura 3.14. Pareto de efectos estandarizados, temperatura superficial (°C).	115
Figura 3.15. Pareto de efectos estandarizados de términos de mayor significancia, temperatura superficial.....	116

Figura 3.16. Efectos positivos y negativos de los términos de mayor significancia, temperatura superficial.....	117
Figura 3.17. Gráfica de efectos principales de la temperatura superficial de los compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica.	117
Figura 3.18. Gráfica de interacción para las temperaturas superficiales.	118
Figura 3.19. Superficie de respuesta de la temperatura superficial del compuesto de matriz poliéster.....	119
Figura 3.20. Superficie de respuesta de la temperatura superficial del compuesto de matriz epóxica.	119
Figura 3.21. Gráfica 2D del punto óptimo de la temperatura superficial del compuesto de matriz poliéster.	120
Figura 3.22. Gráfica 2D del punto óptimo de la temperatura superficial del compuesto de matriz epóxica.	120

RESUMEN EJECUTIVO

El proceso de corte por láser de CO₂ al ser ampliamente empleando en el campo industrial por su excelente precisión, exactitud y a su rápido procesamiento para efectuar el corte, se investigó en dos compuestos poliméricos a base de fibras naturales (matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz), con la finalidad de evaluar la influencia de las variables independientes de entrada (potencia y velocidad de corte) en la calidad de corte por láser y adicionalmente se efectuaron ensayos de inflamabilidad para posibles aplicaciones. Las características del acabado superficial evaluadas fueron la rugosidad de la superficie cortada y el efecto térmico (temperatura superficial del borde adyacente al corte) que se efectuaron en el proceso. Se ejecutaron 26 series de pruebas experimentales para cada material compuesto, en base al diseño central compuesto mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR). Se presentaron modelos de respuesta de primer orden para las temperaturas superficiales y un modelo de segundo orden para la rugosidad (Ra) de la superficie manufacturada por láser, y se comprobó la adecuación de los modelos mediante el análisis de varianzas (ANOVA). A partir del análisis se determinó que en el material compuesto de matriz poliéster se presenta mejor calidad superficial (menor rugosidad) y menores temperaturas superficiales en comparación con el compuesto de matriz epóxica. En cuanto a las tasas de combustión que resultan de los ensayos de inflamabilidad tanto del compuesto de matriz poliéster (8,27 mm/min) y matriz epóxica (15,85 mm/min) se determinó que se encuentran dentro del rango permisible aceptable (≤ 100 mm/min y ≤ 250 mm/min) que debe cumplir la inflamabilidad de los materiales en el interior de los vehículos de carretera.

ABSTRACT

The CO₂ laser cutting process, being widely used in the industrial field due to its excellent precision, accuracy and rapid processing to make the cut, was investigated in two polymeric compounds based on natural fibers (polyester matrix and epoxy matrix reinforced with rice husk), in order to evaluate the influence of the independent input variables (power and cutting speed) on the quality of laser cutting and additionally flammability tests were carried out for possible applications. The characteristics of the surface finish evaluated were the roughness of the cut surface and the thermal effect (surface temperature of the edge adjacent to the cut) that were made in the process. Twenty-six series of experimental tests were executed for each composite material, based on the central design composed by the response surface methodology (MSR). First-order response models were presented for surface temperatures and a second-order model for the roughness (Ra) of the surface manufactured by laser, and the adequacy of the models was verified through the analysis of variances (ANOVA). From the analysis, it was determined that in the polyester matrix composite material, better surface quality (lower roughness) and lower surface temperatures are presented in comparison with the epoxy matrix compound. Regarding the combustion rates that result from the flammability tests of both the polyester matrix compound (8.27 mm / min) and epoxy matrix (15.85 mm / min) it was determined that they are within the acceptable permissible range (≤ 100 mm / min and ≤ 250 mm / min) that must comply with the flammability of the materials inside the road vehicles.

CAPÍTULO I.

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

Fundamentalmente, el presente trabajo experimental se centró en trabajos previos de investigación tales como: tesis y artículos técnicos, mismos que a continuación se describen brevemente:

En la investigación de Rony Rojas, bajo el título “ESTUDIO DE CORTE LÁSER POR CO₂ EN MATERIALES COMPUESTOS: FIBRA DE VIDRIO (FV) + RESINA POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRIO (FV) + FIBRA NATURAL (FN) + RESINA POLIÉSTER”, presentado y publicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato en el año 2018, trata del efecto de los parámetros (Potencia y velocidad) de corte láser y su influencia en la calidad de corte, mismo que fue evaluado en base a la rugosidad superficial (Ra) y a la temperatura crítica (T) de corte, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Los parámetros para realizar un corte láser CO₂ en el compuesto tradicional formado por fibra de vidrio más resina poliéster; que brinden una rugosidad superficial (Ra) adecuada y que el material se queme en lo más mínimo, se lo consigue con una potencia de 50 W y velocidad de corte de 10 mm/s.
- Los parámetros para realizar un corte láser CO₂ en el compuesto híbrido formado por fibra de vidrio, resina poliéster y fibra de cabuya; que brinden una rugosidad superficial (Ra) adecuada y que el material se queme en lo más mínimo, se lo consigue con una potencia de 85 W y velocidad de corte de 10 mm/s.

De acuerdo al artículo científico efectuado por parte del Ingeniero C. Pérez, J. Paredes, E. Lalaleo, C. Arroba y D. Núñez, presentado y publicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato en el año 2017, bajo

el tema de investigación: “ANÁLISIS NUMÉRICO/EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADO CON CASCARILLA DE ARROZ” demuestran que el material que posee óptimas propiedades mecánicas tanto a tracción, flexión e impacto es el material compuesto por fibra Tipo B (Cortes longitudinales de la cascarilla de arroz), estratificación a Compresión, con fracción volumétrica del 83% de matriz poliéster y del 17% de material de refuerzo (cascarilla de arroz).

En el artículo técnico de I. A. Choudhury y S. Shirley, bajo el tema: “LASER CUTTING OF POLYMERIC MATERIALS: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION”, presentado y publicado en el 2010, investigan la influencia que presenta las variables de entrada del proceso de corte láser de CO₂ (la presión del aire, la velocidad de corte y la potencia del láser) en la rugosidad de la superficie, la zona afectada por el calor y la precisión dimensional de tres materiales poliméricos: Polipropileno (PP), Policarbonato (PC) y Polimetilmetacrilato (PMMA). La investigación ha demostrado que se puede usar un láser de CO₂ de potencia de 500 W para cortar distintos materiales poliméricos. Del estudio, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La dimensión de HAZ para los tres polímeros estudiados es directamente proporcional a la potencia del láser e inversamente proporcional a la velocidad de corte y la presión del aire comprimido.
- La rugosidad de la superficie cortada es inversamente proporcional a la potencia del láser, la velocidad de corte y la presión del aire comprimido. Los efectos de la velocidad de corte y la presión del aire comprimido sobre la rugosidad de la superficie son más significativos que el efecto de la potencia del láser. La desviación estándar de la rugosidad de la superficie para PMMA fue de 1,1 μm . La calidad de los bordes y caras cortados con láser es mejor en el caso del PMMA que en los de PP y PC.

En el artículo técnico de “Islam Shyha, AN INVESTIGATION INTO CO₂ LASER TRIMMING OF CFRP AND GFRP COMPOSITES, Procedia Engineering, vol. 63, pp.931-937, 2013”:

Se realizó un estudio sobre el corte por láser de CO₂ de los materiales compuestos de plásticos reforzados con fibras de carbono (CFRP) y plásticos reforzados con fibras de vidrio (GFRP) para investigar la influencia de las variables del proceso de corte tales como la velocidad de corte, la potencia del rayo láser, la presión del gas y el material del elemento. Estos han sido evaluados contra medidas de respuesta clave que involucran la tasa de remoción de material (MRR), la rugosidad de la superficie y el ancho de la ranura. Obteniendo las siguientes conclusiones:

- La velocidad de corte fue el principal factor que contribuyó a la calidad de la superficie y la tasa de eliminación volumétrica del material. Los resultados de MRR en el caso de GFRP fueron siempre mayores que CFRP (se alcanzó un MRR máximo de 8 cm³ / min).
- La rugosidad promedio de la superficie osciló entre 2,7 y 6,3 μm . Comprensiblemente, el ancho del corte se redujo con mayores velocidades de corte y se registró el valor máximo para el material de GFRP (0,5 mm a una velocidad de corte de 1000 mm / min).

En el artículo técnico de C. Pérez, C. Castro y R. Valencia, bajo el tema: “THE CUBIC REGRESSION MODEL OF THERMAL ESTIMATION IN THE FLAMMABILITY TEST OF THE FIBROUS COMPOUND USED IN BUS BODIES” presentado y publicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato en el año 2019, describen modelos predictivos del comportamiento térmico durante la prueba de inflamabilidad según ISO 3795: 1989 y FMVSS 302 de materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con fibra de vidrio para aplicaciones en el interior del bus. La predicción se realizó para dos tipos de compuestos, Fibra de techo, FT, y Fibra para laterales, FL. Llegando a la conclusión que el modelo de regresión cúbica presenta el mejor ajuste de predicción con un Rq de 0.79 para FT y 0.81 para FL.

1.2 Fundamentación teórica

1.2.1 Materiales compuestos

Se considera como material compuesto a la unión de dos o más materiales de distinta naturaleza, estos materiales combinan sus características y propiedades para obtener un nuevo material con propiedades únicas (dureza, conductividad, peso, rigidez, resistencia a la corrosión, entre otras), mismas que serán necesarias para ciertas condiciones de trabajo, en las que el nuevo material debe funcionar de manera idónea. El campo de aplicación que tienen estos materiales es muy amplio, siendo los principales la industria carrocera, aeronáutica, naval y electrónica. Las aplicaciones que comúnmente se les da a estos materiales son de artículos deportivos, componentes electrónicos, guardachoques para buses, botes de navegación, entre otros [1].



Figura 1.1. La aeronave Boeing 787 posee partes de materiales compuestos a base de fibras de carbono con matriz epoxi.

Fuente: [1]

Por otro lado, en cuanto a la obtención de los materiales compuestos, son muy importantes las fracciones volumétricas de cada fase, así como la conectividad entre las mismas, ya que de ellas dependen los resultados que se quieren lograr. Generalmente, los materiales compuestos se forman de dos fases: la continua y la dispersa, también denominadas matriz (metálicos, cerámicos, polímeros o resinas orgánicas) y refuerzo (partículas, fibras), respectivamente [1] [2].

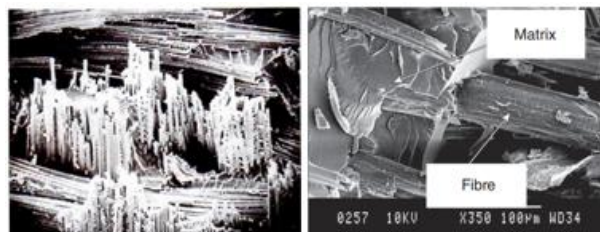


Figura 1.2. Estructura de un material compuesto a base de matriz polimérica reforzado con fibras de vidrio.

Fuente: [1]

1.2.2 Matriz

La matriz de los materiales compuestos sirve como medio de transmisión y distribución de los esfuerzos aplicados hacia el refuerzo. Esta fase también tiene la función de mantener unidas las fibras y de protegerlas del deterioro superficial que resulta de acciones químicas o de la abrasión mecánica de cierta aplicación [3].

1.2.2.1 Resina epoxi

La resina epoxi más empleada es la diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), que conjuntamente reacciona con el catalizador (tricloruro de boro) y pertenece al grupo de la familia de los materiales termoestables, con un gran campo de aplicación, tal como se ilustra en la siguiente figura [4].

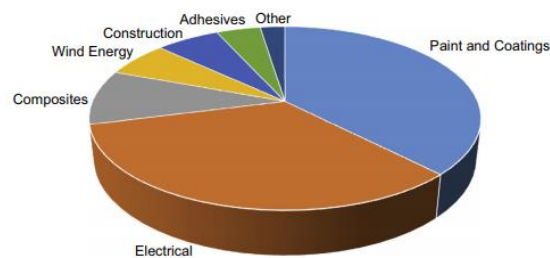


Figura 1.3. Campo de aplicación de la resina epóxica.

Fuente: [4]

Sus propiedades mecánicas (modulo elástico, tenacidad, resistencia a la fatiga, abrasión, corrosión, etc.) y características finales dependen de cierto modo de la naturaleza de los endurecedores y de las condiciones del curado [5].

1.2.2.2 Resina poliéster

Esta resina al igual que la resina epóxica es un material termoestable que reacciona con el catalizador MEK. La resina poliéster es la más utilizada en la actualidad debido a su bajo costo, excelentes propiedades mecánicas y a su fácil manejo y procesamiento. El campo de aplicación de este material es muy extenso, entre los cuales se mencionan los más importantes tales como la industria aeronáutica, aeroespacial, naval y carrocería (vehículos, buses, camiones), siendo este último el que más se destaca en la provincia de Tungurahua [5].



Figura 1.4. Aplicación de la resina poliéster con fibra de vidrio en la industria automovilística.

Fuente: [6]

En cuanto a las propiedades típicas de la resina poliéster y epóxica se describen en la siguiente tabla comparativa:

Tabla 1.1. Propiedades de la resina poliéster y resina epóxica.

Propiedad	Resina poliéster	Resina epoxi	Unidades
Densidad	1,2 – 1,5	1,1 – 1,4	g/cm ³
Módulo de Young	2 – 4,5	3 - 6	GPa
Relación de Poisson	0,37 – 0,39	0,38 – 0,4	-
Resistencia a tracción	40 - 90	35 - 100	MPa
Resistencia a compresión	90 - 250	100 – 200	MPa
Alargamiento de rotura (tracción)	2	1 – 6	%
Conductividad térmica	0,4	0,18	W/m °C
Calor específico	1350	1490	J/Kg °C
Temperatura de distorsión al calor	50 - 110	50 - 300	°C
Contracción de curado	4 – 8	1 - 2	%
Absorción de agua (24 h a 20 °C)	0,1 – 0,3	0,1 – 0,4	%

Fuente: [7]

1.2.3 Refuerzo

1.2.3.1 Fibras naturales

Son de procedencia biológica y cuentan con una serie de propiedades mecánicas, físicas y químicas, que los convierten en una de las mejores alternativas para ser empleados como material de refuerzo en los materiales compuestos. El campo de aplicación de estas fibras en la industria es considerable, debido al peso ligero y al bajo costo que ofrece. Sin embargo, lo que más se destaca de las fibras naturales es que es una materia prima renovable (biodegradable), lo cual facilita su disponibilidad y atenúa el impacto sobre el medio ambiente [8]. La clasificación de las fibras naturales se puede dar según su procedencia animal, vegetal o mineral, como se muestra en la siguiente figura.

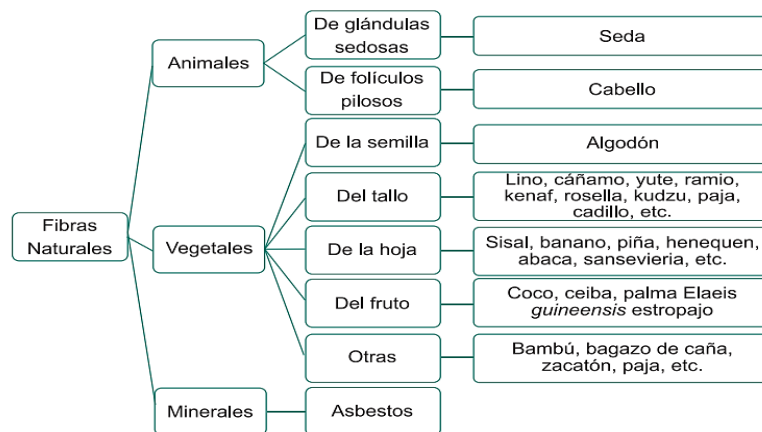


Figura 1.5. Clasificación de las fibras naturales en base a su origen.
Fuente: [8]

1.2.3.2 Fibra de cascarilla de arroz

Es una fibra natural que sirve como capa de protección de los granos de arroz. Este tipo de fibra es ampliamente estudiado a nivel mundial por sus diversos beneficios que presenta. Generalmente, la cascarilla de arroz está formada de sílice y celulosa, la longitud de esta fibra varía de 5 a 11 mm, con un ancho de 2 a 4 mm y un espesor de 50 μm [9]. Al ser la fibra con mayor contenido de minerales con una concentración de silicio de 90 a 97%, las propiedades y características químicas que más sobresalen de esta fibra es que ignifugo (no se quema tan fácilmente) e hidrofóbica (que no le penetra la humedad), lo que evita que se produzca una intensa llama durante la combustión. Sus propiedades físico-químicas empiezan a cambiar con temperaturas mayores a los 750°C y posee una magnífica resistencia a los esfuerzos aplicados [10].

Tabla 1.2. Características y propiedades físicas de la fibra de cascarilla de arroz.

Longitud	5-10 mm
Ancho	2-4 mm
Espesor promedio	50 μm
Color	Beige
Calor específico	0,9623 KJ/Kg °C
Poder calorífico	13,9 – 16,9 MJ/Kg
Conductividad térmica (k)	0,03605 W/m °C
Densidad	0,75 g/cm ³
Peso	2,5 – 4,8 mg

Fuente: [9]

Tabla 1.3. Características y propiedades químicas de la fibra de cascarilla de arroz.

PH a 25 °C	7,10 %
Fibra (Celulosa)	45,38 %
Humedad	7,41 %
Proteínas	3,59 %
Carbono	16,11 %
Oxígeno	32-34 %
Hidrogeno	5 %
Nitrógeno	0,3-2 %

Fuente: [9]

1.2.4 Manufactura de materiales compuestos

La manufactura en sí de los materiales compuestos resulta ser no muy extensa debido a que los mismos son elaborados con la geometría final que uno desea para cierta aplicación, pero por diversas cuestiones de adaptación con otros elementos, en ocasiones es fundamental realizar ciertas modificaciones, para lo cual, si no se dispone de un sistema sofisticado de corte, este proceso puede resultar ser muy complicado de realizar, hasta llegar al punto de que se deseche el componente por completo, por no cumplir con el acabado esperado. Existen métodos mecánicos de corte convencionales como el fresado y taladrado, pero estos métodos de mecanizado resultan ser difíciles de trabajar con materiales compuestos, debido a su forma y al comportamiento tan variable que presentan frente a este tipo de operaciones, con los cuales no se consigue un acabado de calidad [11].

1.2.5 Corte láser (LBC)

Es un proceso de corte térmico sin contacto físico con el material que es capaz de cortar a través de una gran cantidad de energía concentrada en una superficie muy pequeña, en donde se genera un proceso de evaporización, fusión y calentamiento del material. Este método es ampliamente utilizado en el campo industrial (automotriz, química, aeronáutica y aeroespacial), debido a su excelente precisión, exactitud y a su rápido procesamiento para efectuar el corte. El corte del material por láser sucede en fracción de segundos y el material que es removido (fundido y evaporado) se lo suprime mediante un chorro coaxial de gas auxiliar en la zona cortada, tal como se indica en la siguiente figura [12].

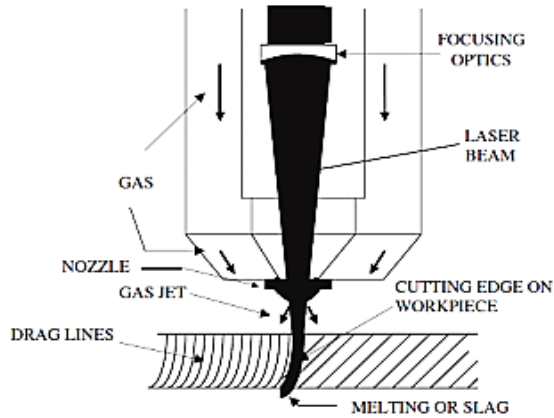


Figura 1.6. Diagrama esquemático de corte por láser.
Fuente: [12]

1.2.5.1 Componentes del láser

El láser se compone de tres partes fundamentales de operación: el resonador óptico, el medio activo y una fuente de bombeo [13].

1.2.5.2 Resonador óptico

Se compone generalmente de dos espejos, uno es completamente reflectivo (evita la salida de la radiación láser) y el otro es parcialmente transmisor (permite la circulación de la radiación láser), ambos espejos se encuentran conectados eléctricamente por medio de dos electrodos, uno a cada extremo de la cavidad óptica. En medio de los espejos dieléctricos la luz debe circular fluidamente a través del medio activo de arriba hacia abajo el mayor número de veces que se pueda, con la finalidad de alcanzar la longitud de onda requerida, tal como se muestra en la siguiente figura [13].

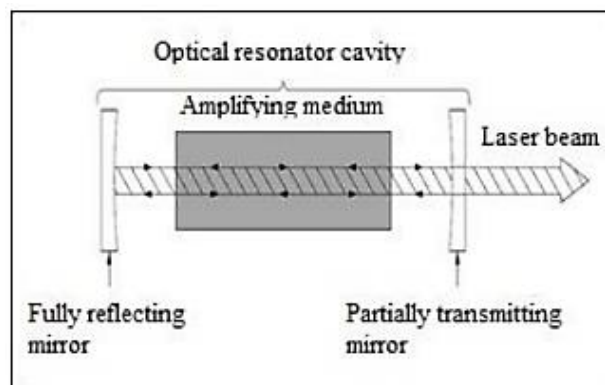


Figura 1.7. Diagrama esquemático del sistema de corte láser de CO₂.
Fuente: [13]

1.2.5.3 Medio de ganancia del láser

Este medio activo se encarga de amplificar la luz en múltiples direcciones, pero únicamente la luz que se refleja arriba y abajo entre los espejos dieléctricos del resonador se pueden amplificar varias veces hasta lograr una alta intensidad, mediante el bombeo de energía. Dependiendo de qué tipo de medio activo (gaseoso, líquido o sólido) se utilice para generar el láser, esta proporciona en su gran mayoría las propiedades características del láser que las diferencian unas de otras, así como su potencia máxima de corte, longitud de onda, entre otras [13].

1.2.5.4 Fuente de bombeo

Se define como la fuente de suministro de energía necesaria que se requiere para estimular los niveles electrónicos y vibracionales de las partículas activas, con la finalidad de alcanzar el estado de energía requerida por el medio activo para amplificar la radiación y generar el láser. Los procesos de bombeo más habituales son los de corriente eléctrica (láser gaseoso) y bombeo óptico (láser sólido) [13].

1.2.6 Propiedades del láser

Dentro de las propiedades que más sobresalen del láser se encuentra la monocromaticidad, la colimación y la luminosidad [13].

Monocromático: Cuando se genera el láser esta emite una luz de un solo color o de una sola longitud de onda, lo que le otorga la propiedad de monocromático [14].

Colimación: Se refiere a que la radiación láser puede enfocarse en un espacio muy pequeño y a considerables distancias sin que el haz se abra o disemine, otorgándole la propiedad de colimación [13].

Luminosidad: Con el enfoque del láser en un área muy pequeña y cuya intensidad se encuentra amplificada, se logra proporcionar su brillantez característica [14] [13].

1.2.7 Tipos de láser

En el campo industrial se emplean diferentes láseres para trabajos de corte y grabado pero los que se utilizan con mayor frecuencia son: láser Nd-YAG y el láser de CO₂ [13].

1.2.7.1 Láser Nd-YAG

Este sistema láser consta de un cristal de neodimio dopado con itrio y aluminio (Nd: Y₃Al₅O₁₂), capaz de generar una longitud de onda de 1.06 micras y que a su vez centra su potencia sobre la superficie del material, logrando que este se caliente con la finalidad de que se evapore o se funda. Este láser funciona a modo de pulsos (el haz láser es emitido por cortos lapsos de tiempo), misma que es transmitida hasta el material por medio de fibra óptica. Al poseer una potencia de haz baja, la longitud de onda es más corta, lo que evita que se refleje con mayor intensidad sobre las superficies metálicas, convirtiéndolo en un láser adecuado para cortar, grabar y perforar materiales metálicos, cerámicos, entre otros [15].

1.2.7.2 Láser de CO₂

Este sistema láser consta de la mezcla del CO₂ (Dióxido de carbono), N₂ (Nitrógeno) y He (Helio), con una composición fraccionada de 1:1:8 respectivamente, esta combinación de gases es capaz de producir un láser que irradia un infrarrojo, con una longitud de onda de 10.06 micras, con el cual se puede cortar y grabar materiales metálicos (aceros al carbono, aceros inoxidable de 1,5 mm de espesor) y la mayoría de materiales no metálicos (vidrios, papel, acrílicos, madera, etc.), convirtiéndolo en una de las mejores herramientas industriales. A diferencia del láser Nd-YAG que emite el haz láser a modo de pulsos, el de CO₂ lo realiza en modo de pulso continuo (el haz láser es emitido constantemente) [16]. El proceso láser y el efecto térmico asegura una soldadura limpia en el borde del corte, logrando un acabado superficial de calidad [14] [13].

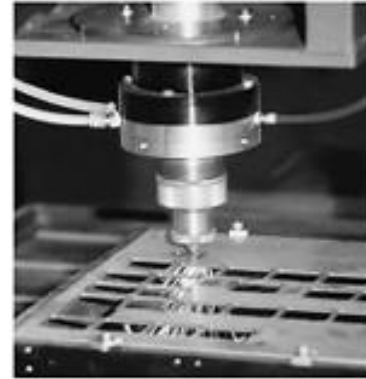
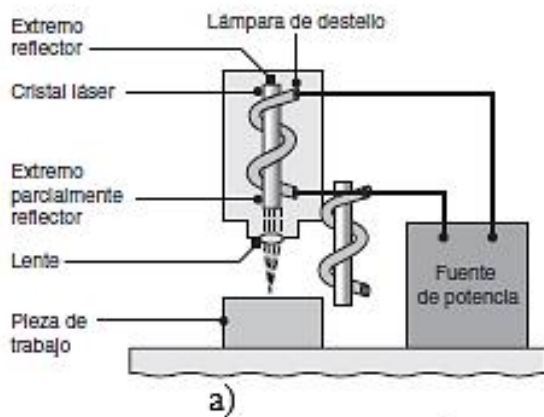


Figura 1.8. a) Esquema del maquinado por rayo láser y b) Corte por rayo láser.
Fuente: [17]

La siguiente tabla indica las aplicaciones frecuentes que se le da a los diversos tipos de rayos láser en la manufactura de materiales.

Tabla 1.4. Aplicaciones generales del rayo láser.

Aplicación	Tipo de láser
Corte	
Metales	PCO ₂ , CWCO ₂ , Nd:YAG, rubí
Plásticos	CWCO ₂
Cerámicos	PCO ₂
Taladrado	
Metales	PCO ₂ , Nd:YAG, Nd: vidrio, rubí
Plásticos	Excimer
Marcado	
Metales	PCO ₂ , Nd:YAG
Plásticos	Excimer
Cerámicos	Excimer
Tratamiento superficial, metales	CWCO ₂

Nota: P=Por pulsos, CW=onda continua; Nd: YAG=neodimio: itrio-aluminio-granate

Fuente: [17]

1.2.8 Parámetros del proceso

El corte por láser depende de varios parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de obtener una buena calidad superficial, un ancho de ranura pequeño y el mínimo HAZ (zona afectada por el calor) en el material procesado, estos parámetros de configuración son: la potencia del láser, la velocidad de corte, el gas de asistencia, el diámetro del rayo láser, la frecuencia del pulso y la posición de enfoque [18]. Cabe recalcar que los parámetros de configuración dependen mucho del tipo de máquina que se encuentre a disposición, ya que en algunos

casos las maquinas permiten únicamente configurar la potencia y la velocidad de corte, mientras que la presión del gas de asistencia, la frecuencia del pulso, la posición de enfoque vienen configuradas por defecto, es decir que permanecen constantes en el proceso.

1.2.8.1 Potencia del haz láser

Este parámetro indica la cantidad de energía por unidad de tiempo emitida por el haz láser y a medida que la potencia incrementa se puede cortar materiales con espesores más grandes, pero con el inconveniente de que no se logre un acabado superficial eficiente (mayor rugosidad). Otro factor que también aumenta por el incremento de la potencia es la zona afectada térmicamente, para lo cual, este parámetro debe regularse de manera eficiente, con la finalidad de evitar una carbonización y quemado excesivo del material [16] [19].

1.2.8.2 Velocidad de corte

Este parámetro de corte tiene una relación directa con la potencia, debido a que, la energía proporcionada a una determinada unidad de superficie del material depende del tiempo de exposición del mismo a la radiación del láser. Es decir que a velocidades muy bajas se obtienen cortes con un HAZ (zona afectada por el calor) considerable, mientras que si es muy elevada la velocidad de corte ocasiona que el láser no emita la suficiente energía en una determinada unidad de superficie para poder fundirlo o vaporizarlo y por ende no se efectuaría el corte del material [19].

1.2.8.3 Gas de asistencia o protección

Dependiendo de qué tipo de gas auxiliar se emplee en el proceso de corte láser es muy importante que los mismos cumplan ciertas funciones de protección tales como remoción del material fundido y evaporado de la zona de corte, disminuir la temperatura el borde cortado y proteger al lente láser del contacto de salpicaduras del material removido [16]; para lo cual es fundamental tener en cuenta el flujo del gas de protección, potencia del láser y la velocidad de corte [19]. Generalmente, se emplean dos tipos de gases de protección en el corte por láser, y su aplicación depende del material a manufacturar, entre las cuales se

destacan los gases inertes y activos. Dentro de los gases inertes se destacan el argón y nitrógeno, esto es debido a su bajo coste y porque controlan eficientemente las reacciones químicas y oxidaciones en los materiales metálicos, mientras que el oxígeno puro y el aire son los que más sobresalen de los gases activos, ya que los mismos se comportan de manera eficiente con las reacciones exotérmicas (producido por la presencia de oxígeno en el gas de protección) que se generan en el material al momento del corte con láser [19].

1.2.9 Parámetros del material

1.2.9.1 Densidad

Esta propiedad intensiva (no dependen del tamaño o masa del sistema) la poseen todos los materiales existentes en el universo, es decir los materiales en estado líquido, sólido y gaseoso; y se define como la cantidad de masa que ocupa un determinado volumen en un cierto espacio del material, y para su determinación se utiliza la siguiente ecuación [20]:

$$\rho = \frac{m}{v} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

- ρ : Densidad (Kg/m³),
- m : Masa (Kg)
- v : Volumen (m³)

1.2.9.2 Difusividad térmica

Esta propiedad se define como el calor propagado a través del material entre el calor que se acumula por unidad de volumen. Es decir que la difusividad térmica determina que tan rápido se propaga el calor por el material [21]. Esta propiedad que se presenta al analizar la conducción de calor en régimen transitorio, se encuentra dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde:

- α : Difusividad térmica (m²/s),
- k : Conductividad térmica (W/m °C),
- ρ : Densidad (Kg/m³)
- C_p : Calor específico (J/Kg °C) [21].

1.2.10 Pulso de energía en la superficie

Al proporcionar energía de manera instantánea (calentamiento) a una superficie de un material por medio de pulsos de energía ($e_s = constante$) láser, provoca que se genere un incremento de la temperatura de la superficie de forma instantánea, la misma que progresivamente disminuye conforme el calor del rayo láser va penetrando el material. Esto sucede en cortos periodos de tiempo y se lo determina con la siguiente expresión [21]:

$$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \alpha t}\right) \quad \text{Ec. 2.3}$$

Dónde:

- $T(x, t)$: Temperatura final (°C),
- T_i : Temperatura inicial (°C),
- e_s : Pulso de energía (J/m²)
- t : Tiempo de pulso (s),
- α : Difusividad térmica (m²/s),
- k : Conductividad térmica (W/m °C),
- x : Espesor del material (m)

La expresión anterior asume que la energía completa generada por el pulso láser ingresa al material, sin pérdida de calor de ningún modo desde la superficie del material [21].

1.2.11 Distribución de temperatura

La siguiente figura indica como la temperatura superficial se distribuye conforme va penetrando el calor por el espesor del material [22].

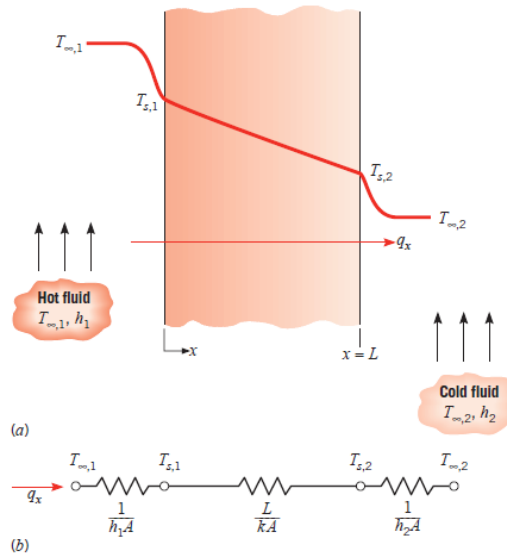


Figura 1.9. Transferencia de calor a través de una pared plana. a) Distribución de temperaturas en función del espesor a) Resistencia térmica equivalente.

Fuente: [22]

La ecuación que determina la distribución de la temperatura en el material está dada por la siguiente ecuación [22]:

$$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Dónde:

- T_x : Temperatura en función del espesor ($^{\circ}\text{C}$),
- x : Espesor (m),
- $T_{s,1}$: Temperatura superficial, $x=0$ ($^{\circ}\text{C}$),
- $T_{s,2}$: Temperatura a una distancia L ($^{\circ}\text{C}$),
- L : Espesor total del material (m)

Otra ecuación que se complementa para la determinación de las temperaturas es la resistencia térmica por conducción [22]:

$$R_{t,cond} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{q_x} = \frac{L}{k \cdot A} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Dónde:

- $R_{t,cond}$: Resistencia térmica para la conducción

- q_x : Calor, constante (W)
- $T_{s,1}$: Temperatura superficial, $x=0$ ($^{\circ}\text{C}$),
- $T_{s,2}$: Temperatura a una distancia L ($^{\circ}\text{C}$),
- L : Espesor total del material (m)
- k : Conductividad térmica (W/m $^{\circ}\text{C}$),
- A : Área de la superficie (m^2),

1.2.12 Calidad de corte

Este es el parámetro más importante al evaluar un elemento mecanizado o manufacturado (torneado, taladrado, cepillado, rectificado, pulido, corte por láser, etc.), en la cual se tiene en cuenta ciertos criterios cualitativos (apariencia, funcionalidad) y cuantitativos (rugosidad aceptable) que ayudan a optimizar el proceso de corte, con la finalidad de obtener mejores resultados en los materiales manufacturados [16].

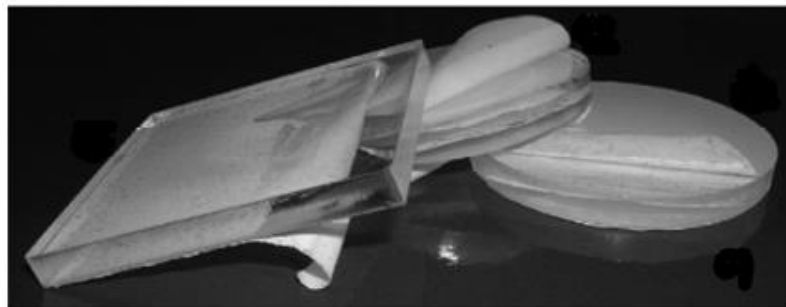


Figura 1.10. Aspecto de termoplásticos cortados con rayo láser de CO_2 .

Fuente: [23]

1.2.13 Rugosidad del acabado

Al procesar un elemento con tecnología láser (corte), se producen estrías verticales en la superficie de corte con ciertas profundidades a las cuales se las conoce como rugosidad y se expresa en términos de su peso, anchura y distancia a lo largo de la superficie. Este factor puede afectar la aplicabilidad y la apariencia del elemento cortado, y en lo posible se debe minimizar dicho factor [17]. La rugosidad incrementa con el espesor del material a cortar, pero disminuye con la configuración adecuada de la potencia del láser y la velocidad de corte [12] [13].

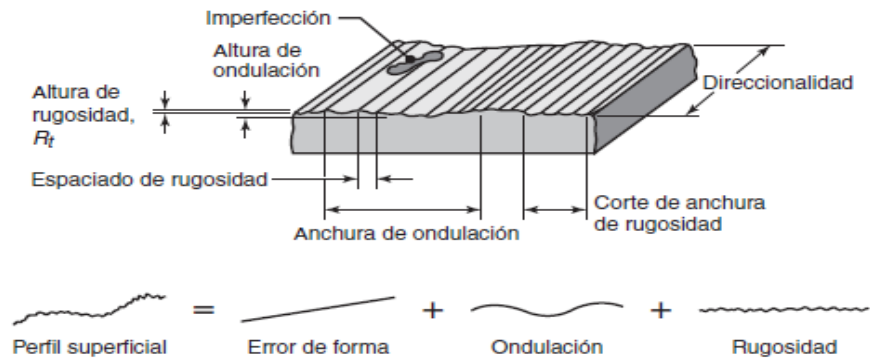


Figura 1.11. Terminología estándar que describe el acabado superficial de un material manufacturado.
Fuente: [17]

1.2.14 Medición de la rugosidad

La medición y recopilación de la rugosidad superficial se lo efectúa con equipos digitales comúnmente conocidos como rugosímetros superficiales. Estos equipos constan de un estilote de diamante de diámetro de 10 μm , que se desplaza en línea recta sobre la superficie del elemento, este desplazamiento puede ser de 0.08 a 25 mm, sin embargo para la mayoría de aplicaciones de ingeniería este recorrido es generalmente de 8 mm, ya que con la misma se obtienen la cantidad de mediciones suficientes de irregularidades de rugosidad (10 a 15) para obtener datos confiables [17].

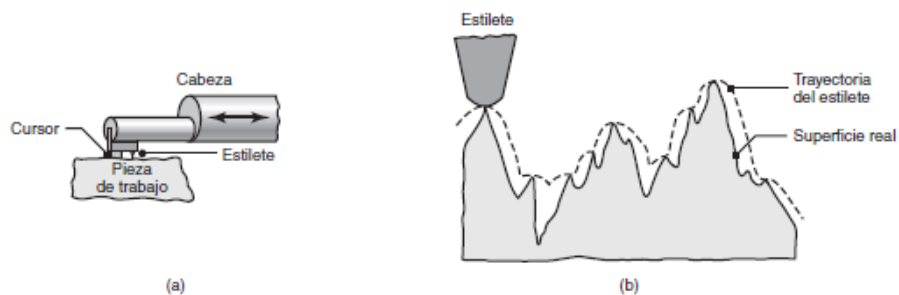


Figura 1.12. a) Elementos que intervienen en la medición de la rugosidad superficial.
 b) Escala macroscópica de la trayectoria que recorre el estilote de diamante para medir la rugosidad.

Fuente: [17]

Por otro lado, para visualizar la topografía de la superficie de un material con mayor certeza se emplean microscopios electrónicos de barrido, mismos que permiten la captura de fotografías estereoscópicas en tres dimensiones de la superficial, con la finalidad de evaluar y mediar la rugosidad [17]. En la siguiente tabla se ilustran los rangos aceptables de rugosidad para aplicaciones más

frecuentes y menos frecuentes que deben cumplir los elementos según el proceso de manufactura.

Tabla 1.5. Valores de rugosidad medias habituales para procesos de manufactura.

Rugosidad promedio en micrómetros – Ra μm													
Proceso	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.012
Arenado	■	■	■										
Aserrado	■	■	■	■	■	■	■						
Brochada				■	■	■	■	■	■				
Bruñido							■	■	■	■			
Cepillado		■	■	■	■	■	■	■					
Cizallado	■	■	■	■									
Corte con soplete	■												
Corte electroquímico		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Corte láser		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Electroerosión			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Estampado		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Esmerilado						■	■	■	■	■	■	■	■
Superacabado							■	■	■	■	■	■	■
Taladrado			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Torneado		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Trefilado													
		Aplicación frecuente						Aplicación menos frecuente					

Fuente: [24]

1.2.15 Zona afectada térmicamente

Al efectuar el corte de materiales de cualquier naturaleza sean estos metálicos y no metálicos por medio de rayos láser, es inevitable que se produzca un leve daño en los bordes del material denominado HAZ, lo que conlleva a cambios en su estructura metalúrgica, esto se debe al calor térmico que el láser emite al contacto con la superficie del material, ya que en la misma implica el calentamiento de una determinada unidad de superficie hasta alcanzar el punto de evaporarlo. Este factor está directamente afectado por la potencia y velocidad de corte [12] [25].

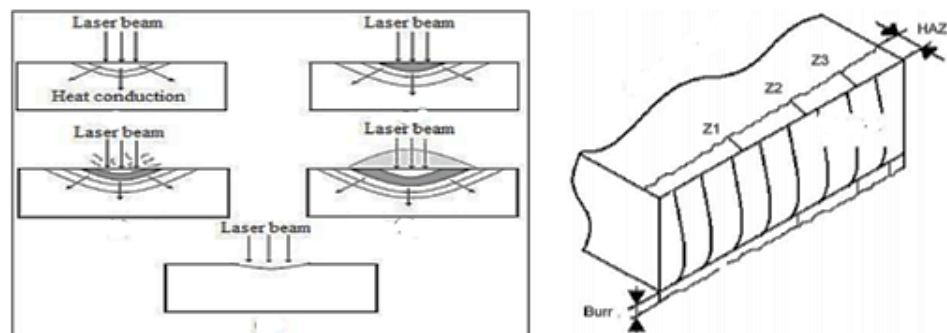


Figura 1.13. Etapas en la que el láser genera el HAZ y va aumentando en un tiempo determinado.

Fuente: [13] [26]

1.2.16 Diseño de experimentos (DOE)

La forma más efectiva de ejecutar pruebas o experimentos dentro del campo industrial es mediante la aplicación del diseño estadístico de experimentos, con el cual es posible conseguir la mayor cantidad de información con el mínimo de costos y con la mejor eficiencia, permitiendo solucionar problemas y comprobar hipótesis (idea). El diseño de experimentos es el conjunto de técnicas estadísticas que permiten otorgar tratamientos a las muestras experimentales, buscando la forma de descartar sesgos y cuantificar el error experimental, con el cual se tiene una mejor idea de las situaciones complejas de relación causa-efecto. Cuando se estudia el comportamiento de un proceso o un fenómeno, a través de una variable aleatoria continua, suele interesar su media y varianza (o desviación estándar). La técnica estadística central en el análisis de los experimentos es el llamado análisis de varianza ANOVA [27] [28].

1.2.16.1 Verificación de los supuestos del modelo

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditado a que los supuestos del modelo se cumplan. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igualdad de varianza de los tratamientos) e independencia de residuos, este último por lo general se cumple al momento en que las corridas experimentales se ejecutan en orden aleatorio (al azar) [28].

1.2.16.2 Diseño factorial

Se emplea para el desarrollo de los tratamientos de estudio factores independientes que a su vez cuentan con varios niveles [29]. El objetivo principal del diseño factorial es examinar simultáneamente el impacto del efecto que puede generar los diversos factores sobre la variable respuesta en el mismo tipo de unidad experimental, y esto se logra mediante todas las posibles mezclas o combinaciones de los niveles de diversos factores; estos pueden ser cuantitativos (velocidad de corte, presión de gas de asistencia, porcentaje de materiales, temperatura, etc.) o cualitativos (tipo de material, tipo de máquina, etc.) [28] [30].

El diseño factorial se adopta de manera eficiente al estudiar dos o más variables independientes (factores) de un proceso, este método divide los grupos de

experimentos en múltiples subconjuntos en función de las variables, convirtiéndolo en un estudio más minucioso [31].

$$\text{niveles} \rightarrow n^k \rightarrow \text{factores}$$

1.2.16.3 Metodología de superficie de respuesta

Esta metodología de modelación y experimentación permite encontrar los valores óptimos de operación de un proceso que influyen de manera directa en una o en varias características de la calidad del producto final (variable respuesta) [28]. Por ejemplo, un ingeniero mecánico desea encontrar los niveles adecuados de potencia (x_1) y velocidad (x_2) que permita incrementar el rendimiento (y) de un proceso, este rendimiento es una función de los niveles de las variables independientes x_1 y x_2 [32].

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

Donde ε es el error experimental u observado de y . Si la variable respuesta deseada se denota mediante $E(y) = f(x_1, x_2) = n$, se puede decir que la superficie descrita por $n = f(x_1, x_2)$ es la superficie de respuesta del proceso. Generalmente, la gráfica de superficie de respuesta puede parecerse a una cresta, una colina, un valle o alguna otra figura, tal como se ilustra en la siguiente ilustración [32]:

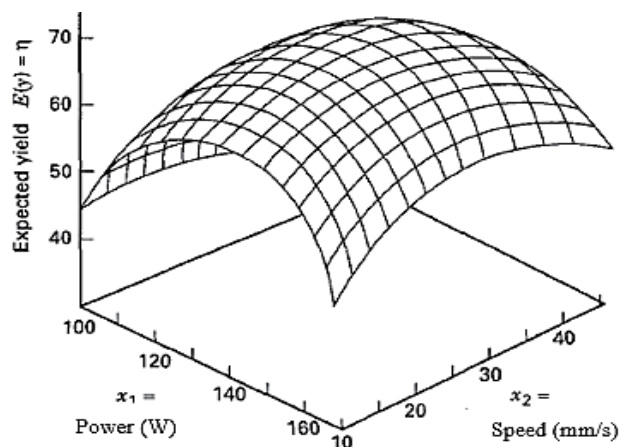


Figura 1.14. Superficie de respuesta: Rendimiento esperado en función de la potencia y velocidad.

Fuente: [32]

Por lo general el MSR se forma de la *región experimental*, que se encuentra delimitada por los niveles de cada factor y de la *región de operabilidad* que está formada por todas las posibles combinaciones de las condiciones (tratamientos) del proceso [28].

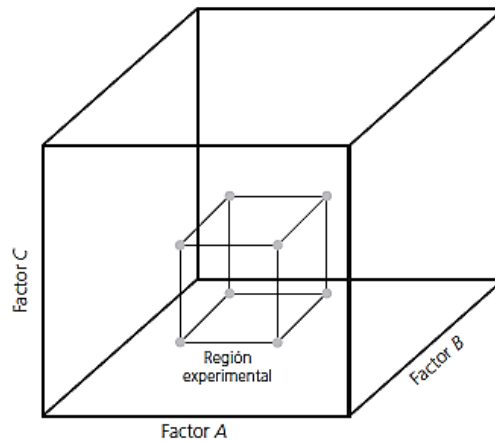


Figura 1.15. Esquemización de la región de operabilidad que contiene a la región experimental.

Fuente: [28]

1.2.16.4 Diseño de superficie de respuesta

Es el conjunto de técnicas avanzadas de diseño de experimentos (DOE) que proporcionan los tratamientos (combinaciones) a ejecutarse en la experimentación, los cuales tienen la función de generar datos cuantificables que permitan ajustar y refinar un modelo, mediante el cual sea posible describir la variable respuesta en la zona experimental [28].

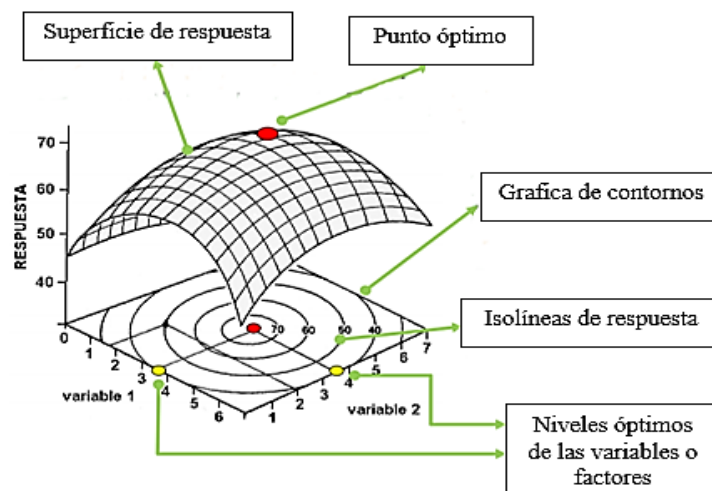


Figura 1.16. Superficie de respuesta tridimensional.

Fuente: [33]

Existen varios tipos de diseño de superficie de respuesta, pero los que más se utilizan son: el diseño central compuesto y el diseño de Box-Behnenken.

1.2.16.5 Diseño central compuesto

El DCC se forma de un diseño factorial (2^k) de dos niveles o de un diseño fraccionado 2^{k-p} , a la cual se le agrega por defecto dos corridas adicionales por cada factor ($2k$) que comúnmente se los denomina puntos estrella, mismas que son localizadas a una cierta distancia axial ($\alpha \geq 1$) por debajo del nivel bajo (-1) del factor y por arriba del nivel alto (+1) del factor, medido desde el punto central del diseño, esto permite la estimación de la curvatura con respecto a ese factor [28]. En cuanto a la cantidad de puntos centrales añadidos al diseño base pueden ser de 3 a 5, que usualmente son deseables, estos puntos son tratamientos adicionales localizados en un punto medio (0) entre el nivel bajo (-1) y alto (+1) de los niveles de los factores, cada uno de estos punto centrales adicionales agregan un grado de libertad al diseño con el objetivo de estimar el error experimental [32].

La siguiente expresión permite determinar el número mínimo de corridas o tratamientos que se pueden realizar mediante la metodología de superficie de respuesta:

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad \text{Ec. 2.6}$$

Dónde:

- **N** : Número total de corridas o tratamientos,
- **k** : Número de factores,
- **n_0** : Puntos o repeticiones al centro del diseño, con $n_0 \geq 1$

El DCC se compone de tres tipos de puntos: puntos de porción factorial, puntos centrales y puntos de porción axial (dos puntos sobre cada eje a una distancia α del origen). La siguiente figura muestra cómo se forma el DCC [28].

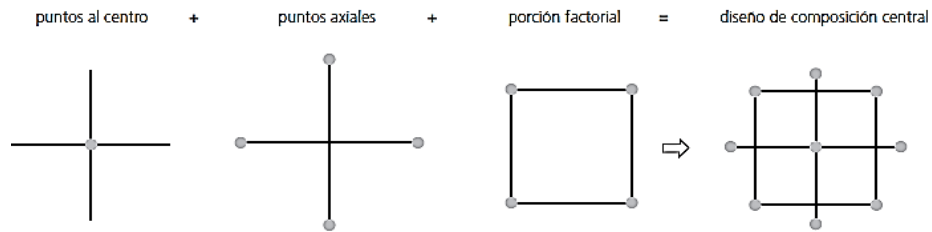


Figura 1.17. Formación del diseño central compuesto para 2 factores.
Fuente: [28]

1.2.16.6 Diseño de Box-Behnken

Este diseño de superficie de respuesta a diferencia del diseño central compuesto no tiene incorporado en su modelo de diseño un diseño fraccionado o un diseño factorial de dos niveles (no tiene experimentos en los vértices de la región experimental), lo que lo convierte en un modelo más económico de emplear, debido a la menor cantidad de puntos que forman el diseño (tratamientos, corridas u combinaciones) con el mismo número de factores (variables independientes continuos) que se utiliza en el diseño central compuesto. Sin embargo, el inconveniente que presenta utilizar este diseño es que no es adecuado para experimentos secuenciales y sin mencionar que se requiere de al menos tres factores continuos (medibles, cuantitativo) para su aplicabilidad. Además, a este diseño también es conveniente agregar de 3 a 5 puntos centrales [28] [32].

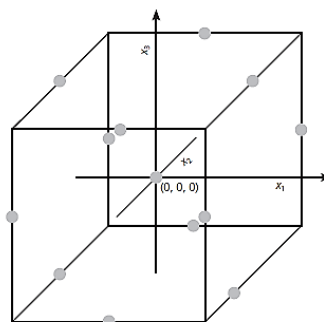


Figura 1.18. Presentación geométrica diseño de Box-Behnken para tres factores base.
Fuente: [28]

1.2.16.7 Verificación de la hipótesis de investigación

Usualmente la hipótesis es generada a partir de ciertos elementos observados y de un proceso de razonamiento inductivo. Es deseable que la hipótesis sea realista y comprobable, para así facilitar el diseño de la investigación [28].

Una hipótesis estadística es una afirmación sobre los valores de los parámetros de una población o proceso, que es susceptible de probarse a partir de la información contenida en una muestra representativa que es obtenida de la población. Y generalmente viene expresada de la siguiente manera:

- **H₀**: Hipótesis nula (Comúnmente se plantea como una igualdad, lo cual facilita el tener una distribución de probabilidad de referencia específica).
- **H₁**: Hipótesis alternativa (bilateral “no es igual” y unilateral “mayor que” o “menor que”) [28].

1.2.16.7.1 Significancia observada frente a significancia predefinida

La significancia predefinida, que se denota con α , es el riesgo máximo que el experimentador está dispuesto a correr por rechazar H_0 indebidamente y por lo general se utilizan los valores $\alpha = 0.05$ o 0.01 . Mientras que la significancia observada o calculada, también conocida como P-value o valor-p, es el área bajo la distribución de referencia más allá del valor del estadístico de prueba (fuera del intervalo $[-t_0, t_0]$), tal como se ilustra en la siguiente figura [28]:

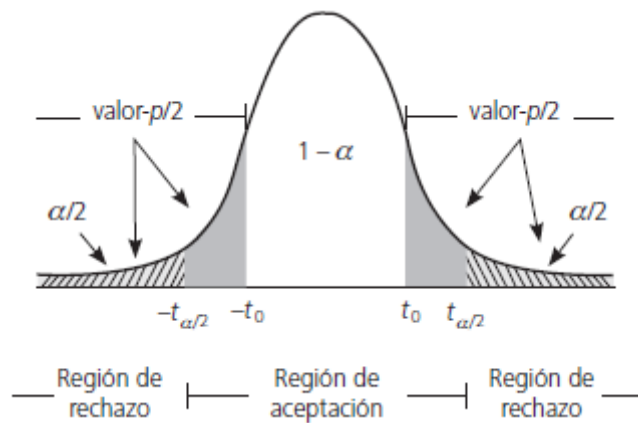


Figura 1.19. Comparación de significancias, valor-p > significancia predefinida.
Fuente: [28]

1.2.16.7.2 Criterio de aceptación y rechazo

Teniendo en cuenta que para aceptar o rechazar la hipótesis nula, el P-valor deber cumplir los siguientes criterios de relación, estableciendo que el nivel de significancia (α) es del 5% [28].

P-valor $\geq \alpha$ Aceptar H_0

P-valor $< \alpha$ Aceptar H_1

Si se trabaja con un software estadístico es más directo y conveniente basarse en el criterio del P-valor, el cual, para cualquier hipótesis, debe ser menor que α para que sea posible rechazar H_0 [28].

1.2.17 Ensayo de inflamabilidad

Este ensayo da a conocer la reacción que presenta un material a la acción de una pequeña llama (fuego), mismo que ayuda a prevenir el comportamiento ante la ignición de un incendio de un material determinado de cierta aplicación específica [34].

1.2.18 Norma ISO 3795

La Norma Internacional ISO 3795 “Road vehicles, and tractors and machinery for agricultura and forestry - Determination of burning behaviour of interior materials” proporciona una metodología practica para determinar la velocidad de combustión horizontal de los materiales compuestos expuestos al fuego [35] [36].

El principio que emplea la norma es que la muestra del material a ensayar se lo posiciona de manera horizontal dentro de la cámara de combustión y uno de sus extremos libres es expuesto a la acción de una llama o fuego de baja energía durante un tiempo determinado [35].

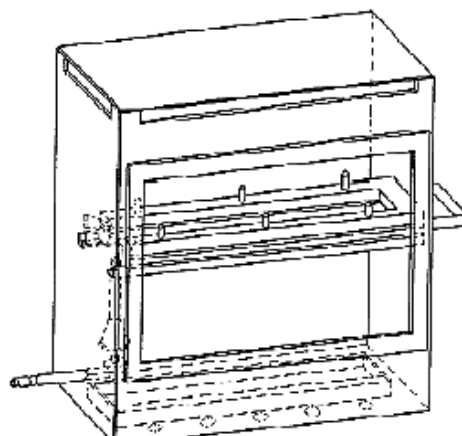


Figura 1.20. Cámara de combustión con soporte de muestra para ensayo de inflamabilidad.

Fuente: [35]

1.2.18.1 Equipos

- **Quemador de gas**

Este equipo está estrictamente posicionado a 19 mm por debajo del centro del borde libre de la probeta a ensayar al centro de la boquilla del mechero Bunsen, que posee un diámetro interior de 9.5 mm [35].

- **Combustible**

El poder calorífico del gas que se proporcione al quemador debe ser de 38 MJ/m^3 aproximadamente. El gas natural es uno de los combustibles que proporcionan dicho poder calorífico [35].

1.2.18.2 Muestras de materiales

Las muestras a ensayar deben poseer una sección constante en toda su longitud y no debe exceder de un espesor de 13 mm. Las dimensiones generales que debe tener las muestras a ensayar se presentan en la siguiente figura [35].

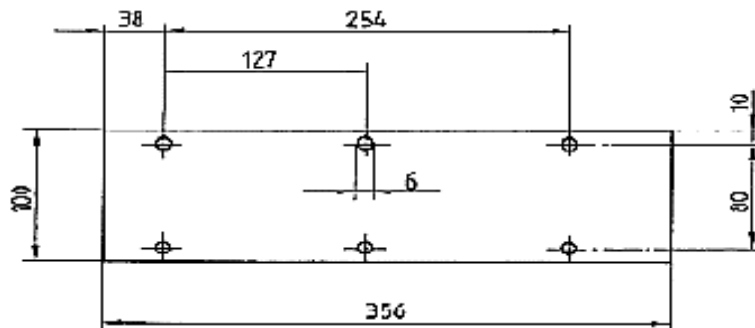


Figura 1.21. Forma y dimensiones de la muestra a ensayar.

Fuente: [35]

Cuando no sea posible disponer de las dimensiones presentadas anteriormente, ya sea esto por los costos de manufactura o por la complejidad de la geometría del producto, es fundamental que por lo menos se mantengan las siguientes dimensiones mínimas:

- Muestras de 3 a 60 mm de ancho, la longitud mínima debe ser de 356 mm. Mientras que las muestras < 3 mm de ancho y < 356 mm de longitud, no pueden ensayarse mediante este método.

- b) Muestras de 60 a 100 mm de ancho, la longitud mínima debe ser de 138 mm. Mientras que las muestras < 3 mm de ancho y < 138 mm de longitud, no pueden ensayarse mediante este método [35].

1.2.18.3 Muestreo

Con la finalidad de que se mida la tasa de combustión más relevante (la más alta) es fundamental que se ensaye 5 muestras del material puesto en estudio [35].

1.2.18.4 Acondicionamiento

La temperatura adecuada para el respectivo acondicionamiento de las muestras es de $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, durante 7 días como máximo y durante al menos 24 horas al día, esto con la finalidad de obtener mejores resultados [35].

1.2.18.5 Procedimiento

- i) Ubicar en la porta probetas las muestras.
- ii) Regular la altura de la llama (fuego) a 38 mm y antes de iniciar con el primer ensayo dejar que la llama se estabilice durante 1 min.
- iii) Ubicar la porta probetas en su respectivo lugar en la cámara de combustión y cerciorarse que el extremo libre de la muestra quede expuesto a la acción del fuego durante 15 segundos, después de este periodo de tiempo, corte el flujo de gas.
- iv) Empezar a medir el tiempo de combustión cuando el fuego atraviesa el primer punto de medición.
- v) Dejar de medir el tiempo de combustión cuando el fuego alcance el último punto de medición o cuando el fuego se apague en el trayecto de la combustión.
- vi) Si se diera el caso en que la muestra no se encienda o no continúe quemándose después del corte del flujo de combustible o se apague antes de llegar al primer punto de medición, la velocidad de combustión debe considerarse de 0 mm/min.
- vii) Antes de comenzar a ensayar la siguiente muestra, tener en cuenta que el porta probetas y la cámara de combustión se encuentren a una temperatura de 30 °C aproximadamente [35].

1.2.18.6 Cálculo de la velocidad de combustión

Para la respectiva determinación de la tasa de combustión de los materiales a ensayar se emplea la siguiente ecuación [35]:

$$B = \frac{s}{t} * 60 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Dónde:

- **B:** Tasa o velocidad de combustión (mm/min),
- **s:** Distancia quemada (mm),
- **t:** Tiempo (s).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Estudiar los parámetros de corte láser de CO₂ del material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el modelo experimental de investigación del corte láser de CO₂ del material compuesto.
- Elaborar la probeta del material compuesto con una composición fraccionada del 83% de matriz poliéster y del 17% de material de refuerzo (cascarilla de arroz).
- Realizar los respectivos cortes geométricos en el material compuesto, alternando los parámetros de corte hasta encontrar las condiciones óptimas de operación del proceso.
- Evaluar la calidad de la superficie de corte en base a la rugosidad y al efecto térmico láser generado en el proceso.
- Efectuar la prueba de inflamabilidad en el material compuesto bajo la norma ISO 3795.

CAPÍTULO II.

METODOLOGÍA

2.1 Materiales

- **Máquina:** Cortadora láser de CO₂ modelo RICOMA
- **Proceso:** Corte láser de CO₂.



Figura 2.1. Máquina cortadora láser de CO₂.

Fuente: Autor

Tabla 2.1. Especificaciones y características técnicas de la máquina cortadora láser de CO₂ empleada en la investigación.

Parámetro	Índice
Tubo láser	CO ₂
Longitud de onda	10,64 μm
Poder del láser (ajustable)	0-100%
Potencia máxima	100 W
Velocidad de corte	6000 mm/min
Velocidad de grabado	72000 mm/min
Precisión de localización	$\leq 0,01$ mm
Modo de enfriamiento	Chiller láser especializado
Temperatura del agua de enfriamiento	10 °C – 30 °C
Área de trabajo	1020*1800 mm
Energía	220V, 50HZ / 60HZ

Fuente: Autor

La máquina cortadora láser de la figura 2.1 se encuentra a disposición en la fábrica Ixor Jeans en la Av. Manuela Saenz y Hermenegildo Noboa en la ciudad de Ambato.

2.2 Métodos

2.2.1 Nivel o tipo de investigación

- **Bibliográfica**

Este método es muy importante para el desarrollo de la investigación ya que en base a estudios previos y artículos técnicos enfocados al proceso de corte láser de CO₂ aplicados a materiales compuestos se determinan ecuaciones, fundamentos y parámetros que mayor influencia tienen en la calidad de la rugosidad de la cara cortada del material después del proceso.

- **Descriptiva**

La descripción correspondiente del principio de funcionamiento del sistema de corte por láser de CO₂ es fundamental para la comprensión de los parámetros que son variables y que permanecen constantes en el proceso de corte.

- **Exploratoria**

Se analiza el problema con el propósito de encontrar las condiciones de operación óptimas del proceso de corte por láser de CO₂, en base a los parámetros que permiten manipular las máquinas cortadoras, para obtener la mínima rugosidad del material manufacturado.

- **Cuantitativa**

Los respectivos datos recopilados se analizan y examinan de forma numérica, mediante principios y fundamentos estadísticos, con la finalidad de encontrar una relación directa entre la calidad de corte del material y los parámetros de la máquina cortadora láser de CO₂.

2.3 Diseño experimental

En todo proceso de manufactura de materiales metálicos y no metálicos se presentan varios parámetros de manufactura (variables de entrada) que afectan de

manera positiva o negativa a las variables de salida. La siguiente figura ilustra de manera general las variables de entrada y salida en el proceso de corte por láser.

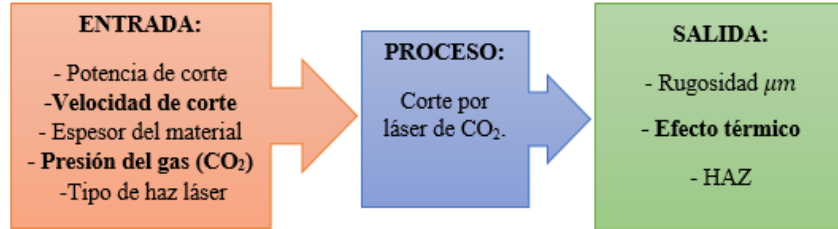


Figura 2.2. Variables del proceso de corte por láser.
Fuente: Autor

- **Variables controlables**

Tabla 2.2. Variables que se pueden controlar.

Factores	Variable
Potencia de corte	X_1
Velocidad de corte	X_2
Espesor del material	X_3
Geometría de corte	X_4

Fuente: Autor

- **Variables no controlables**

Tabla 2.3. Variables que se no pueden controlar.

Factores	No controlable
Haz láser	Y_1
Presión del gas CO_2	Y_2
Forma de la boquilla	Y_3

Fuente: Autor

- **Variable respuesta**

Tabla 2.4. Variable respuesta.

Factores	Respuesta
Rugosidad de acabado	Z
Efecto térmico en el material	Z'

Fuente: Autor

- Diagrama de variables

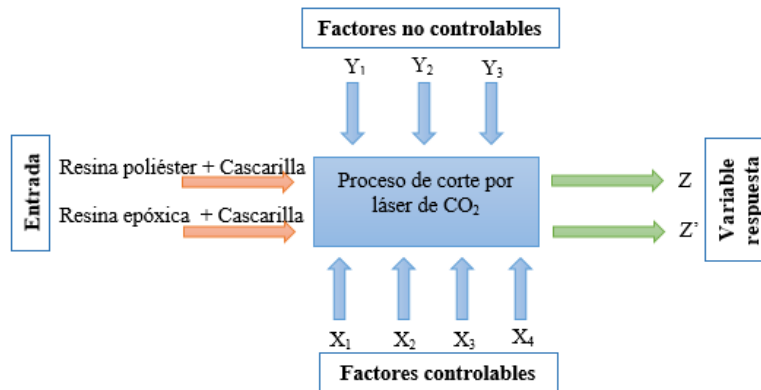


Figura 2.3. Esquematización general del modelo experimental.
Fuente: Autor

2.3.1 Formas geométricas de corte

Todas las formas geométricas de corte tienen la misma finalidad que es determinar el acabado de la superficie (rugosidad de la cara cortada) y el efecto térmico del material, en cuanto a trayectorias lineales se refiere, mientras que las trayectorias circulares y curvas permite evaluar la precisión dimensional [26]. Las formas geométricas utilizadas en el corte por láser de materiales poliméricos y materiales compuestos pueden ser de diferente forma y dimensión, tal como se indica en la siguiente figura.

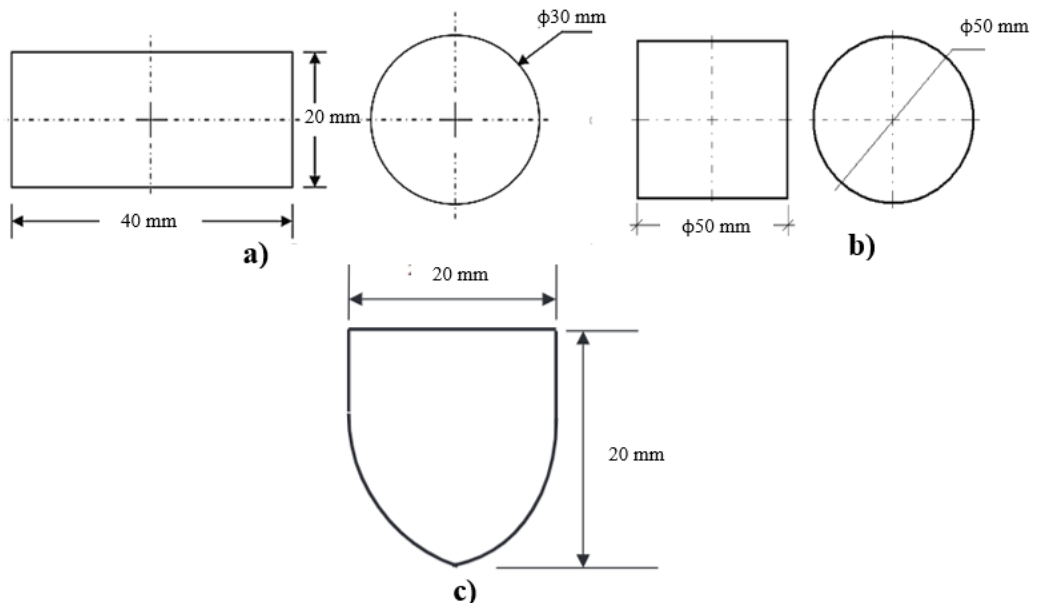


Figura 2.4. Formas geométricas empleadas en el corte por láser de poliméricos y compuestos.

Fuente: [23] [26] [37]

Como el presente trabajo experimental se basa en el análisis de los parámetros de corte láser de CO₂ y su influencia sobre la calidad de corte (rugosidad) del material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz, se selecciona las trayectorias lineales (forma rectangular 40x20 mm de la figura 2.4. **a**)) para este fin.

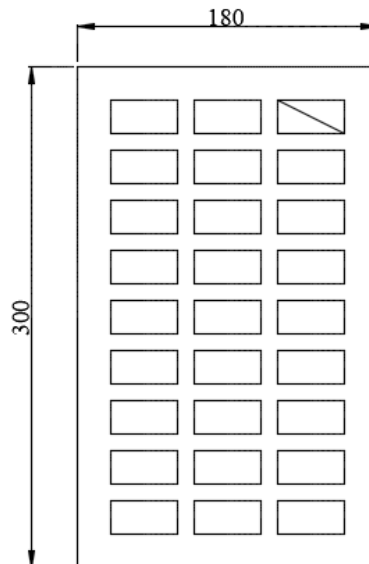


Figura 2.5. Distribución de los rectángulos y dimensionamiento de la lámina del compuesto.

Fuente: Autor

2.3.2 Espesor del material compuesto

El espesor a cortar se toma como referencia de la investigación realizada por [16] en donde efectúa cortes por rayo láser de CO₂ en dos materiales compuestos con un espesor de 3,2 mm; el primero es el material tradicional de matriz poliéster con fibra de vidrio, que se emplea comúnmente en la industria carrocería para la elaboración de los guardachoques de los buses y mientras que el segundo es un material híbrido de matriz poliéster con fibra de vidrio y fibra de cabuya, en el cual efectúa las mediciones de la rugosidad.

Otra de las razones que también se pone en consideración el espesor de 3,2 mm es por la disposición y el alcance de la máquina cortadora láser para efectuar el corte en el material compuesto reforzado con cascarilla de arroz y el área de superficie que requiere el palpador del Rugosímetro para realizar la medición.

Se efectuaron cortes preliminares a diferentes potencias y velocidades, con incrementos de 10 vatios y 2 mm/s, en el material compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz, esto con la finalidad de obtener datos aproximados de profundidades de corte. (Anexo A)

Tabla 2.5. Medición N° 1 de profundidades de corte por láser de CO₂ del MC de matriz poliéster.

Profundidad de Corte por Láser de CO₂, matriz poliéster (mm)										
Replica N° 1										
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4	2,2	2,6	3,1	3,5	3,65	3,9	4,2	4,24	4,56	4,05
6	2,94	5,25	3,03	4,02	4,43	5,02	4,14	4,36	4,65	4,3
8	2,27	2,6	3,05	4,05	3,89	4,41	4,41	4,61	4,6	4,41
10	1,93	2,54	3,25	3,5	4,07	4,38	4,1	4,39	4,15	4,39
12	1,79	3,64	3,26	3,16	4,55	5,21	4,16	4,48	4,72	3,93
14	1,77	2,89	2,45	3,33	3,19	4,13	4,04	3,63	4,18	4,4
16	1,43	2,83	2,75	3,6	4,1	3,43	4,53	3,84	4,09	4,55
20	1,6	1,96	2,04	2,36	2,94	2,61	2,89	2,77	2,95	3,5
30	1,03	1,28	1,78	1,7	2,61	2,29	2,1	2,54	2,67	3,34

Fuente: Autor

Tabla 2.6. Medición N° 2 de profundidades de corte por láser de CO₂ del MC de matriz poliéster.

Profundidad de Corte por Láser de CO₂, matriz poliéster (mm)										
Replica N° 2										
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4	2,36	2,6	3,13	3,42	3,91	4,64	4,48	4,23	4,58	3,96
6	2,92	5,45	3,19	4,1	4,88	5,14	4,06	4,22	4,73	4,25
8	2,3	2,9	3,18	4,12	3,79	4,66	4,64	4,56	4,78	4,5
10	2,22	2,56	3,24	3,75	4,16	4,32	4,24	4,42	4,29	4,48
12	2,08	3,48	3,48	3,33	4,57	5,12	4,35	4,38	4,83	3,94
14	1,8	2,72	2,63	3,93	3,7	4,24	4,14	3,78	4,02	4,37
16	1,59	2,85	2,78	3,44	4,19	3,69	4,27	4,36	4,09	4,36
20	1,51	1,75	1,92	2,39	2,97	2,57	2,91	2,4	3,05	3,38
30	1,05	1,48	1,81	1,86	2,69	2,57	2,27	2,6	2,58	3,2

Fuente: Autor

Tabla 2.7. Promedio de profundidades de corte por láser del MC de matriz poliéster.

Profundidad de Corte por Láser de CO ₂ , matriz poliéster (mm)										
Promedio										
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4	2,28	2,6	3,12	3,46	3,78	4,27	4,34	4,24	4,57	4,01
6	2,93	5,35	3,11	4,06	4,66	5,08	4,1	4,29	4,69	4,28
8	2,29	2,75	3,12	4,09	3,84	4,54	4,53	4,59	4,69	4,46
10	2,08	2,55	3,25	3,63	4,12	4,35	4,17	4,41	4,22	4,44
12	1,94	3,56	3,37	3,25	4,56	5,17	4,26	4,43	4,78	3,94
14	1,79	2,81	2,54	3,63	3,45	4,19	4,09	3,71	4,1	4,39
16	1,51	2,84	2,77	3,52	4,15	3,56	4,4	4,1	4,09	4,46
20	1,56	1,86	1,98	2,38	2,96	2,59	2,9	2,59	3	3,44
30	1,04	1,38	1,8	1,78	2,65	2,43	2,19	2,57	2,63	3,27

Fuente: Autor

Tabla 2.8. Medición N°1 de profundidades de corte por láser de CO₂ del MC de matriz epoxi.

Profundidad de Corte por Láser de CO ₂ , matriz epóxica (mm)										
Réplica N° 1										
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4	3,58	4,39	4,99	6,15	6,1	6,51	6,19	6,66	6,36	6,4
6	2,74	4,77	3,92	4,62	5,45	6,09	5,76	6,39	6,19	6,02
8	2,84	3,87	4,66	4,91	5,72	5,87	5,34	6,12	6,09	4,63
10	2,65	3,73	4,53	4,17	4,83	4,61	5,51	4,95	6,15	4,02
12	2,34	3,29	4,29	3,77	3,86	4,91	4,87	4,84	4,47	4,81
14	2,21	2,64	3,56	3,63	3,54	3,89	3,78	4,38	4,23	4,6
16	1,76	2,58	2,9	3,8	3,5	3,31	3,65	4,17	3,73	3,53
20	1,18	2,47	2,55	2,7	2,5	3,17	3,44	3,48	2,43	3,55
30	1,06	1,67	2,11	1,95	2,66	2,15	2,18	2,03	2,9	3,2

Fuente: Autor

Tabla 2.9. Medición N°2 de profundidades de corte por láser de CO₂ del MC de matriz epoxi.

Profundidad de Corte por Láser de CO ₂ , matriz epóxica (mm)										
Réplica N° 2										
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4	3,54	4,31	4,98	6,08	6,14	6,56	6,13	6,8	6,47	6,38
6	2,73	4,73	3,94	4,69	5,44	6,16	5,7	6,34	5,17	5,92
8	2,79	3,84	4,51	4,84	5,71	5,89	5,45	6,03	5,99	4,9
10	2,5	3,68	4,58	4,1	4,55	4,63	5,67	5,11	6,1	4,08
12	2,26	3,28	4,25	3,7	3,89	4,89	4,65	4,8	4,49	4,96
14	2,25	2,71	3,35	3,49	3,62	3,76	3,72	4,31	4,3	4,48
16	1,7	2,57	2,82	3,9	3,43	3,35	3,68	4,1	3,75	3,41
20	1,15	2,38	2,48	2,75	2,34	3,2	3,5	3,4	2,31	3,46
30	1,01	1,62	2,17	1,94	2,57	2,08	2,09	2,1	2,87	3,09

Fuente: Autor

Tabla 2.10. Promedio de profundidades de corte por láser del MC de matriz epoxi.

Profundidad de Corte por Láser de CO ₂ , matriz epóxica (mm)										
Promedio										
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4	3,56	4,35	4,99	6,12	6,12	6,54	6,16	6,73	6,42	6,39
6	2,74	4,75	3,93	4,66	5,45	6,13	5,73	6,37	5,68	5,97
8	2,82	3,86	4,59	4,88	5,72	5,88	5,4	6,08	6,04	4,77
10	2,58	3,71	4,56	4,14	4,69	4,62	5,59	5,03	6,13	4,05
12	2,3	3,29	4,27	3,74	3,88	4,9	4,76	4,82	4,48	4,89
14	2,23	2,68	3,46	3,56	3,58	3,83	3,75	4,35	4,27	4,54
16	1,73	2,58	2,86	3,85	3,47	3,33	3,67	4,14	3,74	3,47
20	1,17	2,43	2,52	2,73	2,42	3,19	3,47	3,44	2,37	3,51
30	1,04	1,65	2,14	1,95	2,62	2,12	2,14	2,07	2,89	3,15

Fuente: Autor

*MC: Material compuesto.

Las mediciones de la réplica N° 1 y réplica N° 2 se efectuaron con un calibrador digital en marca Starrett y con un calibrador Stanley predispuestos en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, esto con el objetivo de reducir en lo más mínimo el error de adquisición de mediciones y obtener datos más precisos y confiables.

2.3.3 Parámetros de entrada para el material compuesto

Para establecer los parámetros de entrada tanto del material compuesto de matriz poliéster y matriz epoxi reforzados con cascarilla de arroz se emplean las tablas 2.7 y 2.10 respectivamente, que son el promedio de profundidades de corte por láser de CO₂. Teniendo en consideración el espesor del material a cortar y la zona térmicamente afectada por el calor (este último se analiza por inspección visual) se busca la zona óptima para el experimento tal como se muestra a continuación:

Tabla 2.7. Promedio de profundidades de corte por láser del MC de matriz poliéster.

Profundidad de Corte por Láser de CO ₂ , matriz poliéster (mm)											
Promedio											
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Zona térmicamente afectada por el calor es ELEVADO	4	2,28	2,6	3,12	3,46	3,78	4,27	4,34	4,24	4,57	4,01
	6	2,93	5,35	3,11	4,06	4,66	5,08	4,1	4,29	4,69	4,28
	8	2,29	2,75	3,12	4,09	3,84	4,54	4,53	4,59	4,69	4,46
	10	2,08	2,55	3,25	3,63	4,12	4,35	4,17	4,41	4,22	4,44
Zona óptima para el experimento	12	1,94	3,56	3,37	3,25	4,56	5,17	4,26	4,43	4,78	3,94
	14	1,79	2,81	2,54	3,63	3,45	4,19	4,09	3,71	4,1	4,39
	16	1,51	2,84	2,77	3,52	4,15	3,56	4,4	4,1	4,09	4,46
	No alcanza la profundidad requerida	20	1,56	1,86	1,98	2,38	2,96	2,59	2,9	2,59	3
30		1,04	1,38	1,8	1,78	2,65	2,43	2,19	2,57	2,63	3,27

Fuente: Autor

Tabla 2.10. Promedio de profundidades de corte por láser del MC de matriz epoxi.

Profundidad de Corte por Láser de CO ₂ , matriz epóxica (mm)											
Promedio											
Velocidad (mm/s)	Potencia (Vatios)										
	10	20	20	40	50	60	70	80	90	100	
Zona térmicamente afectada por el calor es ELEVADO	4	3,56	4,35	4,99	6,12	6,12	6,54	6,16	6,73	6,42	6,39
	6	2,74	4,75	3,93	4,66	5,45	6,13	5,73	6,37	5,68	5,97
	8	2,82	3,86	4,59	4,88	5,72	5,88	5,4	6,08	6,04	4,77
	10	2,58	3,71	4,56	4,14	4,69	4,62	5,59	5,03	6,13	4,05
Zona óptima para el experimento	12	2,3	3,29	4,27	3,74	3,88	4,9	4,76	4,82	4,48	4,89
	14	2,23	2,68	3,46	3,56	3,58	3,83	3,75	4,35	4,27	4,54
	16	1,73	2,58	2,86	3,85	3,47	3,33	3,67	4,14	3,74	3,47
	No alcanza la profundidad requerida	20	1,17	2,43	2,52	2,73	2,42	3,19	3,47	3,44	2,37
30		1,04	1,65	2,14	1,95	2,62	2,12	2,14	2,07	2,89	3,15

Fuente: Autor

Mediante la tabla 2.7 y 2.10 se puede observar que el rango de potencias tanto para el material compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica es de [40 – 100] Vatios, mientras que la velocidad de corte es de [10 – 16] mm/s, con el cual se asegura el corte del material.

Tabla 2.11. Parámetros de entrada con sus respectivos niveles experimentales.

Variables	Símbolo	Unidades	Niveles		
			Bajo	Medio	Alto
			-1	0	1
Potencia láser	Pc	Watt	60	80	100
Velocidad de corte	Vc	mm/s	10	12	14
Material matriz	M	-	Poliéster	-	Epoxi

Fuente: Autor

2.3.4 Modelo del experimento

2.3.4.1 Compuesto de matriz poliéster

El empleo de la ecuación 2.6 permite determinar el número total de corridas que se deben ejecutar. Los siguientes datos se emplean para este caso:

Tabla 2.12. Datos seleccionados para la determinación de corridas.

Datos	Simbología	Valor
Replicas	R	2
Factores continuos	k	2
Puntos centrales, $n_0 \geq 1$	n_0	5

Fuente: Autor

$$N = 2^k + 2k + n_0$$

$$N = 2^2 + 2 * (2) + 5$$

$$N = 2^2 + 2 * (2) + 5$$

$$N = 13 \rightarrow \text{Corridas base}$$

$$N = 13 * R$$

$$N = 13 * (2)$$

$$N = 26 \rightarrow \text{Corridas totales}$$

Mediante el cálculo anterior se determina que se deben efectuar 26 cortes rectangulares en el material compuesto de matriz poliéster.

2.3.4.2 Compuesto de matriz epóxica

Del mismo modo que el caso anterior, se emplea la ecuación 2.6 y los datos de la tabla 2.12, dándonos como resultado las mismas 26 corridas experimentales a efectuar en el material compuesto de matriz epóxica.

Tabla 2.13. Resumen de corridas base y totales del compuesto de matriz poliéster y epoxi.

Material Matriz	Corridas (N)	
	Base	Totales
Matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz	13	26
Matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz	13	26
Total		52

Fuente: Autor

2.3.5 Software Estadístico

El método de superficie de respuesta por ser una metodología de modelación y experimentación que permite encontrar los valores óptimos de operación, es considerado para este análisis.

Se utiliza el software estadístico Minitab 18.1 para generar el modelo de experimentación, teniendo en cuenta que la potencia láser y la velocidad de corte son factores continuos y el tipo de material de la matriz es un factor categórico, lo cual es importante al momento de seleccionar el diseño.

Para este caso se selecciona el diseño central compuesto ya que permite el análisis de 2 factores continuos y un de factor categórico, mientras que el diseño de Box- Behenken no es posible de realizar debido a que este diseño requiere de 3 factores continuos como mínimo para su empleo. Al definir y establecer los factores y los niveles en el software estadístico Minitab 18.1, nos presenta el siguiente modelo experimental:

Tabla 2.14. Resumen de puntos en el cubo y corridas totales.

Diseño central compuesto			
Factores :	3	Replicas:	2
Corridas base:	26	Corridas totales:	52
Bloques base:	1	Bloques totales:	1
Factorial de dos niveles:	Factorial completo		
Puntos del cubo:	16		
Puntos centrales en el cubo:	20		
Puntos axiales:	16		
Puntos centrales en axial:	0		
α:	1		

Fuente: Autor

Tabla 2.15. Modelo experimental de tratamientos.

Orden Estadístico	Nº Corrida	Tipo Punto	Potencia (W)	Velocidad (mm/s)	Material Matriz
17	1	1	100	14	Epóxica
31	2	-1	60	12	Poliéster
16	3	1	60	14	Epóxica
30	4	1	100	14	Poliéster

24	5	0	80	12	Epóxica
11	6	0	80	12	Poliéster
12	7	0	80	12	Poliéster
32	8	-1	100	12	Poliéster
14	9	1	60	10	Epóxica
33	10	-1	80	10	Poliéster
42	11	1	60	14	Epóxica
37	12	0	80	12	Poliéster
1	13	1	60	10	Poliéster
5	14	-1	60	12	Poliéster
2	15	1	100	10	Poliéster
10	16	0	80	12	Poliéster
52	17	0	80	12	Epóxica
7	18	-1	80	10	Poliéster
48	19	0	80	12	Epóxica
4	20	1	100	14	Poliéster
51	21	0	80	12	Epóxica
34	22	-1	80	14	Poliéster
36	23	0	80	12	Poliéster
29	24	1	60	14	Poliéster
15	25	1	100	10	Epóxica
6	26	-1	100	12	Poliéster
9	27	0	80	12	Poliéster
19	28	-1	100	12	Epóxica
21	29	-1	80	14	Epóxica
18	30	-1	60	12	Epóxica
43	31	1	100	14	Epóxica
50	32	0	80	12	Epóxica
22	33	0	80	12	Epóxica
44	34	-1	60	12	Epóxica
46	35	-1	80	10	Epóxica
45	36	-1	100	12	Epóxica
39	37	0	80	12	Poliéster
35	38	0	80	12	Poliéster
8	39	-1	80	14	Poliéster
40	40	1	60	10	Epóxica
23	41	0	80	12	Epóxica
25	42	0	80	12	Epóxica
38	43	0	80	12	Poliéster
41	44	1	100	10	Epóxica
3	45	1	60	14	Poliéster
49	46	0	80	12	Epóxica
28	47	1	100	10	Poliéster
20	48	-1	80	10	Epóxica

13	49	0	80	12	Poliéster
26	50	0	80	12	Epóxica
27	51	1	60	10	Poliéster
47	52	-1	80	14	Epóxica

Fuente: Autor

Mediante la tabla anterior se determina que se debe generar 26 corte rectangulares de 40x20x3,2 mm en el material compuesto de matriz poliéster reforzado de cascarilla de arroz y del mismo modo en el material compuesto de matriz epóxica, lo que nos da un total de 52 cortes geométricos a realizar.

2.4 Hipótesis

¿La variación de los parámetros de corte láser de CO₂ para el material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz influirá en la calidad de corte?

2.4.1 Señalamiento de variables de la hipótesis

2.4.1.1 Variable independiente

La variación de los parámetros de corte láser de CO₂ para el material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz.

2.4.1.2 Variable dependiente

Calidad de corte.

2.4.1.3 Termino de relación

Influirá

2.5 Operalización de variables

2.5.1.1 Variable Independiente

La variación de los parámetros de corte láser de CO₂ para el material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz.

Tabla 2.16. Operacionalización de la variable independiente.

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Herramienta
Son datos imprescindibles y orientativos para evaluar y valorar una serie de combinaciones de ajustes (potencia, velocidad, número de pasadas entre otras) para desarrollar el corte, con la finalidad de obtener el efecto que se desea en el material a trabajar.	Parámetros de corte láser por CO ₂	Potencia de corte (W)	- Bajo (60 W) - Medio (80 W) - Alto (100 W)	-Ensayos de laboratorio -Método DOE -Observación directa y bibliográfica
		Velocidad de corte (mm/s)	- Bajo (10 mm/s) - Medio (12 mm/s) - Alto (14 mm/s)	-Ensayos de laboratorio -Método DOE -Observación directa y bibliográfica.

Fuente: Autor

2.5.2 Variable Dependiente

Calidad del corte

Tabla 2.17. Operacionalización de la variable dependiente.

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítems	Herramientas
Parámetro que detalla la eficacia de un corte, mismo que es evaluado por el acabado superficial (rugosidad).	Valoración de la calidad de corte	Rugosidad superficial media (um)	-Aplicación frecuente: [6,3 – 1,6] um -Aplicación menos frecuente: [1,6 – 0,4] um	-Equipos de medición -Norma ISO 1302: 2002 -Observación directa y bibliográfica
		Efecto térmico en relación a la temperatura crítica de corte (°C)	-Distribución de temperaturas (°C) -Temperatura superficial (°C)	-Equipos de medición -Formulas -Calculadora científica -Observación

Fuente: Autor

2.6 Plan de recolección de información

Mediante libros, artículos técnicos, estudios previos y el uso del internet se efectúa la recopilación de la información en cuanto a fundamentos, teorías y ecuaciones que son esenciales para la comprensión y desarrollo de la investigación, mientras que para la recolección de los datos medidos durante y después de los experimentos, se utilizan equipos digitales de medición de rugosidad y temperatura, así como registros y fichas técnicas establecidas por el laboratorio de la carrera de Ingeniería Mecánica, que son de mucha utilidad para su posterior interpretación, evaluación y análisis de los datos y resultados.

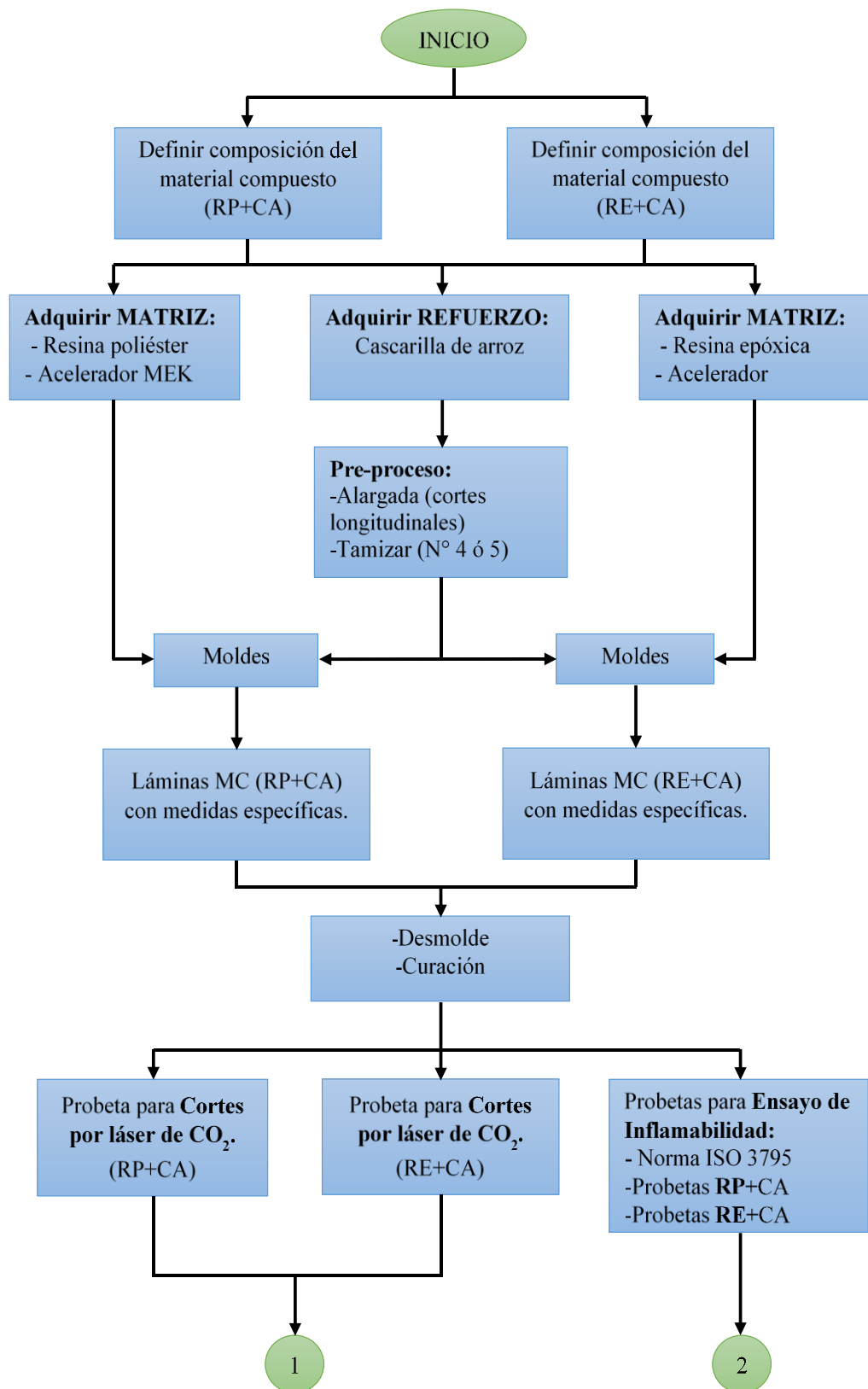
2.7 Plan de procesamiento y análisis

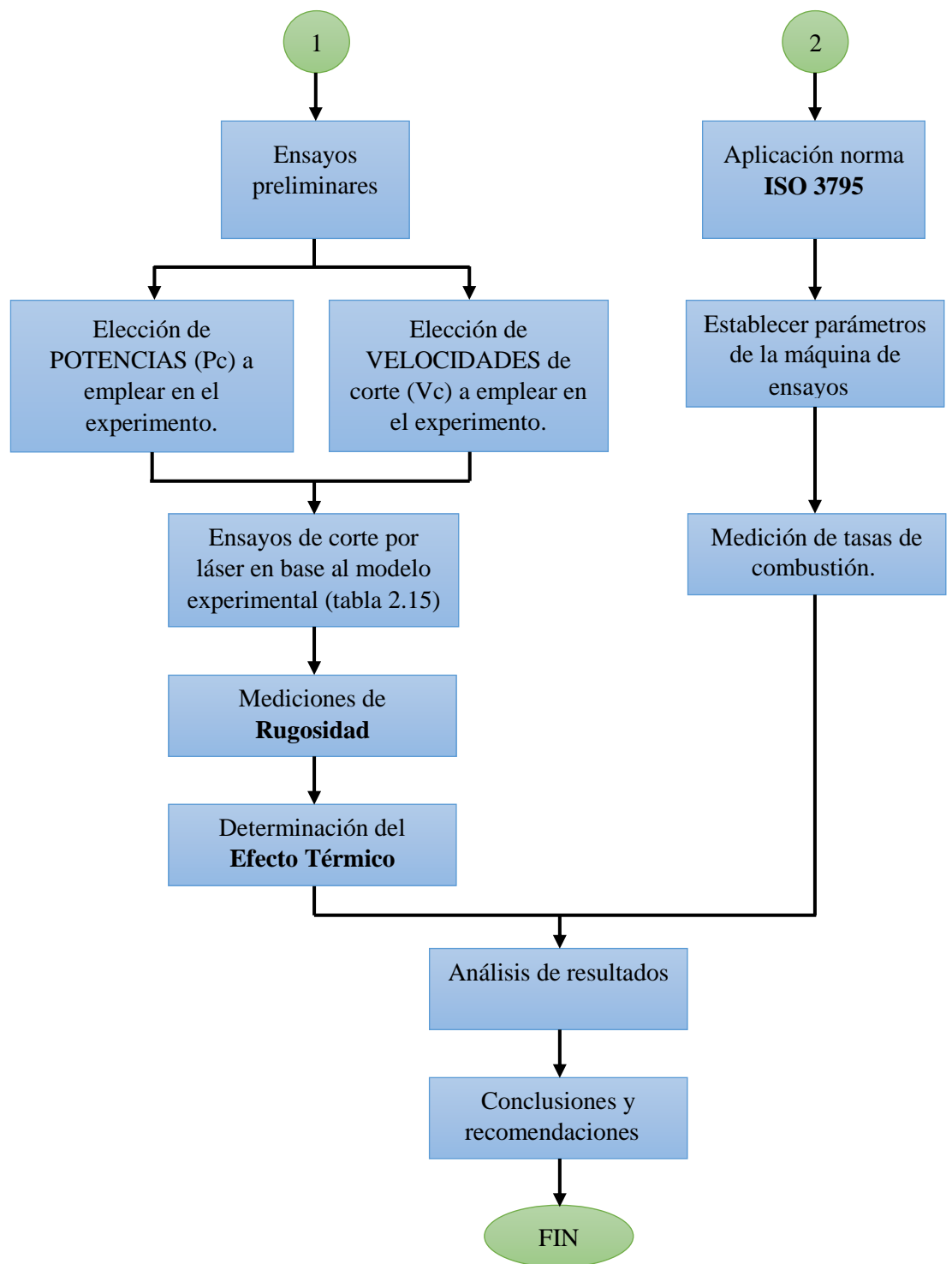
El respectivo procesamiento y análisis de los datos adquiridos de esta investigación se efectuarán de la siguiente manera:

- Toda la información pertinente de los ensayos realizados se evalúan de manera crítica.
- La recopilación, registro y tabulación de datos se realizan por medio de fichas técnicas, fotografías, cuadros, tablas, entre otras.
- Se analizan los resultados que se obtuvieron de la investigación en relación a las hipótesis establecidas, y en base a esto se acepta o se rechaza la hipótesis.
- Se representa la información de manera gráfica, con la finalidad de identificar los valores óptimos de procesamiento del material compuesto y tener mayor entendimiento del proceso.

2.8 Diagrama de proceso

El siguiente diagrama describe todo el proceso que se llevó a cabo para ejecutar el trabajo experimental de manera adecuada.





**MC: Material compuesto; RP: Resina poliéster; RE: Resina epoxi; CA: Cascarilla de arroz.*

2.8.1 Procesamiento

Para una mejor comprensión del proceso que se realizó durante la investigación, es fundamental su descripción, la cual se detalla a continuación:

2.8.1.1 Composición de los materiales

2.8.1.1.1 Material compuesto de matriz polimérica

El material compuesto de *matriz polimérica* reforzada con cascarilla de arroz fue elaborado con una fracción volumétrica del 83% de matriz poliéster y un 17% de material de refuerzo (cascarilla de arroz) tal como recomienda [38], ya que mediante ensayos de tracción (ASTM D3039/D3039M-08), flexión (ASTM D7264/D7264M-07.13) e impacto (ASTM D 5628) se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas en comparación con otras composiciones volumétricas, con un porcentaje de aceptación del 90,91%. Para la respectiva ejecución de la investigación se fabricó el material compuesto en forma de láminas con dimensiones específicas.

Probeta para pruebas de corte por láser

- **Masa resina poliéster**

El espesor a emplear para esta lámina es de 3,2 mm tal como se estableció en el apartado 2.3.2. Como se requiere efectuar 26 cortes rectangulares de 40x20 mm se distribuye en una área superficial de 54 000 mm² (ver figura 2.5).

$$\mathbf{Volumen = Área * espesor}$$

$$Volumen = (54\ 000\ mm^2) * (3,2\ mm)$$

$$Volumen = 172\ 800\ mm^3$$

$$Volumen\ total\ de\ la\ lamina\ base = 172,8\ cm^3$$

Resina poliéster al 83%

$$V_{R.\ Poliéster} = 172,8\ cm^3 * 83\%$$

$$V_{R.\ Poliéster} = 143,42\ cm^3$$

$$m_{R. \text{ Poliéster}} = \rho_{R. \text{ Poliéster}} * V_{R. \text{ Poliéster}}$$

$$m_{R. \text{ Poliéster}} = \left(1,2 \frac{g}{cm^3}\right) * 143,42 \text{ cm}^3$$

$$m_{R. \text{ Poliéster}} = 172,11 \text{ g}$$

- **Masa de la cascarilla**

Cascarilla de arroz al 17%

$$V_{F. \text{ Cascarilla}} = 172,8 \text{ cm}^3 * 17\%$$

$$V_{F. \text{ Cascarilla}} = 29,38 \text{ cm}^3$$

$$m_{F. \text{ Cascarilla}} = \rho_{F. \text{ Cascarilla}} * V_{F. \text{ Cascarilla}}$$

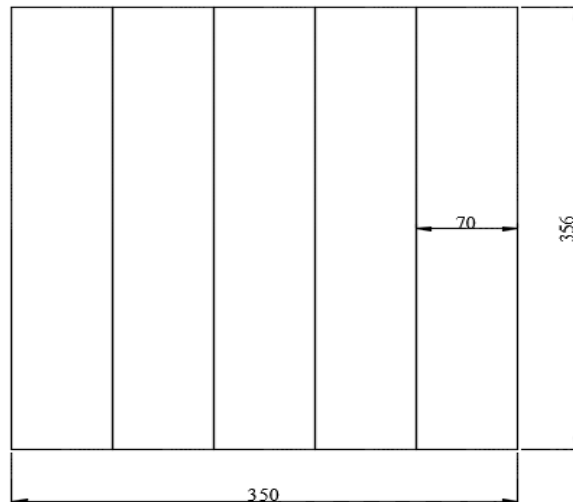
$$m_{F. \text{ Cascarilla}} = \left(0,75 \frac{g}{cm^3}\right) * 29,38 \text{ cm}^3$$

$$m_{F. \text{ Cascarilla}} = 22,03 \text{ g}$$

Probeta para ensayos de inflamabilidad

- **Masa resina poliéster**

Mediante la norma ISO 3795 se establece que se emplearán 5 probetas del material compuesto a ensayar. Las dimensiones de las probetas se indican en la figura 1.21, a esta probeta se realiza una pequeña modificación en cuanto al ancho se refiere. Esto es debido a que mediante estudios previos efectuados en la máquina horizontal de inflamabilidad predispuesta en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Mecánica es posible ubicar una probeta de 70 mm de ancho perfectamente en la porta probetas, sin que afecte de alguna manera a los resultados finales de los ensayos. En cuanto al espesor de la probeta se selecciona de 4.5 mm, esto es debido a que la norma ISO 3795 únicamente especifica que la muestra a ensayar no debe exceder de los 13 mm de espesor.



Nota: Medidas en milímetros

Figura 2.6. Probetas de inflamabilidad y dimensionamiento de la lámina del compuesto.

Fuente: Autor

$$\mathbf{Volumen = \acute{A}rea * espesor}$$

$$Volumen = (124\,600\,mm^2) * (4,5\,mm)$$

$$Volumen = 560\,700\,mm^3$$

$$Volumen\ total\ de\ la\ lamina\ base = 560,70\,cm^3$$

Resina poliéster al 83%

$$V_{R.\,Poliéster} = 560,70\,cm^3 * 83\%$$

$$V_{R.\,Poliéster} = 465,38\,cm^3$$

$$m_{R.\,Poliéster} = \rho_{R.\,Poliéster} * V_{R.\,Poliéster}$$

$$m_{R.\,Poliéster} = \left(1,2\,\frac{g}{cm^3}\right) * 465,38\,cm^3$$

$$m_{R.\,Poliéster} = 558,46\,g$$

- **Masas de la cascarilla**

Cascarilla de arroz al 17%

$$V_{F.\,Cascarilla} = 560,70\,cm^3 * 17\%$$

$$V_{F.\,Cascarilla} = 95,32\,cm^3$$

$$m_{F. Cascarilla} = \rho_{F. Cascarilla} * V_{F. Cascarilla}$$

$$m_{F. Cascarilla} = \left(0,75 \frac{g}{cm^3}\right) * 95,32 cm^3$$

$$m_{F. Cascarilla} = 71,48 g$$

2.8.1.1.2 Material compuesto de matriz epoxi

El material compuesto de matriz epóxica reforzada con cascarilla de arroz se conforma de la misma fracción volumétrica descrita anteriormente, con la finalidad de realizar comparaciones entre dichos materiales en cuanto a su manufactura. Este material también se elabora en forma de láminas con las mismas dimensiones establecidas en las figuras 2.5 y 2.6, con espesores de 3,2 mm y 4,5 mm tanto para los ensayos de corte por láser y ensayos de inflamabilidad, respectivamente.

Probeta para pruebas de corte por láser

- **Masa resina epóxica**

$$Volumen\ total\ de\ la\ lamina\ base = 172,8 cm^3$$

Resina epóxica al 83%

$$V_{R. Epoxi} = 172,8 cm^3 * 83\%$$

$$V_{R. Epoxi} = 143,42 cm^3$$

$$m_{R. Epoxi} = \rho_{R. Epoxi} * V_{R. Epoxi}$$

$$m_{R. Epoxi} = \left(1,1 \frac{g}{cm^3}\right) * 143,42 cm^3$$

$$m_{R. Epoxi} = 157,77 g$$

- **Masa de la cascarilla**

Cascarilla de arroz al 17%

$$V_{F. Cascarilla} = 172,8 cm^3 * 17\%$$

$$V_{F. Cascarilla} = 29,38 cm^3$$

$$m_{F. Cascarilla} = \rho_{F. Cascarilla} * V_{F. Cascarilla}$$

$$m_{F. Cascarilla} = \left(0,75 \frac{g}{cm^3}\right) * 29,38 cm^3$$

$$m_{F. Cascarilla} = 22,03 g$$

Probeta para ensayos de inflamabilidad

- Masa resina epóxica

$$Volumen total de la lamina base = 560,70 cm^3$$

Resina epóxica al 83%

$$V_{R. Epoxi} = 560,70 cm^3 * 83\%$$

$$V_{R. Epoxi} = 465,38 cm^3$$

$$m_{R. Epoxi} = \rho_{R. Epoxi} * V_{R. Epoxi}$$

$$m_{R. Epoxi} = \left(1,1 \frac{g}{cm^3}\right) * 465,38 cm^3$$

$$m_{R. Epoxi} = 511,92 g$$

- Masa de la cascarilla

Cascarilla de arroz al 17%

$$V_{F. Cascarilla} = 560,70 cm^3 * 17\%$$

$$V_{F. Cascarilla} = 95,32 cm^3$$

$$m_{F. Cascarilla} = \rho_{F. Cascarilla} * V_{F. Cascarilla}$$

$$m_{F. Cascarilla} = \left(0,75 \frac{g}{cm^3}\right) * 95,32 cm^3$$

$$m_{F. Cascarilla} = 71,48 g$$

2.8.1.2 Tabulación de masas totales de la matriz y refuerzo

Tabla 2.18. Masas totales de la matriz y refuerzo de los materiales compuestos.



Descripción	Masa (gramos)		
	R. Poliéster	R. Epoxi	R. Cascarilla
Compuesto de matriz poliéster	730,57	-	93,51
Compuesto de matriz epóxica	-	669,69	93,51
Total	730,57	669,69	187,02




Fuente: Autor







La tabla 2.18 especifica que se requiere de una masa de 730,57 gramos de resina poliéster y 93,51 gramos de cascarilla de arroz para fabricar las láminas de 300x180x3,2 mm y 356x350x4,5 mm. Mientras que para las mismas láminas de 300x180x3,2 mm y 356x350x4,5 mm se requiere de una masa de 669,69 gramos de resina epóxica, conjuntamente con 93,51 gramos de cascarilla de arroz.

2.8.1.3 Fabricación de láminas del material compuesto mediante estratificación a compresión

Tabla 2.19. Elaboración de probetas para ensayos de corte por láser e inflamabilidad. **Obtención de láminas del material compuesto de matriz poliéster y epóxica reforzados con cascarilla de arroz.**

Proceso:		Estratificación a compresión	
N°	Fases	Descripción	Observaciones
1	Cortes longitudinales y tamizado del refuerzo.	Pre-Proceso	
		Mediante un rodillo se pasa continuamente 12 veces por la cascarilla de arroz a emplear, esto con el objetivo de eliminar los espacios abiertos de la misma.	
		Después de efectuar los cortes longitudinales se tamiza el refuerzo con un tamiz N°4.	
2	Aplicación de cera desmoldante y limpieza de la base.	Molde – Base	
		Mediante guaipe limpio se procede a remover y eliminar las impurezas de la superficie del molde base .	
		Se aplica 4 capas de cera desmoldante en la superficie metálica y después de 3 minutos se procede a pulir la superficie, hasta que presente un aspecto brillante.	

3	Aplicación de cera desmoldante y limpieza del marco.	Molde - Marco	<p>De la misma forma que el paso 1 se procede a remover y eliminar las impurezas de la superficie del marco mediante guaipe limpio.</p> <p>Se aplica 4 capas de cera desmoldante en todo el marco metálico y después de 3 minutos se procede a pulir la superficie, hasta que presente un aspecto brillante.</p>		
		Tapa - Marco			<p>Se aplica la misma metodología de los pasos 1 y 2 en la tapa del molde.</p>
5	Ensamblaje de la base y marco.	Base - Marco	<p>Se coloca cinta doble faz en todo el marco metálico, cerciorándonos que se encuentre bien pegada.</p> <p>Con las respectivas guías (pernos) que posee el marco metálico, ensamblar la base y el marco, con el cual se obtiene el área de trabajo requerido.</p> <p>Se inspecciona de manera visual que el ensamble sea adecuado, con la finalidad de eliminar posibles fugas de resina que posteriormente puede provocar imperfecciones en el material compuesto.</p>		
		Resina Poliéster	<p>Se cuantifica el volumen de resina poliéster mediante una balanza digital, en base a las fracciones volumétricas de la matriz.</p> <p>Mediante una jeringuilla se cuantifica el volumen de catalizador MEK, considerando del 1- 2% del volumen total de la resina poliéster.</p>		
		Resina Epóxica	<p>Antes de cuantificar el volumen de la resina epoxi y catalizador se debe aplicar la siguiente regla de fracción:</p> $V_{total-epoxi} * 0.8 = V_{real-epoxi}$ $V_{total-epoxi} * 0.2 = V_{catalizador}$ <p>Se cuantifica el volumen de resina epoxi real mediante una balanza digital con un vaso de precipitación, en base a las fracciones volumétricas de la matriz.</p> <p>Mediante un vaso de precipitación se cuantifica el volumen del catalizador.</p>		
6	Preparación de resinas y catalizador				

7	Mezcla de resina + acelerador	Con la ayuda de un recipiente plástico se mezcla la resina poliéster y el catalizador MEK durante 5 min., hasta lograr una mezcla homogénea por medio de un palito de madera o metálico.	
		Al igual que la metodología anterior, la resina epóxica conjuntamente se mezcla con el acelerador en un recipiente de plástico y por medio de una paleta de madera se homogeniza la matriz por 5 min.	
8	Preparación de la cascarilla de arroz en base a la fracción volumétrica establecida	Se cuantifica el volumen del refuerzo (cascarilla de arroz) mediante una balanza digital, en base a las fracciones volumétricas del refuerzo.	
9	Mezcla de matriz + refuerzo y Elaboración de la probeta	En los recipientes que contienen la matriz homogenizada se agrega la cascarilla de arroz y se mezcla por 5 min. Después se coloca la mezcla en el molde y se distribuye de la mejor manera.	
		Estratificación a compresión Se coloca la tapa del molde en su respectivo lugar y se sella la misma.	
10	Desmolde del material compuesto	Se desmolda el material compuesto después de 24 horas, esto se efectúa tanto para el material compuesto de matriz poliéster y matriz epoxi, con la ayuda de una espátula y unos ligeros golpes.	
11	Corrección de bordes	Laminas - corte por láser	
		Mediante lijas de agua se corrigen los 4 lados del material compuesto.	
12	Corte de probetas	Probetas - inflamabilidad	
		Se corta las probetas por medio de una sierra manual con la finalidad de no cambiar en lo posible las propiedades del material compuesto.	

Fuente: Autor

Tabla 2.20. Resumen de láminas y probetas a ensayar.

Nº	Tipo de material compuesto	Ensayo	# Probetas	Dimensiones (mm)
1	Matriz poliéster + cascarilla de arroz	Inflamabilidad	5	356*70*4,5 mm
2	Matriz poliéster + cascarilla de arroz	Corte láser	1	300*180*3,2 mm
3	Matriz epoxi + cascarilla de arroz	Inflamabilidad	5	356*70*4,5 mm
4	Matriz epoxi + cascarilla de arroz	Corte láser	1	300*180*3,2 mm
Total			12	

Fuente: Autor

2.8.1.4 Ensayos de corte por láser

Mediante las potencias y velocidades definidas en la tabla 2.11 y 2.15 se procedió a realizar los respectivos cortes de los materiales compuestos, en la máquina cortadora láser de CO₂ modelo RICOMA.

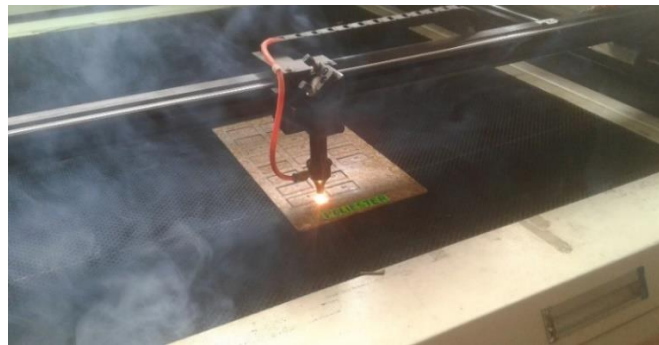


Figura 2.7. Proceso de corte por láser de CO₂.

Fuente: Autor

- **Codificación de probetas**

La respectiva codificación de las probetas del material compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz se efectuó de la siguiente manera:

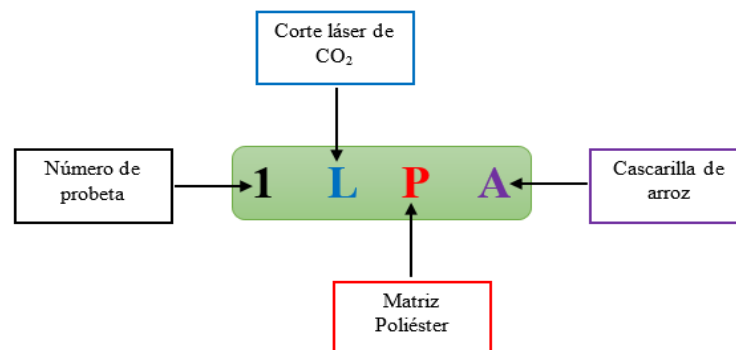


Figura 2.8. Codificación de probetas de material compuesto de matriz poliéster.

Fuente: Autor

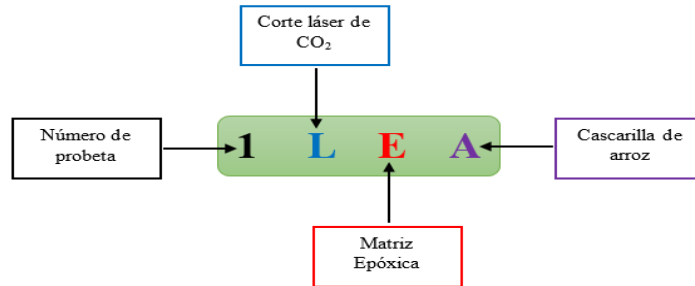


Figura 2.9. Codificación de probetas de material compuesto de matriz epóxica.
Fuente: Autor

Compuesto de matriz poliéster



Figura 2.10. Codificación de probetas de matriz poliéster cortadas con láser.
Fuente: Autor

Tabla 2.21. Combinación de factores y niveles empleados en el corte por láser de CO₂ del compuesto de matriz poliéster.

COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER			
CÓDIGO	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)	NÚMERO DE RÉPLICAS
1 LPA	60	10	2
2 LPA	100	10	2
3 LPA	60	14	2
4 LPA	100	14	2
5 LPA	60	12	2
6 LPA	100	12	2
7 LPA	80	10	2
8 LPA	80	14	2
9 LPA	80	12	2
10 LPA	80	12	2
11 LPA	80	12	2
12 LPA	80	12	2
13 LPA	80	12	2
TOTAL			26

Fuente: Autor

Compuesto de matriz epóxica



Figura 2.11. Codificación de probetas de matriz epóxica cortadas con láser.
Fuente: Autor

Tabla 2.22. Combinación de factores y niveles empleados en el corte por láser de CO₂ del compuesto de matriz epóxica.

COMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA			
CÓDIGO	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)	NÚMERO DE RÉPLICAS
1 LEA	60	10	2
2 LEA	100	10	2
3 LEA	60	14	2
4 LEA	100	14	2
5 LEA	60	12	2
6 LEA	100	12	2
7 LEA	80	10	2
8 LEA	80	14	2
9 LEA	80	12	2
10 LEA	80	12	2
11 LEA	80	12	2
12 LEA	80	12	2
13 LEA	80	12	2
TOTAL			26

Fuente: Autor

2.8.1.5 Equipo de medición

- Rugosímetro digital MITUTOYO SJ 210 con sus respectivos elementos.



Figura 2.12. Partes que conforman el Rugosímetro.
Fuente: Autor

- Ensamblaje de todos los componentes que forman el equipo de medición.



Figura 2.13. Ensamble del Rugosímetro.
Fuente: Autor

2.8.1.5.1 Calibración del Rugosímetro

- Ubicación de la galga de calibración sobre el sujetador base.



Figura 2.14. Soporte base y galga de calibración.
Fuente: Autor

- Ubicación del equipo de medición sobre el soporte base del patrón de calibración (galga).



Figura 2.15. Preparación del equipo a ser calibrado.
Fuente: Autor

- Configuración de los parámetros del equipo de calibración.

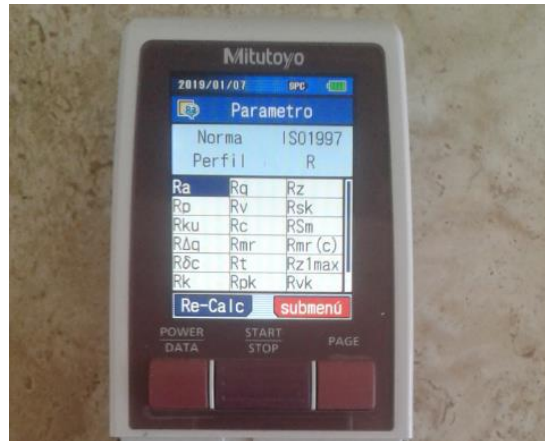


Figura 2.16. Configuración de parámetros de calibración.
Fuente: Autor

- Calibración del equipo de medición con el valor de la rugosidad del patrón de calibración ($2,94 \mu\text{m}$).

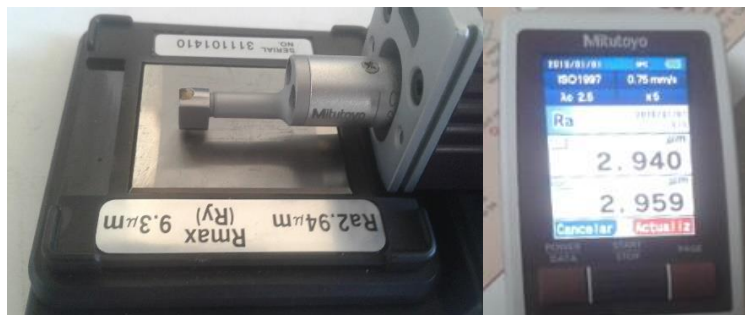


Figura 2.17. Calibración del Rugosímetro digital.
Fuente: Autor

2.8.1.5.2 Medición de la rugosidad

- Se coloca la probeta del material compuesto en la porta probetas, cerciorándonos que la superficie a ser medida quede completamente paralela al palpador del Rugosímetro.



Figura 2.18. Ubicación adecuada de la probeta y el palpador.
Fuente: Autor

- Medición de la rugosidad superficial cortada con láser, en base a la norma ISO 4287-1997 establecida en el equipo de medición.



Figura 2.19. Medición de la rugosidad de las superficies expuestas al láser.
Fuente: Autor

2.8.1.6 Efecto térmico

- Mediante el empleo del pirómetro CEM DT-8867H (medición máxima de 1650 °C) se miden las temperaturas en la superficie del material compuesto durante el corte por láser.



Figura 2.20. Medición de las temperaturas superficiales del material expuesto al láser.
Fuente: Autor

- Medición de masas de las probetas (compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica) cortadas con láser mediante de una balanza digital.



Figura 2.21. Medición de las masas de las probetas.
Fuente: Autor

- Cálculo de las densidades de las probetas de matriz poliéster y epóxica, mediante la expresión 2.1

$$\rho = \frac{m}{v} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

- Determinación de la difusividad térmica de las probetas de matriz poliéster y epóxica, mediante la expresión 2.2

$$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p} = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

- Determinación de la temperaturas superficiales que se distribuye de las probetas de matriz poliéster y epóxica, mediante la expresión 2.3

$$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k * \sqrt{\frac{\pi * t}{\alpha}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 * \alpha * t}\right)$$

- Determinación de las temperaturas que se distribuye a diferentes profundidades (espesor) de las probetas de matriz poliéster y epóxica, mediante la expresión 2.4 y 2.5

$$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1} ; R_{t,cond} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{q_x} = \frac{L}{k * A}$$

2.8.1.7 Ensayo de inflamabilidad

- **Codificación de probetas**

La respectiva codificación de las probetas del material compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz se efectuó de la siguiente manera:

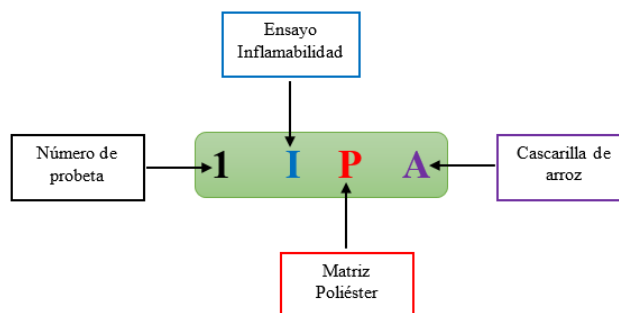


Figura 2.22. Codificación de probetas de inflamabilidad del material compuesto de matriz poliéster.

Fuente: Autor

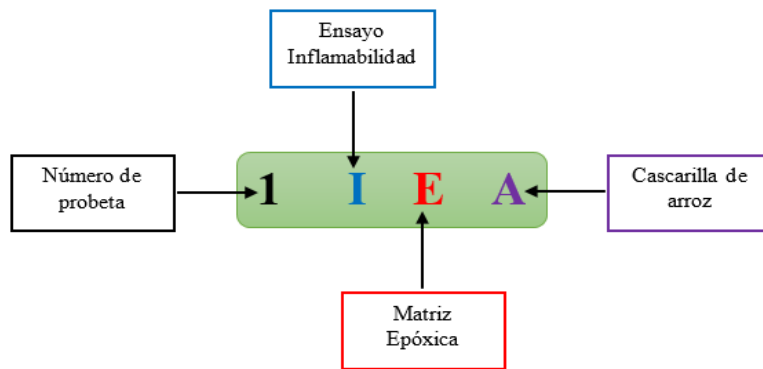


Figura 2.23. Codificación de probetas de inflamabilidad del material compuesto de matriz epóxica.

Fuente: Autor



Figura 2.24. Codificación de probetas de inflamabilidad de matriz poliéster.

Fuente: Autor



Figura 2.25. Codificación de probetas de inflamabilidad de matriz epóxica.

Fuente: Autor

Procedimiento

- Medición de masas de las probetas de los compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica por medio de una balanza digital.



Figura 2.26. Medición de masa de probeta de inflamabilidad.
Fuente: Autor

- Ubicación de la probeta a ensayar en la porta probetas, cerciorándose que el extremo de la probeta quede salida unos 5 mm aproximadamente.



Figura 2.27. Ubicación de la probeta en la porta probetas.
Fuente: Autor

- Configuración de los parámetros de entrada (altura de llama, cantidad de aire, tiempo de encendido) de la máquina de ensayos de inflamabilidad por medio del ordenador.

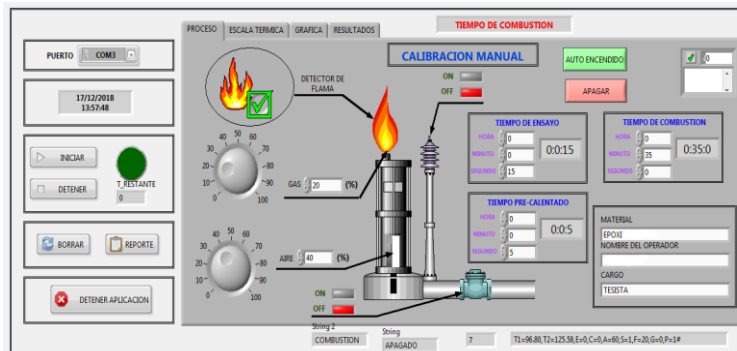


Figura 2.28. Configuración de la máquina de ensayos.
Fuente: Autor

- Ubicación del porta probetas dentro de la cámara de combustión.



Figura 2.29. Ubicación del porta probetas en la máquina de ensayos.
Fuente: Autor

- Medición del tiempo de combustión por medio de un cronómetro digital.



Figura 2.30. Medición del tiempo de combustión.
Fuente: Autor

- Extracción de la probeta ensayada de la cámara de combustión.



Figura 2.31. Extracción del porta probetas.
Fuente: Autor

- Medición de masas de las probetas de los materiales compuestos de matriz poliéster y epóxica (ensayadas) por medio de una balanza digital.

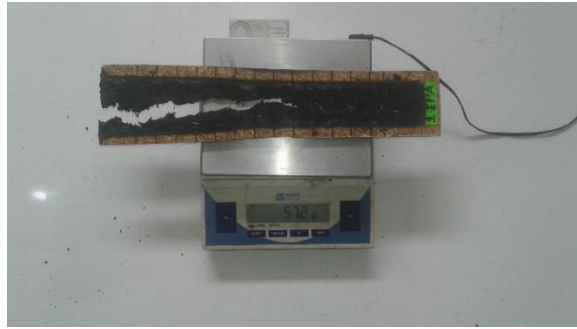


Figura 2.32. Medición de masa de la probeta ensayada.
Fuente: Autor

- Probetas ensayadas.

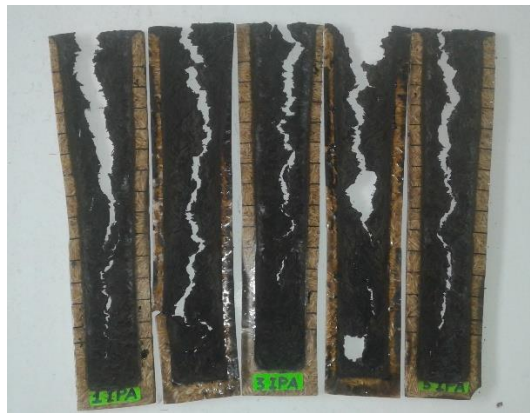


Figura 2.33. Probetas ensayadas del material compuesto de matriz poliéster.
Fuente: Autor

- Cálculo de la velocidad de combustión de las probetas de matriz poliéster y epóxica, mediante la expresión 2.7

$$B = \frac{s}{t} * 60 ; \left[\frac{mm}{min} \right]$$

CAPÍTULO III.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis e interpretación de resultados

3.1.1 Recolección de datos

En los siguientes apartados se presenta la recopilación de los datos y resultados de los cortes por láser de CO₂ y de los ensayos de inflamabilidad, en donde se miden las temperaturas superficiales durante el proceso por medio de un pirómetro, consecutivamente a esto se calcula la densidad y conductividad térmica, para que después se determine la distribución de las temperaturas a diversos espesores y finalizando con la medición de la rugosidad, esto en cuanto a los cortes por láser de CO₂, mientras que para los ensayos de inflamabilidad se determina el tiempo de combustión, la tasa de combustión y la pérdida de masa. Cada uno de estos estudios experimentales se efectúan tanto para el material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz y para el material compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz.

3.1.2 Datos y resultados de corte por láser

3.1.2.1 Compuesto de matriz poliéster

3.1.2.1.1 Temperaturas medidas con el pirómetro

Tabla 3.1. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz poliéster, réplica 1.

Temperatura superficial adyacente al borde cortado						
Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1 era	2 da	3 era	
1 LPA	60	10	410,5	466,6	415,5	430,87
2 LPA	100	10	704,8	724,2	761,1	730,03
3 LPA	60	14	348,9	385,5	305,1	346,5
4 LPA	100	14	517,8	600,2	583,7	567,23
5 LPA	60	12	402,3	448,8	398,3	416,47
6 LPA	100	12	641,9	597,4	624,4	621,23

7 LPA	80	10	588,5	502,7	561,1	550,77
8 LPA	80	14	469,4	474,4	422,3	455,37
9 LPA	80	12	476,3	569,3	501,1	515,57
10 LPA	80	12	616,6	554,4	513,4	561,47
11 LPA	80	12	515,4	599,6	534,4	549,8
12 LPA	80	12	573,5	531,2	501,9	535,53
13 LPA	80	12	522,9	545,3	609,6	559,27

Fuente: Autor

Tabla 3.2. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz poliéster, réplica 2.



Temperatura superficial adyacente al borde cortado						
Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1 era	2 da	3 era	
27 LPA	60	10	416,3	421,1	408,9	415,43
28 LPA	100	10	741,1	681,5	702,3	708,3
29 LPA	60	14	362,9	409,8	374,6	382,43
30 LPA	100	14	609,9	578,3	544,2	577,47
31 LPA	60	12	395,2	404,8	372,2	390,73
32 LPA	100	12	719,3	614,3	643,6	659,07
33 LPA	80	10	542,7	583,4	478,9	535
34 LPA	80	14	458,2	476,8	537,7	490,9
35 LPA	80	12	523,1	502,5	481,1	502,23
36 LPA	80	12	506,8	579,3	533,7	539,93
37 LPA	80	12	511,7	478,4	540,8	510,3
38 LPA	80	12	621,3	546,1	512,2	559,87
39 LPA	80	12	538,3	581,7	526,5	548,83

Fuente: Autor

La tabla 3.1 y 3.2 indica las temperaturas superficiales adyacentes al borde cortado mediante rayo láser de CO₂ medidas con el pirómetro para cada tratamiento experimental.

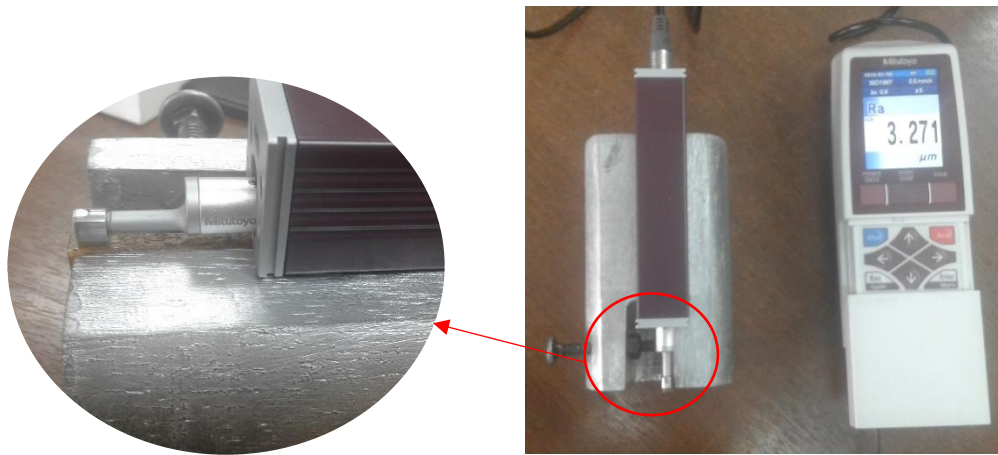
3.1.2.1.2 Medición de rugosidades

Tabla 3.3. Resultados de las rugosidades superficiales medidas en las probetas de matriz poliéster.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA INGENIERÍA MECÁNICA 					
RECOPIACIÓN DE DATOS Y EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL COMPUESTO DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADA CON CASCARILLA DE ARROZ					
DATOS INFORMATIVOS					
Realizado por: Juan Carlos Tonato Tonato			Supervisado por: Ing. Cristian Pérez, Mg.		
Fecha: 03/01/2019			Lugar: Laboratorio de Materiales		
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL					
Material Matriz:		Resina Poliéster			
Fracción Volumétrica (Matriz):		83%			
Material Refuerzo:		Cascarilla de arroz			
Fracción Volumétrica (Refuerzo):		17%			
Configuración de la fibra:		Dispersa			
Dimensiones:		40x20x3,2 mm			
PARÁMETROS DEL ENSAYO DE RUGOSIDAD					
Material:		Compuesto de matriz poliéster reforzada con cascarilla de arroz.			
Temperatura Ambiente:		23°C			
Geometría:		1			
EQUIPO DE MEDICIÓN					
Modelo:		Rugosímetro Mitutoyo SJ-210			
Norma seleccionada:		Norma ISO - 1997			
RESULTADOS DE RUGOSIDAD (μm)					
RÉPLICA 1					
CÓDIGO	Longitud: 40 mm		Ancho: 20 mm		Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	
1 LPA	4,330	4,189	4,427	3,373	4,080
2 LPA	3,550	2,852	2,277	4,153	3,208
3 LPA	3,023	3,298	2,675	2,551	2,887
4 LPA	3,855	3,602	5,037	2,225	3,680
5 LPA	3,073	4,037	4,276	4,625	4,003
6 LPA	4,402	3,864	4,069	3,423	3,940
7 LPA	3,798	3,995	5,236	3,387	4,104
8 LPA	2,225	3,905	3,350	3,751	3,308
9 LPA	3,123	3,337	2,510	2,513	2,871
10 LPA	3,451	3,078	4,091	3,846	3,617
11 LPA	3,271	4,152	2,324	2,326	3,018
12 LPA	3,602	3,978	3,628	3,853	3,765
13 LPA	4,697	4,035	3,745	3,897	4,094
RÉPLICA 2					
27 LPA	3,594	4,160	2,343	3,792	3,472
28 LPA	4,359	4,036	3,003	5,298	4,174
29 LPA	2,170	2,137	2,747	2,250	2,326

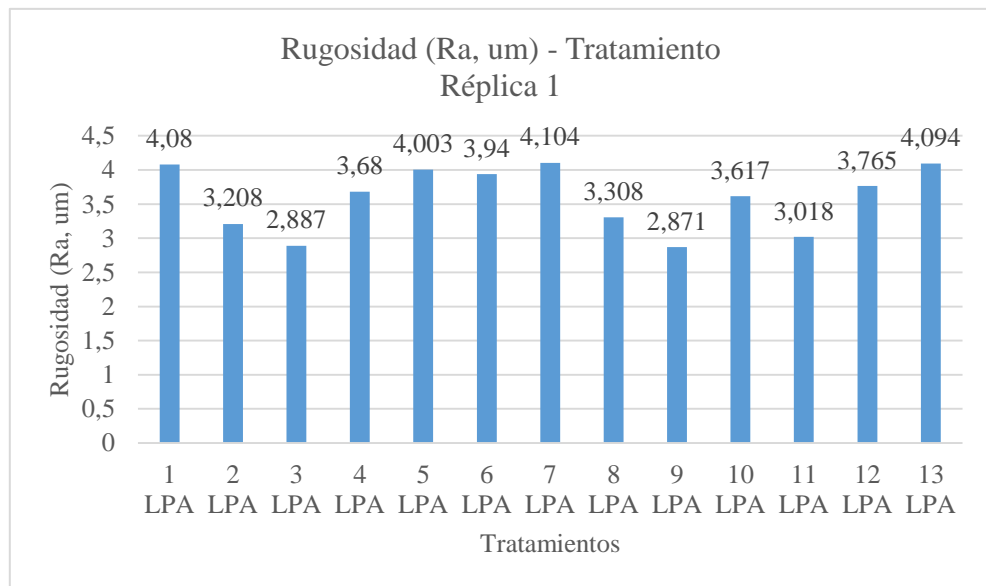
30 LPA	3,824	3,664	4,868	4,278	4,159
31 LPA	4,183	3,667	4,046	3,667	3,891
32 LPA	3,445	5,178	5,568	4,554	4,686
33 LPA	5,327	4,836	3,118	3,495	4,194
34 LPA	3,033	3,955	3,001	3,047	3,259
35 LPA	3,102	3,611	3,104	3,121	3,235
36 LPA	5,118	5,357	2,222	2,366	3,766
37 LPA	2,382	3,378	3,639	2,987	3,097
38 LPA	3,263	3,764	4,202	4,231	3,865
39 LPA	3,407	4,475	2,978	4,625	3,871

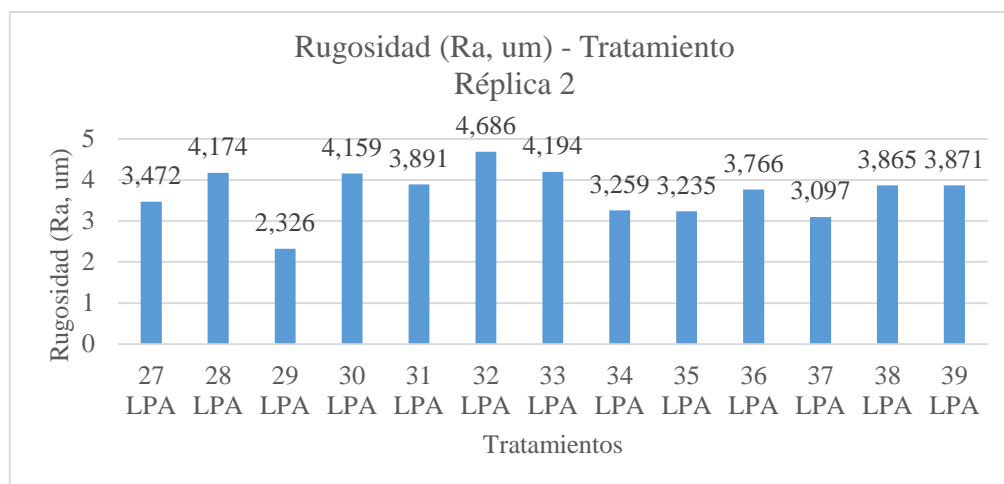
FOTOGRAFÍA DE MEDICIÓN



Medición 1 y lectura de rugosidad de la primera réplica de la probeta 11 LPA

RUGOSIDAD – TIPO DE TRATAMIENTO





Observaciones:

La rugosidad más baja registrada en las mediciones de la réplica 1 es de 2,871 μm de la probeta 9 LPA la cual fue cortada con una potencia de 80 W y una velocidad de 12 mm/s.

La rugosidad más baja de las mediciones de la réplica 2 es de 2,326 μm de la probeta 29 LPA la cual fue cortada con una potencia de 60 W y una velocidad de 14 mm/s.

Anexo C: Informe técnico de las mediciones de la rugosidad superficial de las probetas de matriz poliéster, otorgado por la Centro de Transferencia y Tecnología (CTT).

3.1.2.1.3 Cálculo de la densidad

- Determinación de masa

Tabla 3.4. Medición de masas de las probetas de matriz poliéster.

Medición de la masa (g) del compuesto de matriz poliéster				
Código		Réplica 1	Réplica 2	Promedio
1 LPA	27 LPA	3,9	4,5	4,2
2 LPA	28 LPA	4	4,6	4,3
3 LPA	29 LPA	4,2	4,7	4,45
4 LPA	30 LPA	4,3	4,5	4,4
5 LPA	31 LPA	4,4	4,4	4,4
6 LPA	32 LPA	4,1	4,2	4,15
7 LPA	33 LPA	3,9	3,9	3,9
8 LPA	34 LPA	3,8	4	3,9
9 LPA	35 LPA	3,8	3,9	3,85
10 LPA	36 LPA	4,1	3,9	4
11 LPA	37 LPA	4,4	4,1	4,25
12 LPA	38 LPA	4,3	4,1	4,2
13 LPA	39 LPA	4,4	4,2	4,3
Promedio Total (g)				4,18
Promedio Total (Kg)				0,00418

Fuente: Autor

- Densidad

$$v = (0,04 * 0,02 * 0,0032) m^3$$

$$v = 2,56x10^{-6} m^3$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{0,00418 Kg}{2,56x10^{-6} m^3}$$

$$\rho = 1632,81 Kg/m^3$$

3.1.2.1.4 Tiempo de pulso láser

Los pulsos que se requieren para efectuar un corte rectangular de 40x20mm son 600 [16]. Este dato es fundamental para la determinación del tiempo de pulso láser a diferentes velocidades de corte de un material compuesto, el cual se presenta en la tabla 3.5. A modo de comprobación de lo descrito anteriormente se tiene que en el presente trabajo experimental se corta una probeta de material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz de 40x20x3.2mm con una velocidad de corte de 10 mm/s y un diámetro de rayo láser de 0.2 mm, para lo cual se efectúan los siguientes cálculos:

$$Pulsos = \frac{Perímetro\ de\ la\ probeta}{Diámetro\ del\ rayo\ láser}$$

$$Pulsos = \frac{120\ mm}{0,2\ mm}$$

$$Pulsos = 600$$

$$Tiempo\ total\ de\ corte = \frac{Perímetro\ de\ la\ probeta}{Velocidad\ de\ corte}$$

$$Tiempo\ total\ de\ corte = \frac{120\ mm}{10\ mm/s}$$

$$Tiempo\ total\ de\ corte = 12\ s$$

Con el tiempo total de corte y los pulsos necesarios que se requieren para cortar una probeta rectangular de 40x20mm se puede determinar el tiempo de pulso, tal como sigue:

$$\text{Tiempo de pulso} = \frac{\text{Tiempo total de corte}}{\text{Pulsos}}$$

$$\text{Tiempo de pulso} = \frac{12 \text{ s}}{600}$$

$$\text{Tiempo de pulso} = 0,02 \text{ s}$$

Utilizando la metodología anterior se obtienen los valores de la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Determinación del tiempo de pulso a varias velocidades de corte, para el compuesto de matriz poliéster.

Tiempo de pulso láser						
Velocidad de corte (mm/s)	Longitud de corte (mm)	Tiempo total de corte (s)	Diámetro haz láser (mm)	Pulsos	Tiempo de pulso (s)	Tiempo de pulso (ms)
10	120	12	0,2	600	0,02	20
12	120	10	0,2	600	0,017	17
14	120	8,571	0,2	600	0,014	14

Fuente: Autor

3.1.2.1.5 Cálculo de la temperatura superficial

Tabla 3.6. Parámetros generales de corte por láser, para el compuesto de matriz poliéster.

Parámetros de corte			
Factores	Símbolo	Valor	Unidades
Profundidad de corte	x	0	m
Temperatura inicial	T	23	$^{\circ}C$
Pi	π	3,141592654	-
Diámetro del haz láser	\varnothing_h	0,2	mm
Radio de exposición	r_e	2	mm
Área de exposición	A	1,26E-05	m^2
Distancia de corte rectangular	d_r	120	mm

Fuente: Autor

Tabla 3.7. Propiedades del compuesto de matriz poliéster.

Datos del material compuesto					
Propiedades	Símbolo	Resina poliéster	Cascarilla de arroz	Material compuesto	Unidades
Densidad	ρ	1270	750	1632,81	Kg/m^3
Conductividad térmica	K	0,4	0,036	0,4	$W/m^{\circ}C$
Calor específico	C_p	1350	962,32	1350	$J/m^{\circ}C$

Fuente: Autor

Tabla 3.8. Cálculo analítico de las temperaturas superficiales generadas en el proceso de corte por láser de CO₂ del compuesto de matriz poliéster.

Temperatura superficial								
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Tiempo total de corte (s)	Tiempo de pulso (s)	Energía transferida (J)	Pulso de energía (J/m ²)	Difusividad térmica (m ² /s)	Temperatura superficial (°C)
	P	v_c	$t_c = \frac{d_r}{v_c}$	t_p	$e = P * t_p$	$e_s = \frac{e}{A}$	$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p}$	$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k * \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}}$
1 LPA	60	10	12	0,02	1,2	95492,966	1,81E-07	428,711
2 LPA	100	10	12	0,02	2	159154,943	1,81E-07	699,185
3 LPA	60	14	8,571	0,014	0,84	66845,076	1,81E-07	362,442
4 LPA	100	14	8,571	0,014	1,4	111408,46	1,81E-07	588,737
5 LPA	60	12	10	0,017	1,02	81169,021	1,81E-07	397,047
6 LPA	100	12	10	0,017	1,7	135281,702	1,81E-07	646,412
7 LPA	80	10	12	0,02	1,6	127323,954	1,81E-07	563,948
8 LPA	80	14	8,571	0,014	1,12	89126,768	1,81E-07	475,59
9 LPA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	1,81E-07	521,729
10 LPA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	1,81E-07	521,729
11 LPA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	1,81E-07	521,729
12 LPA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	1,81E-07	521,729
13 LPA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	1,81E-07	521,729

Fuente: Autor

3.1.2.1.6 Tabulación y selección de temperaturas superficiales

Tabla 3.9. Comparación de Temperaturas determinadas analíticamente y medidas con el pirómetro en el compuesto de matriz poliéster.

Compuesto de matriz poliéster			
Temperaturas superficiales (°C)			
Código	Cálculo analítico	Pirómetro	
		Réplica 1	Réplica 2
1 LPA	428,711	430,87	415,43
2 LPA	699,185	730,03	708,3
3 LPA	362,442	346,5	382,43
4 LPA	588,737	567,23	577,47
5 LPA	397,047	416,47	390,73
6 LPA	646,412	621,23	659,07
7 LPA	563,948	550,77	535
8 LPA	475,59	455,37	490,9
9 LPA	521,729	515,57	502,23
10 LPA	521,729	561,47	539,93
11 LPA	521,729	549,8	510,3
12 LPA	521,729	535,53	559,87
13 LPA	521,729	559,27	548,83

Fuente: Autor

Como la variabilidad de los datos no es muy grande en cuanto a las temperaturas superficiales determinadas de manera analítica con las tomadas con el pirómetro, esta última se considera para el cálculo de la distribución de las temperaturas a varias profundidades (espesor) del material compuesto de matriz poliéster.

3.1.2.1.7 Distribución de temperaturas a diferentes espesores

Tabla 3.10. Datos de entrada para la distribución de temperaturas internas mediante resistencias térmicas, compuesto de matriz poliéster.

Parámetros de entrada			
Factores	Símbolo	Valor	Unidades
Espesor del material	<i>L</i>	0,0032	<i>m</i>
Área superficial	<i>A</i>	0,0016	<i>m</i> ²
Conductividad térmica	<i>K</i>	0,4	<i>W/m °C</i>

Fuente: Autor

Tabla 3.11. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz poliéster, réplica 1.

Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Temperatura a diversos espesores (°C)			
			Ts,1 (superficie)	Ts,2 (x=3,2 mm)	T interna (x=1 mm)	T interna (x=2 mm)
			$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \exp\left(-\frac{x_1}{4at}\right)$	$T_{s,2} = T_{s,1} - \frac{P * L}{k * A}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$
1 LPA	60	10	430,87	130,87	337,12	243,37
2 LPA	100	10	730,03	230,03	573,78	417,53
3 LPA	60	14	346,5	46,5	252,75	159
4 LPA	100	14	567,23	67,23	410,98	254,73
5 LPA	60	12	416,47	116,47	322,72	228,97
6 LPA	100	12	621,23	121,23	464,98	308,73
7 LPA	80	10	550,77	150,77	425,77	300,77
8 LPA	80	14	455,37	55,37	330,37	205,37
9 LPA	80	12	515,57	115,57	390,57	265,57
10 LPA	80	12	561,47	161,47	436,47	311,47
11 LPA	80	12	549,8	149,8	424,8	299,8
12 LPA	80	12	535,53	135,53	410,53	285,53
13 LPA	80	12	559,27	159,27	434,27	309,27

Fuente: Autor

Tabla 3.12. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz poliéster, réplica 2.

Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Temperatura a diversos espesores (°C)			
			Ts,1 (superficie)	Ts,2 (x=3,2 mm)	T interna (x=1 mm)	T interna (x=2 mm)
			$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \exp\left(-\frac{x_1}{4at}\right)$	$T_{s,2} = T_{s,1} - \frac{P * L}{k * A}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$
27 LPA	60	10	415,43	115,43	321,68	227,93
28 LPA	100	10	708,3	208,3	552,05	395,8
29 LPA	60	14	382,43	82,43	288,68	194,93
30 LPA	100	14	577,47	77,47	421,22	264,97
31 LPA	60	12	390,73	90,73	296,98	203,23
32 LPA	100	12	659,07	159,07	502,82	346,57
33 LPA	80	10	535	135	410	285
34 LPA	80	14	490,9	90,9	365,9	240,9
35 LPA	80	12	502,23	102,23	377,23	252,23
36 LPA	80	12	539,93	139,93	414,93	289,93
37 LPA	80	12	510,3	110,3	385,3	260,3
38 LPA	80	12	559,87	159,87	434,87	309,87
39 LPA	80	12	548,83	148,83	423,83	298,83

Fuente: Autor

Todo el flujo de calor generado en la superficie se transmite por el espesor del material compuesto de matriz poliéster, esto se determina en base a las temperaturas Ts,2 calculadas en la tabla 3.11 y 3.12.

Mediante la distribución de temperaturas calculadas por resistencias térmicas por conducción en las tablas 3.11 y 3.12 se determina que la distribución de temperatura desde la parte superficial hasta una profundidad de 3,2 mm disminuye progresivamente conforme va penetrando el material compuesto de matriz poliéster, es decir que el ancho del HAZ producida en la superficie también disminuye conforme la temperatura se reduce al ganar profundidad. Esto es debido a la conductividad térmica del material de $0,4 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, al no ser muy conductivo provoca que la transmisión de calor en el interior del compuesto sea cada vez más lento conforme va atravesando el material. Pero el mismo no tiene mayor influencia debido a la propiedad ignífuga ($>750^\circ\text{C}$) del refuerzo.

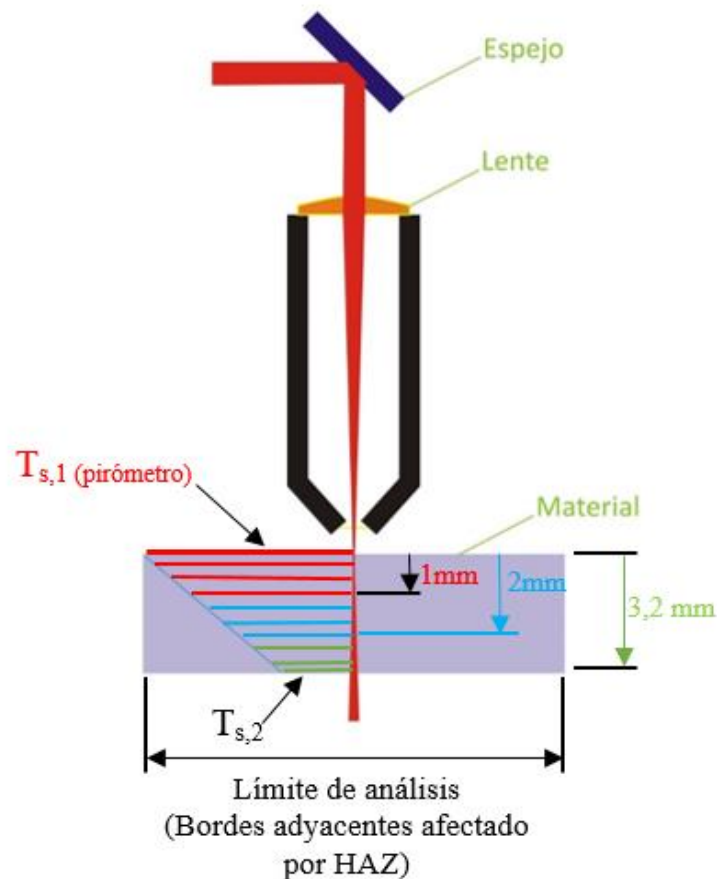


Figura 3.1. Diagrama de distribución de temperaturas en el material compuesto de matriz poliéster.

Fuente: Autor

Mediante la figura 3.1 y los cálculos $T_{s,2}$ tanto de la tabla 3.11 y 3.12 se observa que el flujo de calor atraviesa el espesor del material compuesto por completo, obteniendo de esta manera los valores de $T_{s,2}$.

3.1.2.2 Compuesto de matriz epóxica

3.1.2.2.1 Temperaturas medidas con el pirómetro

Tabla 3.13. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz epóxica, replica 1.

Temperatura superficial adyacente al borde cortado						
Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1 era	2 da	3 era	
14 LEA	60	10	637,3	655,3	611,2	634,6
15 LEA	100	10	949,2	963,6	998,2	970,33
16 LEA	60	14	572,2	549,2	683,7	601,7
17 LEA	100	14	874,8	827,3	803,6	835,23
18 LEA	60	12	520,5	545,6	589,1	551,73
19 LEA	100	12	899,3	921,1	959,4	926,6
20 LEA	80	10	889,4	848,3	852,2	863,3
21 LEA	80	14	757	718,2	675,2	716,8
22 LEA	80	12	744,7	725,2	761,8	743,9
23 LEA	80	12	739,3	723,4	717,1	726,6
24 LEA	80	12	802,2	754,4	788,8	781,8
25 LEA	80	12	742,9	769,9	781,3	764,7
26 LEA	80	12	746,3	738,5	721,6	735,47

Fuente: Autor



Tabla 3.14. Temperaturas superficiales generadas en las probetas de matriz epóxica, replica 2.

Temperatura superficial adyacente al borde cortado						
Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1 era	2 da	3 era	
40 LEA	60	10	667,2	640,7	651,3	653,07
41 LEA	100	10	975,6	869,2	992,9	945,9
42 LEA	60	14	579,1	598,6	527,2	568,3
43 LEA	100	14	817,3	836,9	794,3	816,17
44 LEA	60	12	592,6	621,2	578,8	597,53
45 LEA	100	12	925,1	897,8	879,3	900,73
46 LEA	80	10	858,1	795,7	842,9	832,23
47 LEA	80	14	701,2	695,7	718,6	705,17
48 LEA	80	12	755,1	715,5	687,4	719,33
49 LEA	80	12	727,8	782,1	754,3	754,73
50 LEA	80	12	785	768,7	750,3	768
51 LEA	80	12	792,1	779,5	764,8	778,8
52 LEA	80	12	801,6	756,9	771,6	776,7

Fuente: Autor

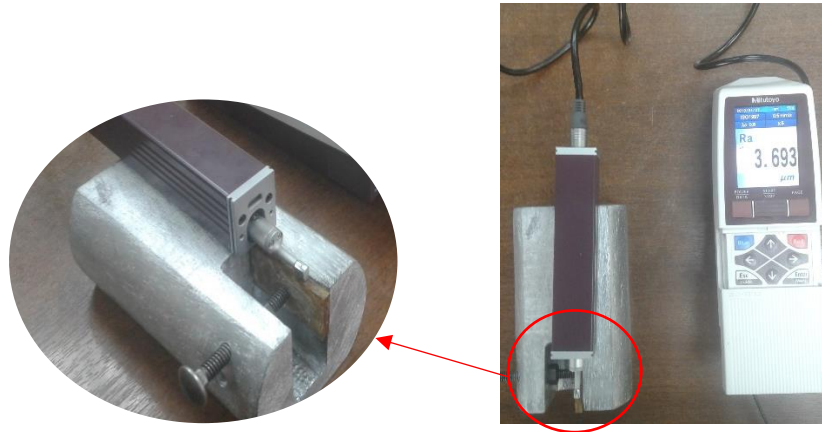
3.1.2.2.2 Medición de rugosidades

Tabla 3.15. Resultados de las rugosidades superficiales medidas en las probetas de matriz epóxica.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA INGENIERÍA MECÁNICA 					
RECOPIACIÓN DE DATOS Y EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL COMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA REFORZADA CON CASCARILLA DE ARROZ					
DATOS INFORMATIVOS					
Realizado por: Juan Carlos Tonato Tonato			Supervisado por: Ing. Cristian Pérez, Mg.		
Fecha: 03/01/2019			Lugar: Laboratorio de Materiales		
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL					
Material Matriz:		Resina Epóxica			
Fracción Volumétrica (Matriz):		83%			
Material Refuerzo:		Cascarilla de arroz			
Fracción Volumétrica (Refuerzo):		17%			
Configuración de la fibra:		Dispersa			
Dimensiones:		40x20x3,2 mm			
PARÁMETROS DEL ENSAYO DE RUGOSIDAD					
Material:		Compuesto de matriz epóxica reforzada con cascarilla de arroz.			
Temperatura Ambiente:		23°C			
Geometría:		1			
EQUIPO DE MEDICIÓN					
Modelo:		Rugosímetro Mitutoyo SJ-210			
Norma seleccionada:		Norma ISO - 1997			
RESULTADOS DE RUGOSIDAD (μm)					
RÉPLICA 1					
CÓDIGO	Longitud: 40 mm		Ancho: 20 mm		Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	
14 LEA	3,693	3,915	4,834	2,646	3,772
15 LEA	4,965	5,062	4,211	5,012	4,813
16 LEA	5,277	5,583	4,176	4,589	4,906
17 LEA	6,109	5,146	3,649	4,034	4,735
18 LEA	5,270	5,705	6,430	6,504	5,977
19 LEA	4,337	5,821	5,268	4,935	5,090
20 LEA	4,345	4,649	4,188	3,923	4,276
21 LEA	3,623	3,926	3,887	4,283	3,930
22 LEA	4,080	4,328	4,780	5,859	4,762
23 LEA	4,784	5,282	4,715	6,472	5,313
24 LEA	4,650	4,871	3,922	5,577	4,755
25 LEA	4,556	3,954	3,585	3,981	4,019
26 LEA	4,593	4,641	4,048	4,127	4,352
RÉPLICA 2					
40 LEA	4,784	5,143	4,726	3,683	4,584
41 LEA	5,114	5,796	4,593	4,633	5,034
42 LEA	6,312	5,727	4,200	4,199	5,110
43 LEA	5,253	3,926	4,882	4,226	4,572
44 LEA	5,010	5,855	4,597	6,010	5,368

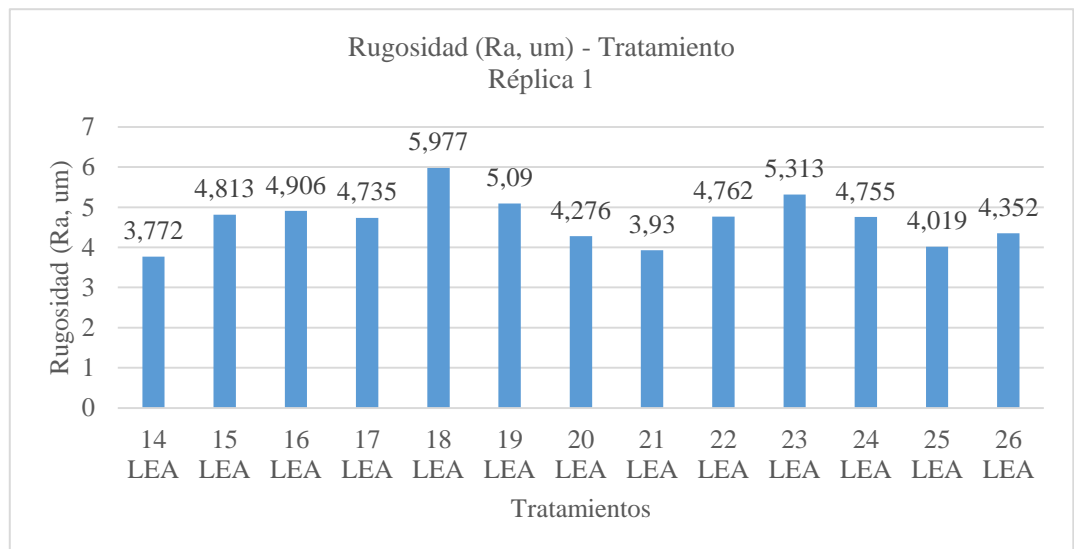
45 LEA	4,957	4,369	5,354	5,226	4,977
46 LEA	4,161	4,031	6,544	6,338	5,269
47 LEA	4,904	4,248	4,875	4,778	4,701
48 LEA	4,812	4,338	3,885	4,331	4,342
49 LEA	5,487	4,064	5,663	5,705	5,230
50 LEA	4,777	5,005	6,123	3,532	4,859
51 LEA	4,971	4,490	5,177	5,551	5,047
52 LEA	4,730	4,904	4,478	4,343	4,614

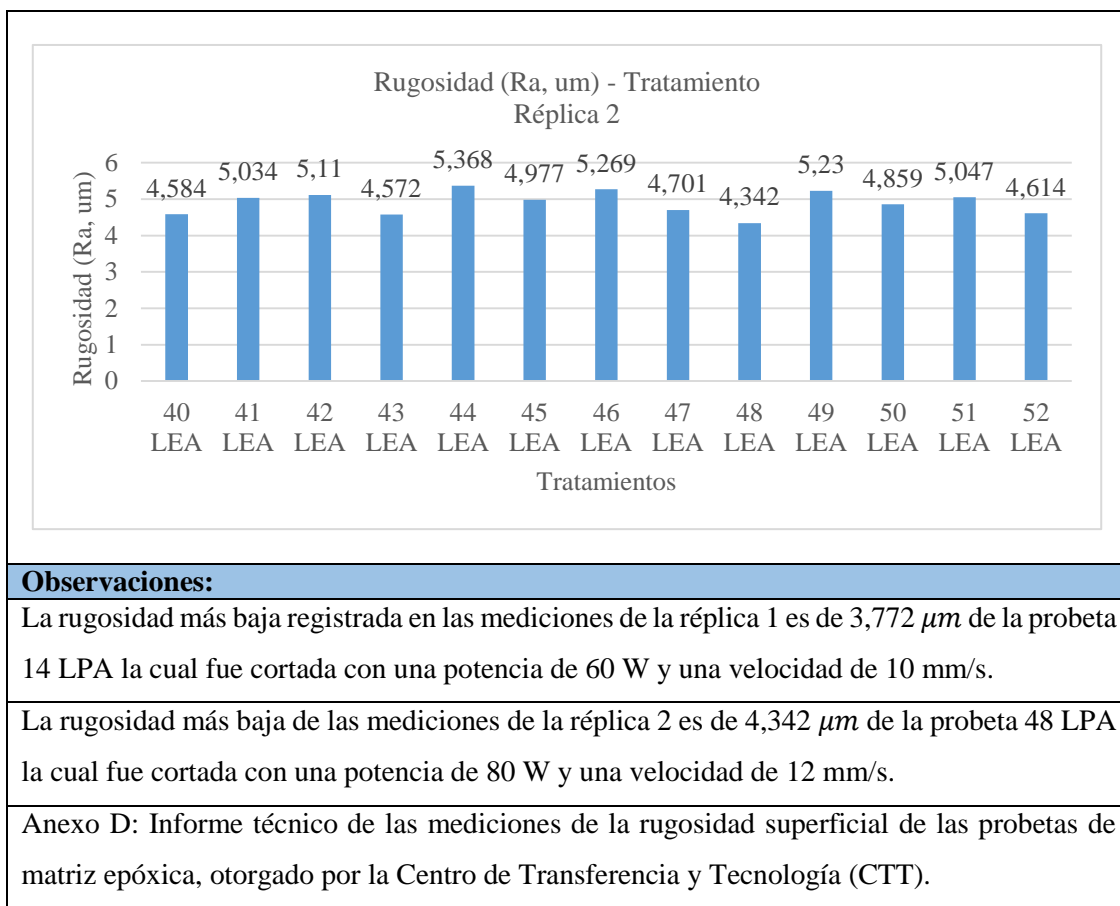
FOTOGRAFÍA DE MEDICIÓN



Medición 1 y lectura de rugosidad de la primera réplica de la probeta 14 LEA

RUGOSIDAD – TIPO DE TRATAMIENTO





3.1.2.2.3 Cálculo de la densidad

- Determinación de masa

Tabla 3.16. Medición de masas de las probetas de matriz epóxica.

Medición de la masa (g)				
Código		Réplica 1	Réplica 2	Promedio
14 LEA	40 LEA	3,5	3,7	3,6
15 LEA	41 LEA	3,5	3,7	3,6
16 LEA	42 LEA	3,6	3,7	3,65
17 LEA	43 LEA	3,5	3,9	3,7
18 LEA	44 LEA	3,6	3,9	3,75
19 LEA	45 LEA	3,6	4	3,8
20 LEA	46 LEA	3,7	4,1	3,9
21 LEA	47 LEA	3,9	4,2	4,05
22 LEA	48 LEA	4,1	4,3	4,2
23 LEA	49 LEA	3,9	4,4	4,15
24 LEA	50 LEA	3,9	4,1	4
25 LEA	51 LEA	3,8	4	3,9
26 LEA	52 LEA	3,9	3,9	3,9
Promedio Total (g)				3,86
Promedio Total (Kg)				0,00386

Fuente: Autor

- Densidad

$$v = (0,04 * 0,02 * 0,0032) m^3$$

$$v = 2,56 \times 10^{-6} m^3$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{0,00386 Kg}{2,56 \times 10^{-6} m^3}$$

$$\rho = 1507,81 Kg/m^3$$

3.1.2.2.4 Tiempo de pulso láser

Tabla 3.17. Determinación del tiempo de pulso a varias velocidades de corte, matriz epóxica.

Tiempo de pulso láser						
Velocidad de corte (mm/s)	Longitud de corte (mm)	Tiempo total de corte (s)	Diámetro haz láser (mm)	Pulsos	Tiempo de pulso (s)	Tiempo de pulso (ms)
10	120	12	0,2	600	0,02	20
12	120	10	0,2	600	0,017	17
14	120	8,571	0,2	600	0,014	14

Fuente: Autor

3.1.2.2.5 Cálculo de la temperatura superficial

Tabla 3.18. Parámetros generales de corte por láser, matriz epóxica.

Parámetros de corte			
Factores	Símbolo	Valor	Unidades
Profundidad de corte	x	0	m
Temperatura inicial	T	23	$^{\circ}C$
Pi	π	3,141592654	-
Diámetro del haz láser	\varnothing_h	0,2	mm
Radio de exposición	r_e	2	mm
Área de exposición	A	1,26E-05	m^2
Distancia de corte rectangular	d_r	120	mm

Fuente: Autor

Tabla 3.19. Propiedades del compuesto de matriz epóxica.

Datos del material compuesto					
Propiedades	Símbolo	Resina epóxica	Cascarilla de arroz	Material compuesto	Unidades
Densidad	ρ	1270	750	1507,81	Kg/m^3
Conductividad térmica	K	0,18	0,036	0,18	$W/m^{\circ}C$
Calor específico	C_p	1350	962,32	1490	$J/m^{\circ}C$

Fuente: Autor

Tabla 3.20. Cálculo analítico de las temperaturas superficiales generadas en el proceso de corte por láser de CO₂ del compuesto de matriz epóxica.

Temperatura superficial								
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Tiempo total de corte (s)	Tiempo de pulso (s)	Energía transferida (J)	Pulso de energía (J/m ²)	Difusividad térmica (m ² /s)	Temperatura superficial (°C)
	P	v_c	$t_c = \frac{d_r}{v_c}$	t_p	$e = P * t_p$	$e_s = \frac{e}{A}$	$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p}$	$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k * \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}}$
1 LEA	60	10	12	0,02	1,2	95492,966	8,01E-08	622,072
2 LEA	100	10	12	0,02	2	159154,943	8,01E-08	1021,453
3 LEA	60	14	8,571	0,014	0,84	66845,076	8,01E-08	524,219
4 LEA	100	14	8,571	0,014	1,4	111408,46	8,01E-08	858,365
5 LEA	60	12	10	0,017	1,02	81169,021	8,01E-08	575,317
6 LEA	100	12	10	0,017	1,7	135281,702	8,01E-08	943,528
7 LEA	80	10	12	0,02	1,6	127323,954	8,01E-08	821,762
8 LEA	80	14	8,571	0,014	1,12	89126,768	8,01E-08	691,292
9 LEA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	8,01E-08	759,422
10 LEA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	8,01E-08	759,422
11 LEA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	8,01E-08	759,422
12 LEA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	8,01E-08	759,422
13 LEA	80	12	10	0,017	1,36	108225,361	8,01E-08	759,422

Fuente: Autor

3.1.2.2.6 Tabulación y selección de temperaturas superficiales

Tabla 3.21. Comparación de Temperaturas determinadas analíticamente y medidas con el pirómetro en el compuesto de matriz epóxica.

Compuesto de matriz epóxica			
Temperaturas superficiales (°C)			
Código	Cálculo analítico	Pirómetro	
		Réplica 1	Réplica 2
1 LEA	622,072	634,6	653,07
2 LEA	1021,453	970,33	945,9
3 LEA	524,219	601,7	568,3
4 LEA	858,365	835,23	816,17
5 LEA	575,317	551,73	597,53
6 LEA	943,528	926,6	900,73
7 LEA	821,762	863,3	832,23
8 LEA	691,292	716,8	705,17
9 LEA	759,422	743,9	719,33
10 LEA	759,422	726,6	754,73
11 LEA	759,422	781,8	768
12 LEA	759,422	764,7	778,8
13 LEA	759,422	735,47	776,7

Fuente: Autor

Como la variabilidad de los datos no es muy grande en cuanto a las temperaturas superficiales determinadas de manera analítica con las tomadas con el pirómetro, esta última se considera para el cálculo de la distribución de las temperaturas a varias profundidades del material compuesto de matriz epóxica.

3.1.2.2.7 Distribución de temperaturas a diferentes espesores

Tabla 3.22. Datos de entrada para la distribución de temperaturas internas mediante resistencias térmicas, compuesto de matriz epóxica.

Parámetros de entrada			
Factores	Símbolo	Valor	Unidades
Espesor del material	L	0,0032	m
Área superficial	A	0,0016	m^2
Conductividad térmica	k	0,18	$W/m\ ^\circ C$

Fuente: Autor

Tabla 3.23. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz epóxica, réplica 1.

Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Temperatura a diversos espesores (°C)			
			Ts,1 (superficie)	Ts,2 (x=3,2 mm)	T interna (x=1 mm)	T interna (x=2 mm)
			$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \exp\left(-\frac{x_1}{4at}\right)$	$T_{s,2} = T_{s,1} - \frac{P * L}{k * A}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$
14 LEA	60	10	634,6	23,49	443,63	252,66
15 LEA	100	10	970,33	23,66	674,5	378,66
16 LEA	60	14	601,7	23,92	421,14	240,59
17 LEA	100	14	835,23	23,01	581,41	327,59
18 LEA	60	12	551,73	23,95	386,8	221,87
19 LEA	100	12	926,6	23,27	644,31	362,02
20 LEA	80	10	863,3	23,30	600,8	338,3
21 LEA	80	14	716,8	23,47	500,13	283,47
22 LEA	80	12	743,9	23,90	518,9	293,9
23 LEA	80	12	726,6	23,27	506,81	287,02
24 LEA	80	12	781,8	22,91	544,65	307,49
25 LEA	80	12	764,7	23,59	533,1	301,51
26 LEA	80	12	735,47	23,25	512,9	290,33

Fuente: Autor

Tabla 3.24. Determinación de la distribución de temperaturas a varias profundidades en el compuesto de matriz epóxica, réplica 2.

Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Velocidad de corte (mm/s)	Temperatura a diversos espesores (°C)			
			Ts,1 (superficie)	Ts,2 (x=3,2 mm)	T interna (x=1 mm)	T interna (x=2 mm)
			$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \exp\left(-\frac{x_1}{4at}\right)$	$T_{s,2} = T_{s,1} - \frac{P * L}{k * A}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$	$T_x = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1}$
40 LEA	60	10	653,07	23,07	456,2	259,32
41 LEA	100	10	945,9	23,68	657,71	369,51
42 LEA	60	14	568,3	23,86	398,16	228,02
43 LEA	100	14	816,17	22,84	568,25	320,34
44 LEA	60	12	597,53	23,09	418,02	238,5
45 LEA	100	12	900,73	22,95	626,42	352,12
46 LEA	80	10	832,23	23,34	579,45	326,67
47 LEA	80	14	705,17	22,95	491,98	278,78
48 LEA	80	12	719,33	23,77	501,97	284,61
49 LEA	80	12	754,73	23,62	526,26	297,79
50 LEA	80	12	768	23,56	535,36	302,72
51 LEA	80	12	778,8	23,24	542,69	306,58
52 LEA	80	12	776,7	23,37	541,28	305,87

Fuente: Autor

Un porcentaje del flujo de calor generado en la superficie se transmite por el espesor del material compuesto de matriz epóxica, esto se determina en base a las temperaturas Ts,2 calculadas en la tabla 3.23 y 3.24.

Mediante la distribución de temperaturas calculadas por resistencias térmicas por conducción en las tablas 3.23 y 3.24 se determina que la distribución de temperatura desde la parte superficial hasta una profundidad de 3,2 mm disminuye progresivamente conforme va penetrando el material compuesto de matriz epóxica, es decir que el ancho del HAZ producida en la superficie también disminuye conforme la temperatura se reduce al ganar profundidad. Esto es debido a la conductividad térmica del material que es de $0,18 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, al no ser muy conductor provoca que el flujo de calor se retenga conforme va atravesando el material. En este caso el HAZ que ocasiona en el material se propaga hasta una profundidad de 0,6 mm en donde la temperatura es superior a los 750°C , de ahí para adelante el material no es afectado por la temperatura $T_{s,1}$.

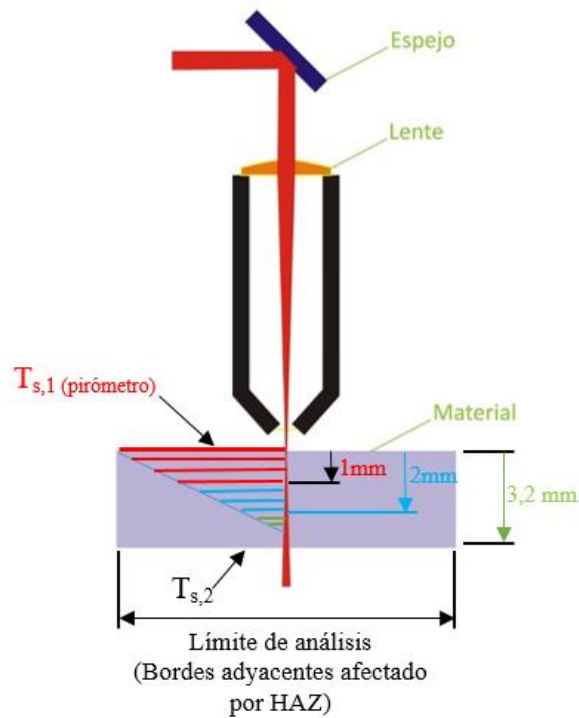




Figura 3.2. Diagrama de distribución de temperaturas en el material compuesto de matriz epóxica.

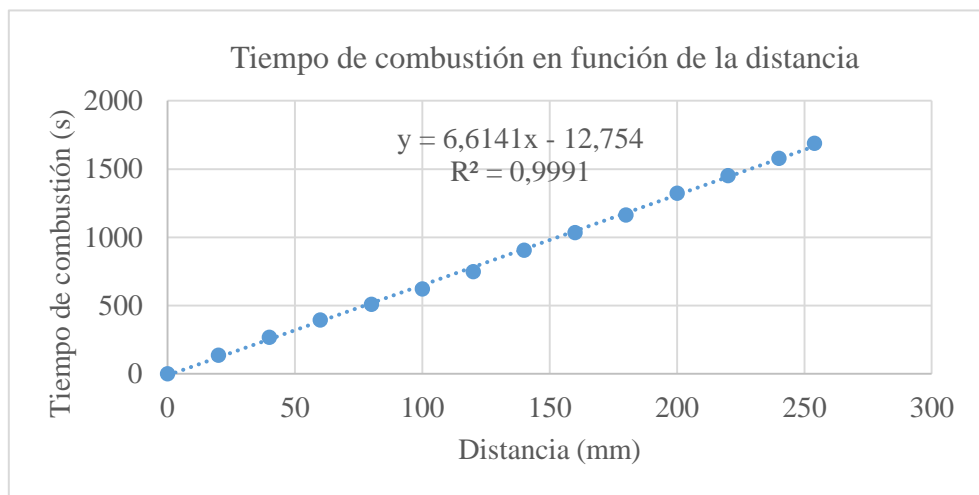
Fuente: Autor

Mediante la figura 3,2 y los cálculos $T_{s,2}$ tanto de la tabla 3.23 y 3.24 se observa que el flujo de calor no atraviesa por completo el espesor del material compuesto, esto es debido a que el material es más resistente al calor (2,2 veces menor conductor que el material compuesto de matriz poliéster).

3.1.3 Datos y resultados del ensayo de inflamabilidad

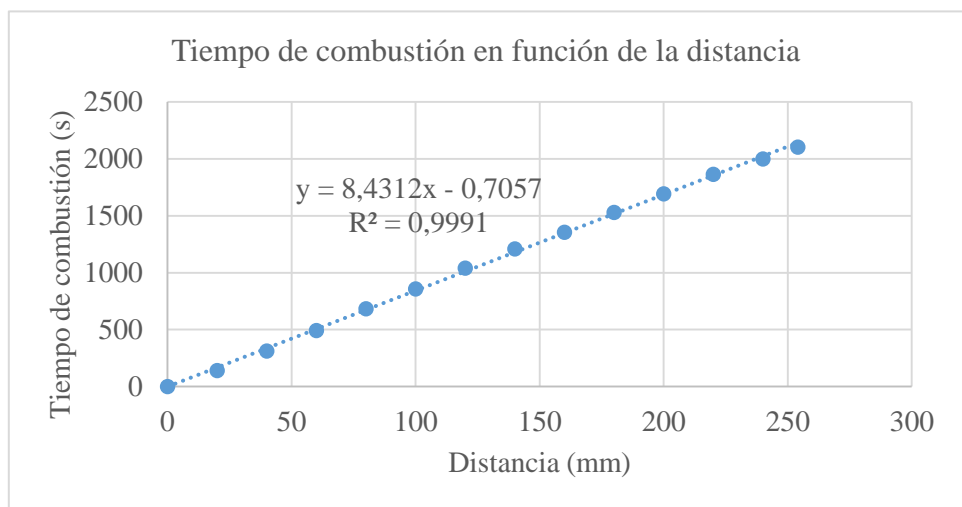
3.1.3.1 Ficha de reporte de los ensayos de inflamabilidad del Banco de pruebas UTA del compuesto de matriz poliéster

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA INGENIERÍA MECÁNICA 			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
DATOS INFORMATIVOS:			
Fecha:	14/12/2018	Ciudad:	Ambato
Lugar:	UTA-Laboratorio de Ingeniería Mecánica		Campus Huachi
Máquina:	Banco de pruebas UTA		
Realizado por:	Carlos Tonato	Revisado por:	Ing. Christian Pérez Mg.
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Tipo de ensayo:	Inflamabilidad	Norma:	ISO 3795
Tipo de material:	Compuesto de matriz poliéster reforzada con cascarilla de arroz		
Dimensiones (mm):	356x70x4,5	N° Probetas:	5
RESULTADOS			
1 IPA			
Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)	
0	0	0	
20	135	8,89	
40	267	8,99	
60	392,4	9,17	
80	507,6	9,46	
100	621,6	9,65	
120	748,8	9,62	
140	906	9,27	
160	1035	9,28	
180	1164	9,28	
200	1323,6	9,07	
220	1452	9,09	
240	1578	9,13	
254	1688,4	9,03	

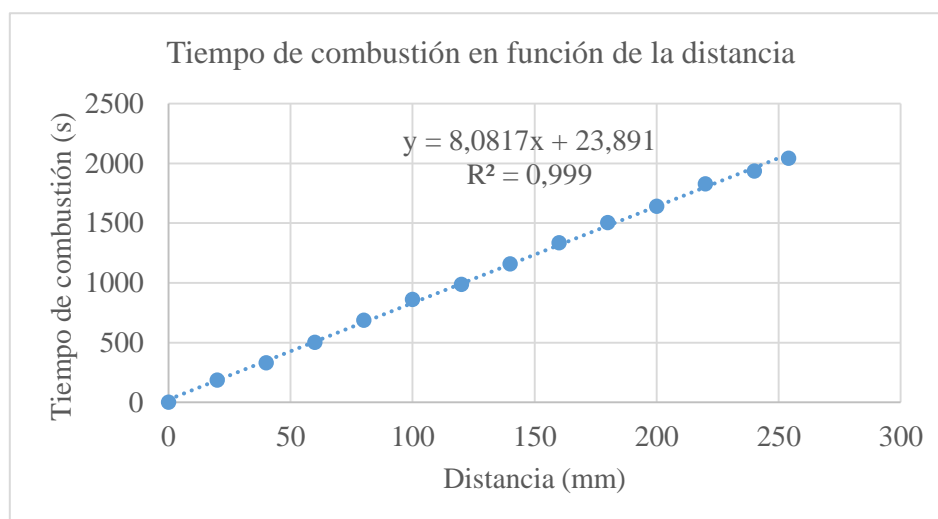


2 IPA

Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	140,4	8,55
40	313,2	7,66
60	493,8	7,29
80	682,8	7,03
100	859,2	6,98
120	1039,8	6,92
140	1209	6,95
160	1355,4	7,08
180	1530,6	7,06
200	1693,2	7,09
220	1864,2	7,08
240	1999,8	7,20
254	2103	7,25

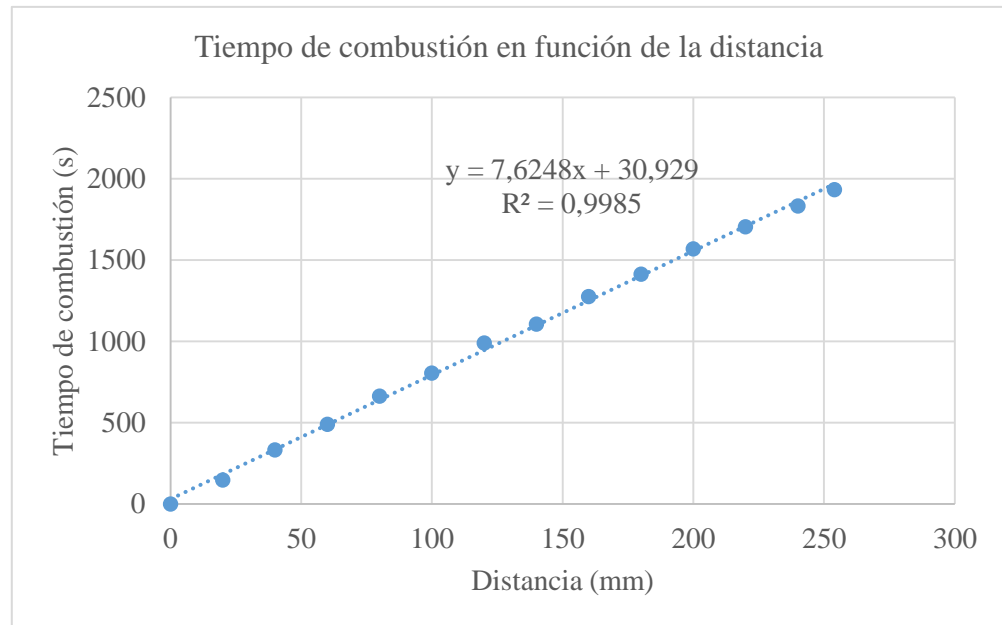


3 IPA		
Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	186,6	6,43
40	331,2	7,25
60	501	7,19
80	685,8	7,00
100	861,6	6,96
120	987	7,29
140	1159,2	7,25
160	1335	7,19
180	1503,6	7,18
200	1639,2	7,32
220	1828,2	7,22
240	1933,8	7,45
254	2042,4	7,46

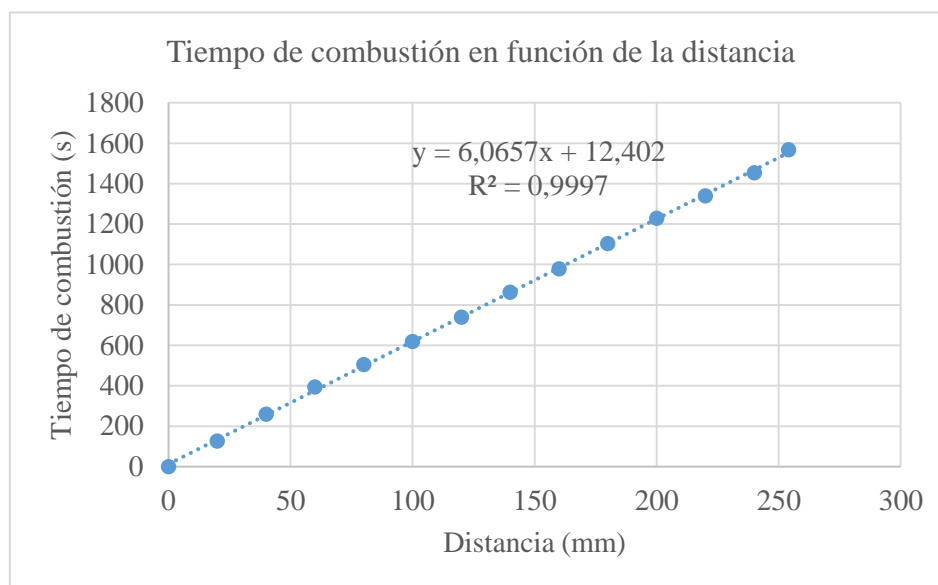


4 IPA		
Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	149,4	8,03
40	334,2	7,18
60	491,4	7,33
80	664,2	7,23
100	804,6	7,46
120	989,4	7,28
140	1106,4	7,59
160	1275	7,53

180	1413	7,64
200	1567,8	7,65
220	1704,6	7,74
240	1832,4	7,86
254	1932	7,89



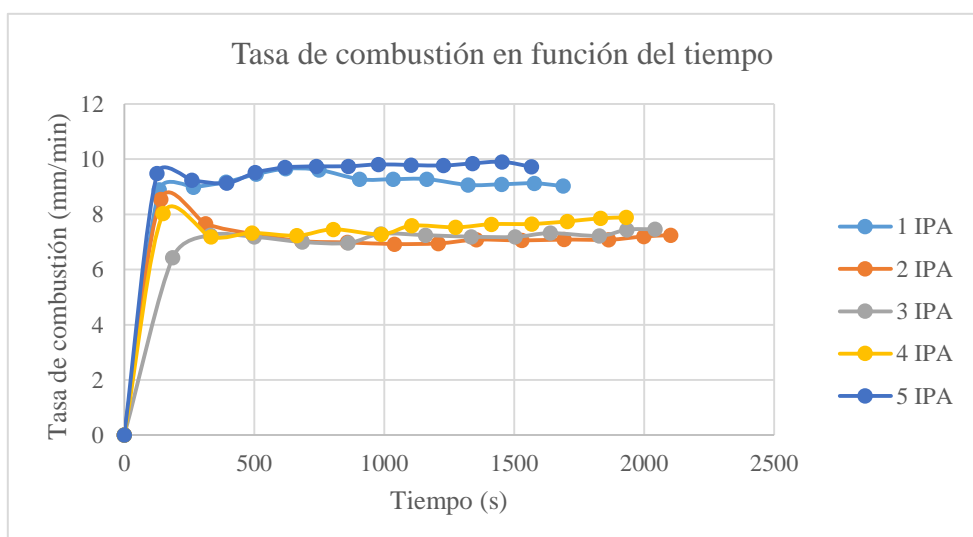
5 IPA		
Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	126,6	9,48
40	259,8	9,24
60	394,2	9,13
80	504,6	9,51
100	618,6	9,70
120	739,2	9,74
140	862,2	9,74
160	978,6	9,81
180	1103,4	9,79
200	1228,2	9,77
220	1340,4	9,85
240	1453,8	9,91
254	1567,2	9,72



Resultado general según la Norma ISO 3795

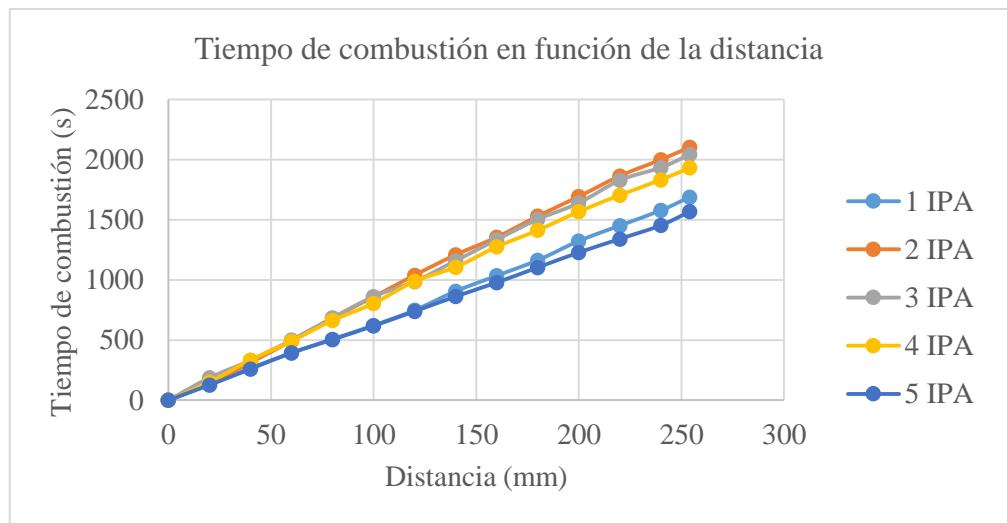
N° Probeta	Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
1 IPA	254	1688,4	9,03
2 IPA	254	2103	7,25
3 IPA	254	2042,4	7,46
4 IPA	254	1932	7,89
5 IPA	254	1567,2	9,72
Total			41,35
Promedio			8,27

GRÁFICAS DEL ENSAYO



La gráfica anterior presenta una comparación de las tasas de combustión de las probetas de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz, en donde se puede apreciar que la


mayor tasa de combustión se genera en la probeta 5IPA (9,72 mm/min) en un tiempo corto de 1567,2 s (26,12 min). Mientras que la tasa de combustión más baja se genera en la probeta 2IPA (7,25 mm/min) con un tiempo de 2103 s (35,05 min), siendo este el tiempo de combustión más largo de las probetas ensayadas del grupo de muestras de matriz poliéster. También se observa que en cada una de las curvas de las probetas ensayadas se presenta un efecto de estabilidad de la tasa de combustión, lo que quiere decir que la propagación de la llama tiende a permanecer cuasi-estable (cubre la misma área superficial) conforme se desplaza por la probeta.

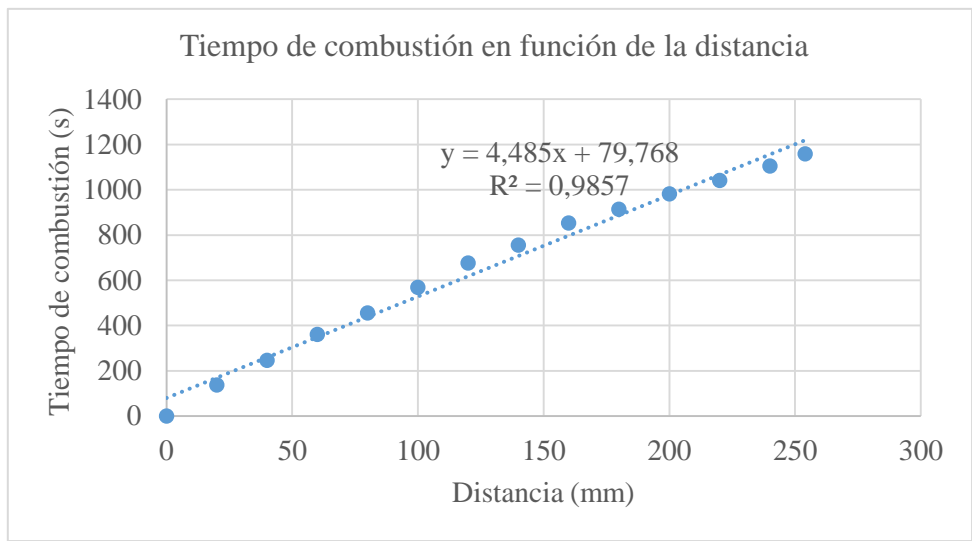


La gráfica anterior representa una comparación del tiempo de combustión de las probetas de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz, en donde se puede apreciar que la probeta que más tiempo requiere para consumirse por completo por medio de la llama es la probeta 2IPA, en un tiempo de 2103 s (35,05 min). Mientras que el tiempo de combustión más rápida se produce en la probeta 5IPA con un tiempo de 1567,2 s (26,12 min). La causa que provoca que una probeta sea consumida por el fuego de manera rápida o lenta depende mucho de la cantidad de cascarilla de arroz que se encuentre concentrado o acumulado en una unidad de volumen, esto quiere decir que en la elaboración de las probetas se generó ciertos espacios con mayor cantidad de refuerzo y en otros espacios con menor cantidad de refuerzo, debido a que la cascarilla de arroz es un refuerzo de fibra dispersa el cual no se puede controlar su cantidad y dirección.

Anexo I: Informe técnico de los ensayos de inflamabilidad de las probetas de matriz poliéster, otorgado por la Centro de Transferencia y Tecnología (CTT).

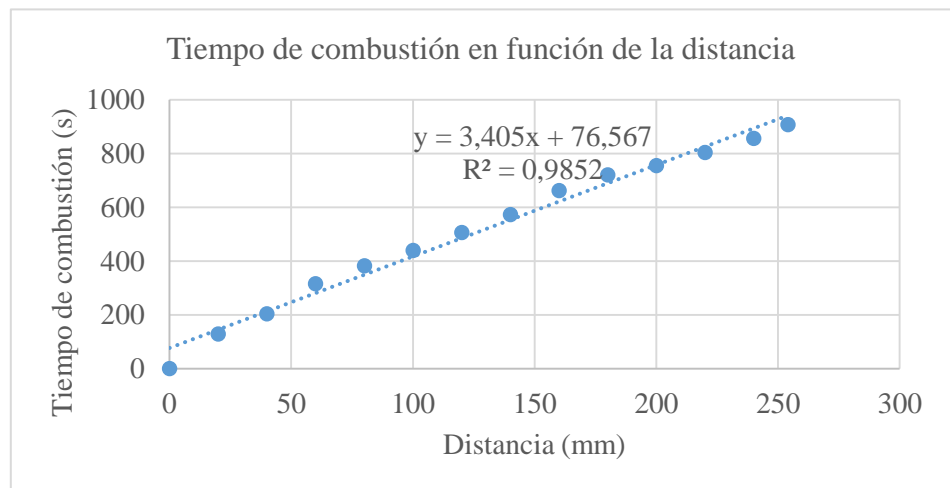
3.1.3.2 Ficha de reporte de los ensayos de inflamabilidad del Banco de pruebas UTA del compuesto de matriz epóxica

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA INGENIERÍA MECÁNICA 			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
DATOS INFORMATIVOS:			
Fecha:	17/12/2018	Ciudad:	Ambato
Lugar:	UTA-Laboratorio de Ingeniería Mecánica		Campus Huachi
Máquina:	Banco de pruebas UTA		
Realizado por:	Carlos Tonato	Revisado por:	Ing. Christian Pérez Mg.
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Tipo de ensayo:	Inflamabilidad	Norma:	ISO 3795
Tipo de material:	Compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz		
Dimensiones (mm):	356x70x4,5	Nº Probetas:	5
RESULTADOS			
1 IEA			
Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)	
0	0	0	
20	136,8	8,77	
40	246,6	9,73	
60	360,6	9,98	
80	455,4	10,54	
100	568,2	10,56	
120	676,8	10,64	
140	755,4	11,12	
160	852,6	11,26	
180	914,4	11,81	
200	982,2	12,22	
220	1041	12,68	
240	1104,6	13,04	
254	1158	13,16	

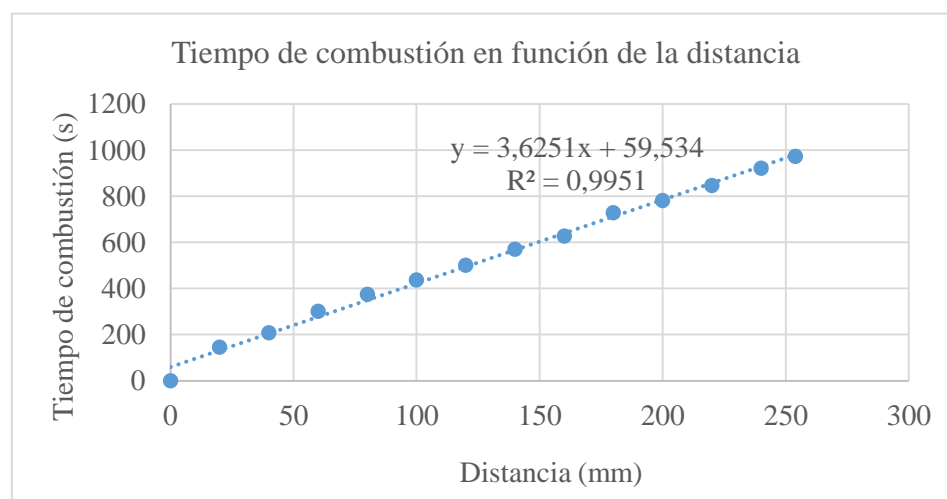


2 IEA

Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	128,4	9,35
40	202,8	11,83
60	315	11,43
80	382,2	12,56
100	438,6	13,68
120	505,8	14,23
140	572,4	14,68
160	662,4	14,49
180	720,6	14,99
200	754,8	15,90
220	803,4	16,43
240	855,6	16,83
254	906,6	16,81

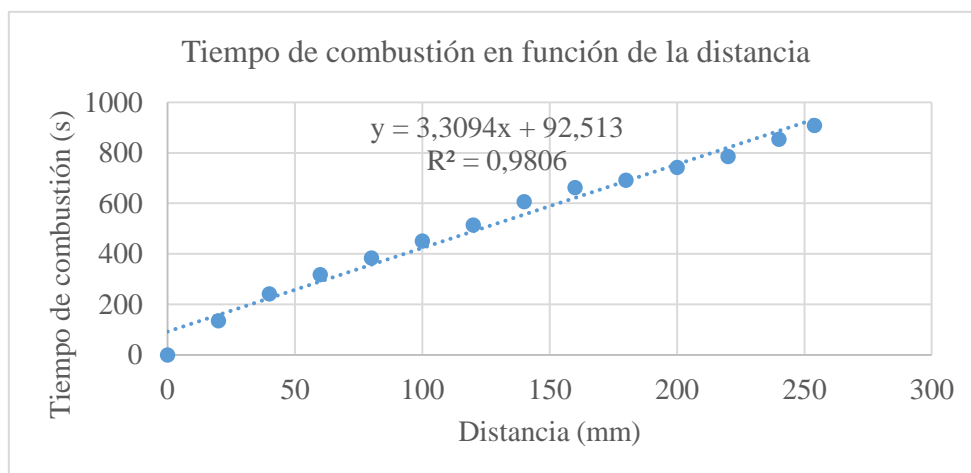


3 IEA		
Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	144,6	8,30
40	207	11,59
60	301,2	11,95
80	373,8	12,84
100	436,8	13,74
120	501	14,37
140	570	14,74
160	626,4	15,33
180	727,8	14,84
200	781,2	15,36
220	846,6	15,59
240	921	15,64
254	972	15,68



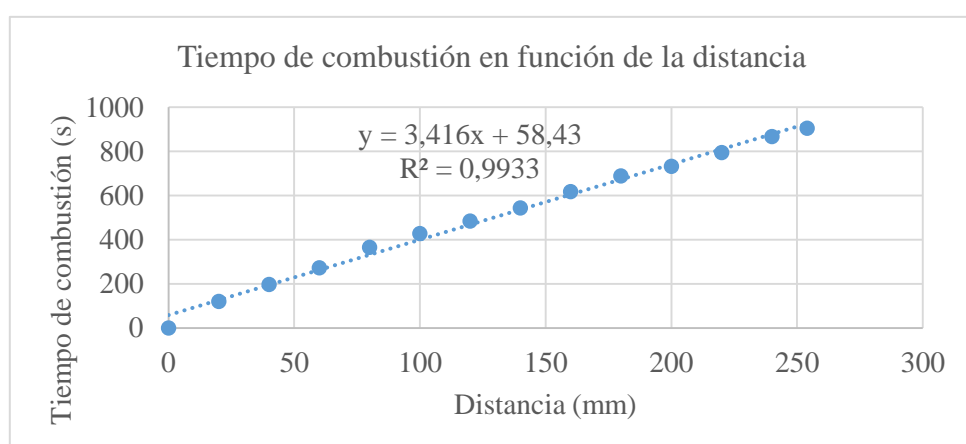
4 IEA		
Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	136,2	8,81
40	241,8	9,93
60	318,6	11,30
80	384	12,50
100	450,6	13,32
120	514,8	13,99
140	606,6	13,85
160	662,4	14,49
180	692,4	15,60
200	742,2	16,17

220	786	16,79
240	853,8	16,87
254	909	16,77



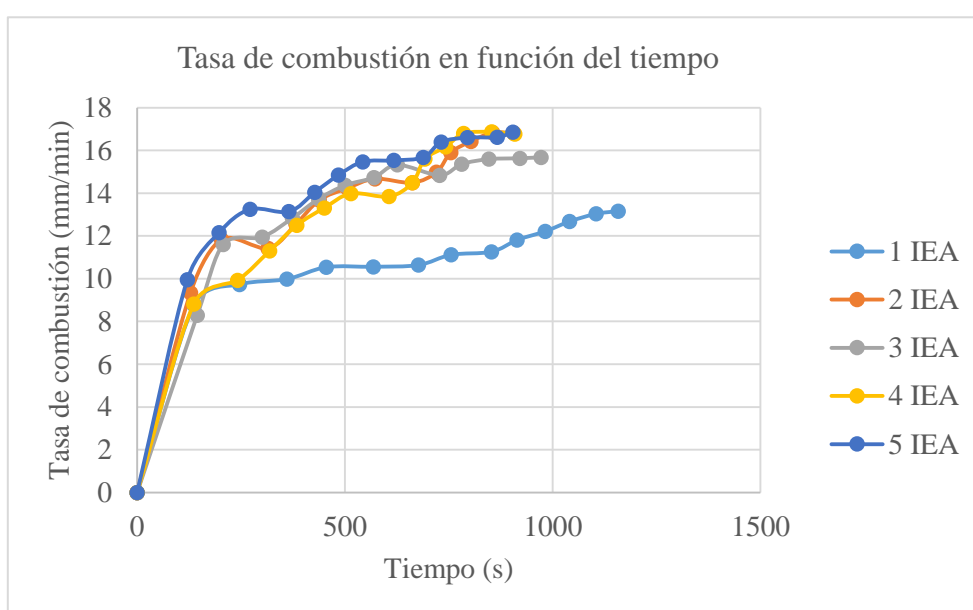
5 IEA

Distancia (mm)	Tiempo(s)	B(mm/min)
0	0	0
20	120,6	9,95
40	197,4	12,16
60	271,8	13,25
80	365,4	13,14
100	427,2	14,04
120	484,8	14,85
140	543	15,47
160	618	15,53
180	688,8	15,68
200	732	16,39
220	795	16,60
240	866,4	16,62
254	904,2	16,85

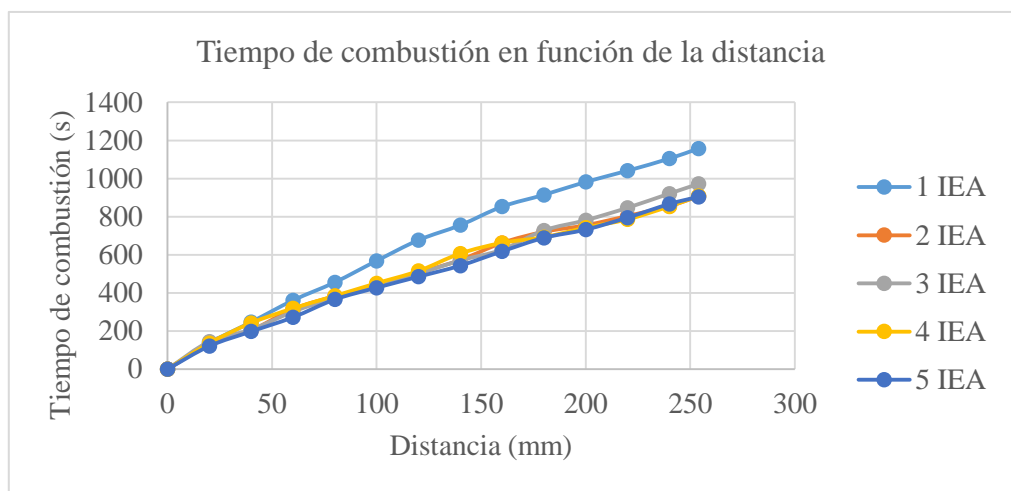


Resultado general según la Norma ISO 3795			
N° Probeta	Distancia (mm)	Tiempo (s)	B (mm/min)
1 IEA	254	1158	13,16
2 IEA	254	906,6	16,81
3 IEA	254	972	15,68
4 IEA	254	909	16,77
5 IEA	254	904,2	16,85
Total			79,27
Promedio			15,85

GRÁFICAS DEL ENSAYO



La gráfica anterior presenta una comparación de las tasas de combustión de las probetas de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz, en donde se puede apreciar que la mayor tasa de combustión se genera en la probeta 5IEA (16,85 mm/min) en un tiempo corto de 904,2 s (15,07 min). Mientras que la tasa de combustión más baja se genera en la probeta 1IEA (13,16 mm/min) con un tiempo de 1158 s (19,3 min), siendo este el tiempo de combustión más alta de las probetas ensayadas del grupo de muestras de matriz epóxica. También se observa que en cada una de las curvas de las probetas ensayadas se presenta un efecto de elevación progresiva de la tasa de combustión, lo que quiere decir que la propagación de la llama tiende a incrementarse (cubre mayor área superficial) conforme se desplaza por la probeta.



La gráfica anterior representa una comparación del tiempo de combustión de las probetas de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz, en donde se puede apreciar que la probeta que más tiempo requiere para consumirse por completo por medio de la llama es la probeta 1 IEA, en un tiempo de 1158 s (19,3 min). Mientras que el tiempo de combustión más rápida se efectúa en la probeta 5IPA con un tiempo de 904,2 s (15,07 min).

Anexo J: Informe técnico de los ensayos de inflamabilidad de las probetas de matriz epóxica, otorgado por la Centro de Transferencia y Tecnología (CTT).

3.1.4 Pérdida de masa

- **Material compuesto de matriz poliéster**

Tabla 3.25. Pérdida de masa del compuesto de matriz poliéster.

N° Probeta	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia de masas (gr)	Pérdida de masa (%)
1 IPA	111,6	57,2	54,4	48,75
2 IPA	129,9	67	62,9	48,42
3 IPA	130,4	70,3	60,1	46,09
4 IPA	124,3	62,8	61,5	49,48
5 IPA	122,1	64,3	57,8	47,34

Fuente: Autor

- **Material compuesto de matriz epóxica**

Tabla 3.26. Pérdida de masa del compuesto de matriz epóxica.

N° Probeta	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia de masas (gr)	Pérdida de masa (%)
1 IEA	140	31,6	108,4	77,43
2 IEA	132	62,8	69,2	52,42
3 IEA	131,5	56,4	75,1	57,11
4 IEA	138,5	62,7	75,8	54,73
5 IEA	136,9	64,3	72,6	53,03

Fuente: Autor

Mediante las tablas 3.25 y 3.26 se determina que el material compuesto que pierde mayor cantidad de masa es el compuesto de matriz epóxica (>50% de su masa inicial).

3.2 Análisis de resultados

3.2.1 Análisis de la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz

Como se mencionó en apartados anteriores antes de aplicar el método de superficie de respuesta los datos de rugosidad (Ra) recopilados deben cumplir con tres supuestos: Prueba de normalidad (Kolmogorov Smirnov), la prueba de igualdad de varianzas (Levene) e independencia de residuos, este último por lo general se cumple al momento en que las corridas experimentales se ejecutan en orden aleatorio (al azar).

3.2.1.1 Prueba de normalidad

La prueba de Kolmogorov Smirnov es adecuada para muestras grandes (> 30 experimentos).

- **H₀:** Hipótesis nula
- **H₁:** Hipótesis alternativa

H₀: Los datos de rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz provienen de una distribución **normal**.

H₁: Los datos de rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz **no** provienen de una distribución **normal**.

- Índice de confiabilidad (I.C): 95%
- Nivel de significancia (α): 5%
- N° experimentos: 52

Establecido los parámetros anteriores en el software estadístico se obtiene el siguiente P-Valor de normalidad:

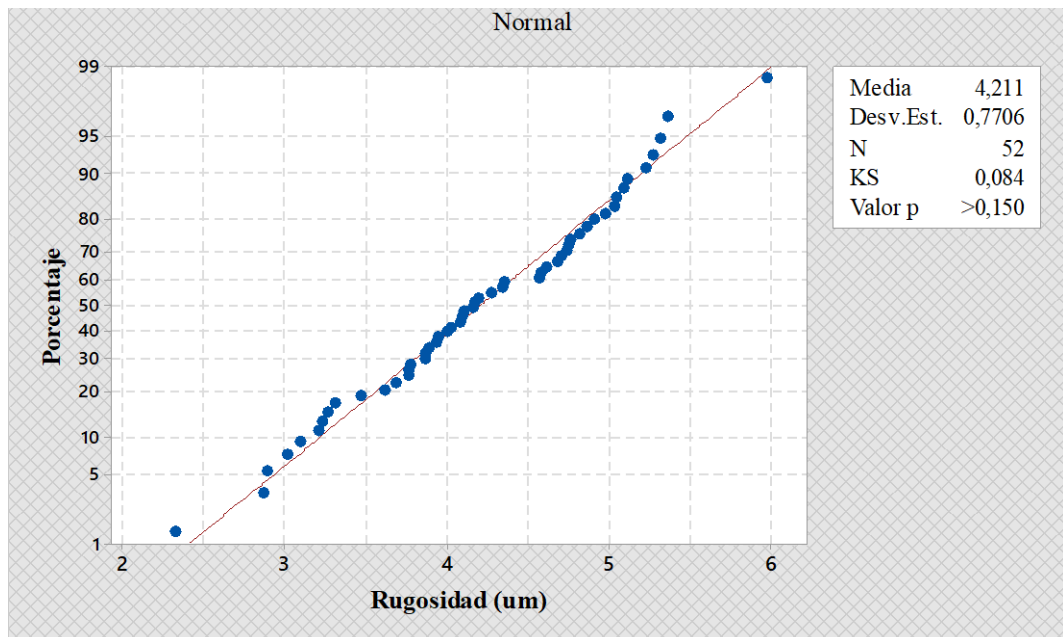


Figura 3.3. Verificación grafica de la normalidad de datos, rugosidad (Ra).

Fuente: Software Minitab 18.1

Criterios para determinar Normalidad:

P-valor $\geq \alpha$ Aceptar H₀ = Los datos provienen de una distribución **normal**.

P-valor $< \alpha$ Aceptar H₁ = Los datos **NO** provienen de una distribución **normal**.

Tabla 3.27. Verificación de normalidad, rugosidad.

Normalidad		
P- Valor = 0,15	>	$\alpha = 0,05$

Fuente: Autor

Conclusión:

Como el P-valor (0,15) es mayor al nivel de significancia del 5% se concluye que los datos de la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz provienen de una distribución **normal**.

3.2.1.2 Prueba de igualdad de varianzas

Mediante la prueba de Levene se corrobora la igualdad de varianzas entre los dos compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica.

- **H₀**: Hipótesis nula
- **H₁**: Hipótesis alternativa

H₀: Las **varianzas** del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz son **iguales**.

H₁: Existe **diferencia** significativa entre las **varianzas** del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz.

- Índice de confiabilidad (I.C): 95%
- Nivel de significancia (α): 5%
- N° experimentos: 52

Establecido los parámetros anteriores en el software estadístico se obtiene un P-Valor de Levene de 0,138.

Criterios para determinar igualdad de varianzas:

P-valor $\geq \alpha$ Aceptar H₀ = Las varianzas son iguales.

P-valor $< \alpha$ Aceptar H₁ = Existe diferencia significativa entre las varianzas.

Tabla 3.28. Verificación de igualdad de varianzas, rugosidad.

Igualdad de varianza		
P- Valor = 0,138	>	$\alpha = 0,05$

Fuente: Autor

Conclusión:

Como el P-valor (0,138) de la prueba de Levene es mayor al nivel de significancia de 0,05 se concluye que las **varianzas** del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz son **iguales**.

3.2.1.3 Análisis de varianza – términos de mayor y menor afectación

Mediante la tabla 3.29 y la figura 3.4 se analizan los términos que afectan y no afectan de manera significativa a la rugosidad de los materiales compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica.

Tabla 3.29. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan y no afectan significativamente al modelo, rugosidad (Ra).

Termino	Fuente	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
-	Modelo	8	20,5968	2,5746	11,43	0,000
-	Lineal	3	17,9057	5,9686	26,49	0,000
A	P	1	0,3020	0,3020	1,34	0,253
B	Vc	1	0,4837	0,4837	2,15	0,150
C	M	1	17,1201	17,1201	75,98	0,000
-	Cuadrado	2	1,4956	0,7478	3,32	0,046
AA	P ²	1	0,4375	1,0068	4,47	0,040
BB	Vc ²	1	1,0582	1,0582	4,70	0,036
	Interacción	3	1,1954	0,3985	1,77	0,167
AB	PxVc	1	0,0222	0,0222	0,10	0,755
AC	PxM	1	0,5655	0,5655	2,51	0,120
BC	Vc*M	1	0,6077	0,6077	2,70	0,108
-	Error	43	9,6887	0,2253		
-	Falta de ajuste	9	3,9491	0,4388	2,60	0,021
-	Error Puro	34	5,7396	0,1688		
-	Total	51	30,2855			

Fuente: Autor

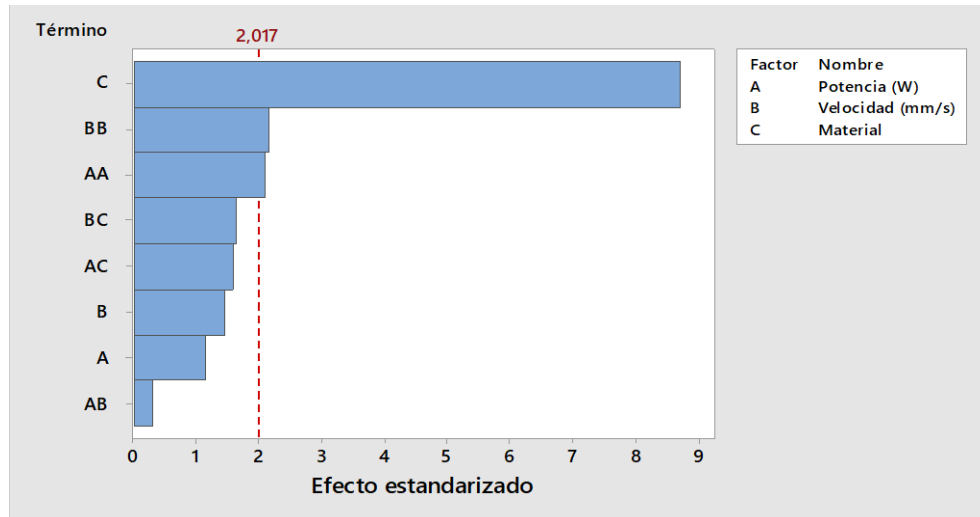


Figura 3.4. Pareto de efectos estandarizados, rugosidad (Ra).

Fuente: Software Minitab 18.1

Mediante el diagrama de Pareto se puede apreciar que los términos que más influyen a la variable respuesta (rugosidad) son el tipo de material (matriz poliéster y matriz epóxica), la potencia cuadrática y la velocidad cuadrática. Mientras que los términos que no tienen mayor influencia en la rugosidad son las interacciones de los factores (Potencia*Material, Velocidad*Material y Potencia*Velocidad), lo que quiere decir que el diseño de superficie de respuesta se puede optimizar aún más y se ajusta a un modelo cuadrático, lo que se consigue evitando incluir en el análisis los términos de menor influencia. Al no considerar en el análisis los términos no significativos se obtiene la siguiente tabla 3.30, con los términos de mayor influencia en la rugosidad, la misma que se representa de manera gráfica en el figura 3.5 y en la figura 3.6.

Tabla 3.30. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan significativamente al modelo, rugosidad (Ra).

Termino	Fuente	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
-	Modelo	5	19,4014	3,8803	16,40	0,000
-	Lineal	3	17,9057	5,9686	25,23	0,000
A	P	1	0,3020	0,3020	1,28	0,264
B	Vc	1	0,4837	0,4837	2,04	0,160
C	M	1	17,1201	17,1201	72,36	0,000
-	Cuadrado	2	1,4956	0,7478	3,16	0,052
A*A	P ²	1	0,4375	1,0068	4,26	0,045
B*B	Vc ²	1	1,0582	1,0582	4,47	0,040
-	Error	46	10,8841	0,2366		

-	Falta de ajuste	12	5,1445	0,4287	2,54	0,016
-	Error Puro	34	5,7396	0,1688		
-	Total	51	30,2855			

Fuente: Autor

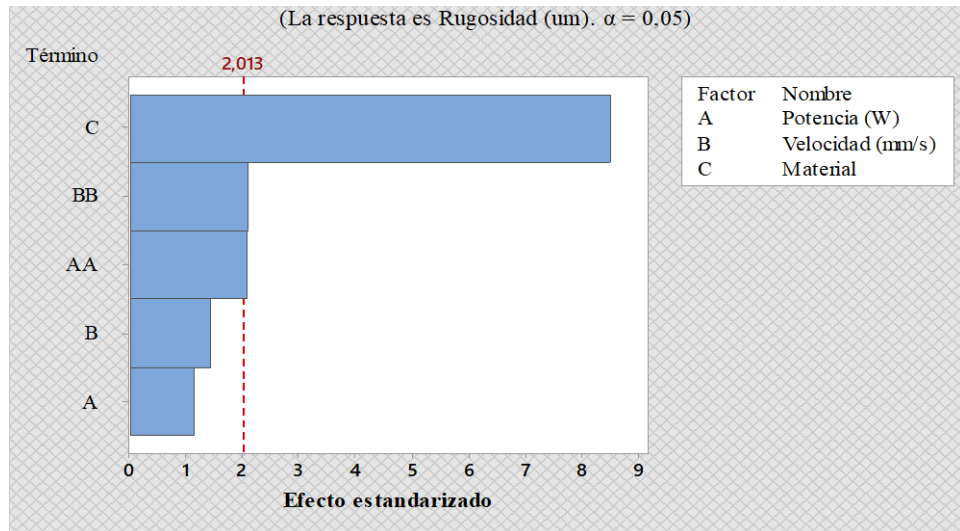


Figura 3.5. Pareto de efectos estandarizados de términos de mayor significancia, rugosidad (Ra).

Fuente: Software Minitab 18.1

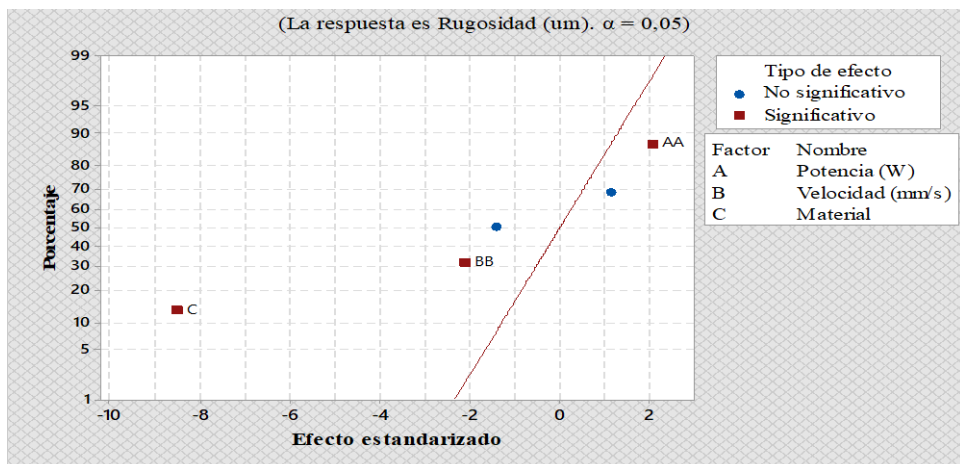


Figura 3.6. Efectos positivos y negativos de los términos de mayor significancia, rugosidad (Ra).

Fuente: Software Minitab 18.1

Mediante la gráfica normal de efectos estandarizados se determina que los términos cuadráticos de potencia (P^2), velocidad (Vc^2) y material presentan un efecto significativo, con la diferencia que el material y la velocidad tiene un efecto negativo y la potencia un efecto positivo.

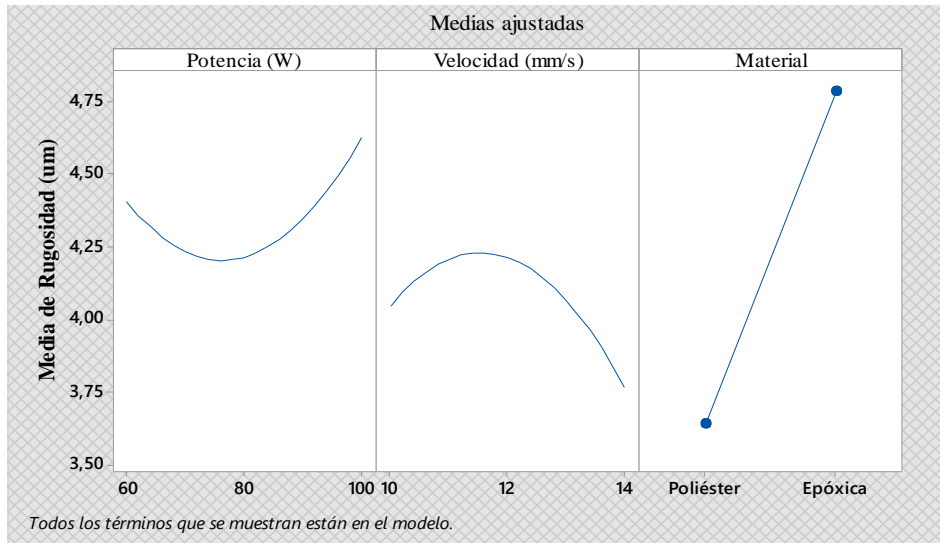


Figura 3.7. Grafica de efectos principales de la rugosidad (Ra) de los compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica
Fuente: Software Minitab 18.1

La figura 3.7 indica que la rugosidad (Ra) de los materiales compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz se ve afectada conforme la potencia y velocidad de corte incrementan. Sin embargo, la mayor rugosidad se presenta en el compuesto de matriz epóxica reforzada con cascarilla de arroz.

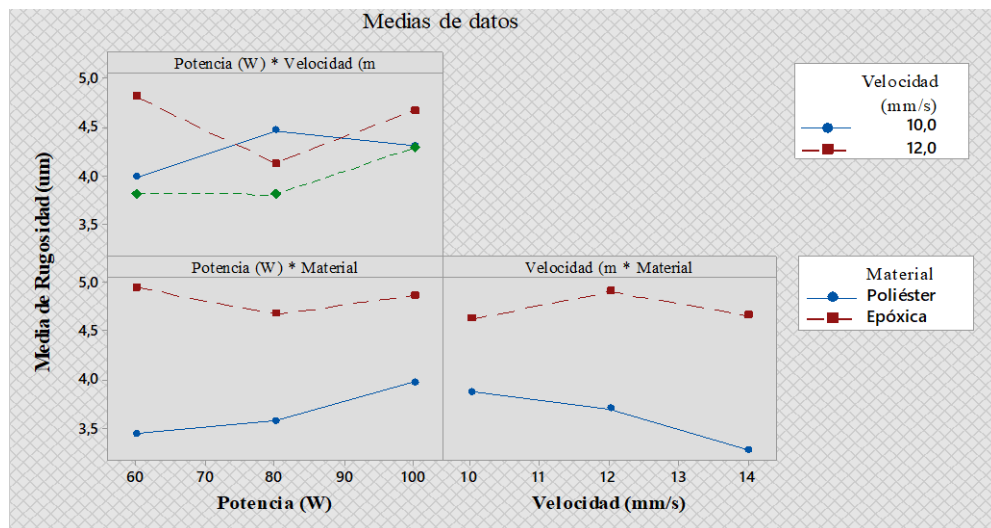


Figura 3.8. Grafica de interacción para la rugosidad (Ra).
Fuente: Software Minitab 18.1

La gráfica de interacción para la rugosidad superficial (Ra) para los materiales compuestos presenta las siguientes tendencias:

- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 80 W y una velocidad de corte de 14 mm/s se genera una rugosidad (Ra) media de 3,896 μm .
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 60 W y una velocidad de corte de 12 mm/s se genera una rugosidad (Ra) media de 4,611 μm .
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 60 W en el material compuesto de matriz poliéster se genera una rugosidad (Ra) media de 3,6305 μm .
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 100 W en el material compuesto de matriz epóxica se genera una rugosidad (Ra) media de 4,922 μm .
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una velocidad de 14 mm/s en el material compuesto de matriz poliéster se genera una rugosidad (Ra) media de 3,1725 μm .
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una velocidad de 12 mm/s en el material compuesto de matriz epóxica se genera una rugosidad (Ra) media de 4,798 μm .

3.2.1.4 Gráfica de superficie de respuesta

A partir de los datos experimentales de la rugosidad (Ra) de las superficies intervenidas con rayo láser de CO₂, tanto del material compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica se genera la siguiente superficie de respuesta que relaciona la rugosidad Ra (eje z) con los parámetros de entrada: Potencia (eje x) y Velocidad de corte (y).

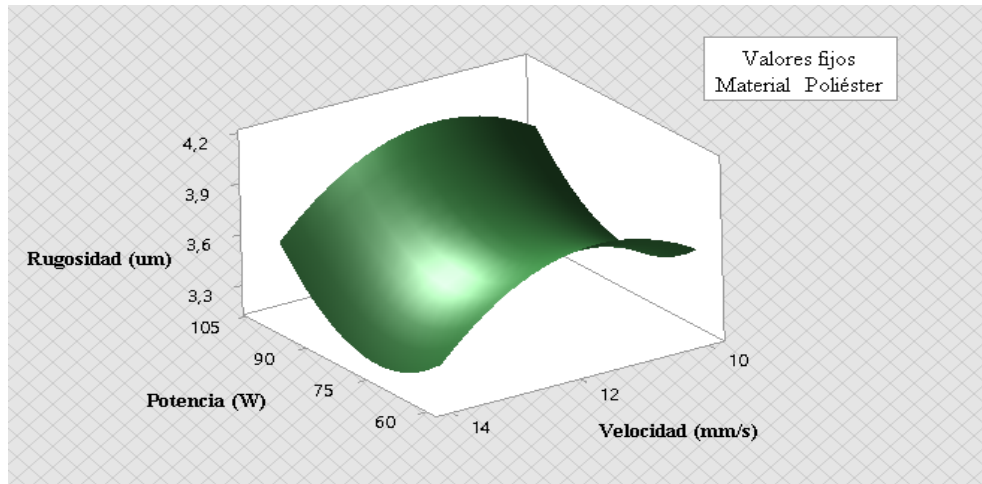


Figura 3.9. Superficie de respuesta de la rugosidad del compuesto de matriz poliéster.

Fuente: Software Minitab 18.1

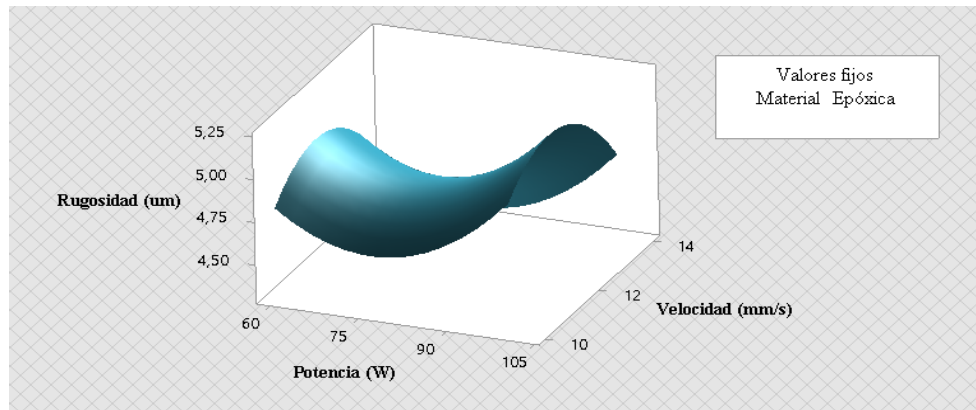


Figura 3.10. Superficie de respuesta de la rugosidad del compuesto de matriz epóxica.

Fuente: Software Minitab 18.1

- **Optimización de respuesta del compuesto de matriz poliéster**

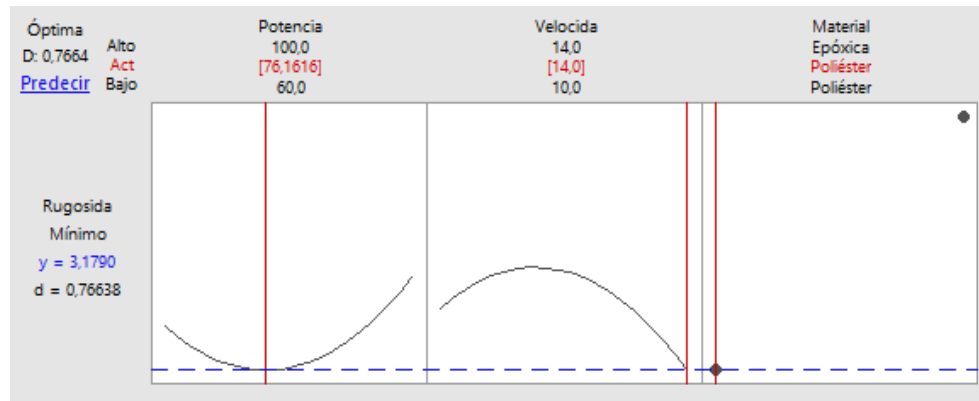


Figura 3.11. Gráfica 2D del punto óptimo de la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster.

Fuente: Software Minitab 18.1

La figura 3.11 ilustra los valores adecuados de operación para el proceso de corte láser de CO₂, con la cual se consigue la óptima rugosidad del material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz. Es decir que con una potencia de 76,16 W y de una velocidad de corte de 14 mm/s se logra una rugosidad superficial de 3,1790 μm , en base a los datos experimentales del material compuesto de matriz poliéster. Sin embargo, podemos decir que el 76,66% de la variación observada en la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz poliéster reforzada con cascarilla de arroz es explicada por el modelo.

- **Optimización de respuesta del compuesto de matriz epóxica**

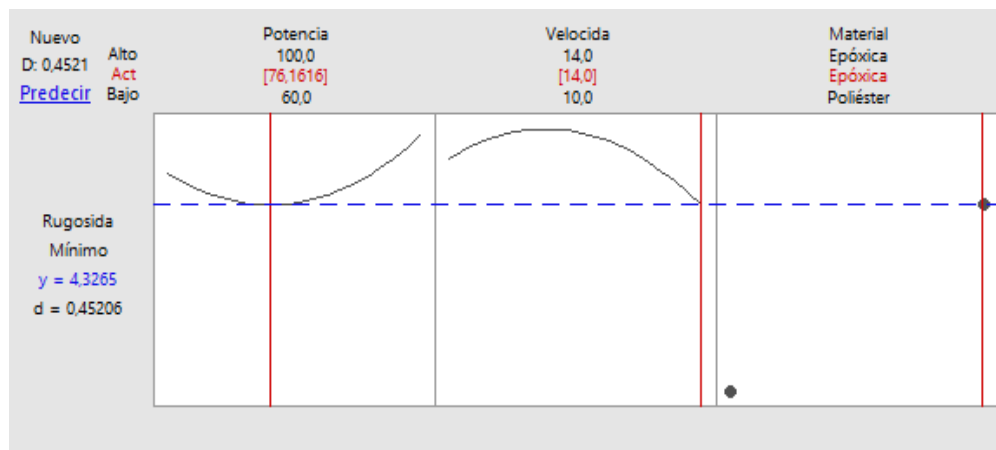


Figura 3.12. Gráfica 2D del punto óptimo de la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz epóxica.

Fuente: Software Minitab 18.1

La figura 3.12 ilustra los valores adecuados de operación para el proceso de corte láser de CO₂, con la cual se consigue la óptima rugosidad del material compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz. Es decir que con una potencia de 76,16 W y de una velocidad de corte de 14 mm/s se logra una rugosidad superficial cortada de 4,327 μm , en base a los datos experimentales ejecutados en el material compuesto de matriz epóxica. Sin embargo, es importante mencionar que el 45,21% de la variación observada en la rugosidad (Ra) del compuesto de matriz epóxica reforzada con cascarilla de arroz es explicada por el modelo.

3.2.2 Análisis de la temperatura (°C) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz

De igual manera que en el caso anterior, los datos de temperaturas superficiales (°C) recopilados también deben cumplir con la prueba de normalidad (Kolmogorov Smirnov), la prueba de igualdad de varianzas (Levene) e independencia de residuos, antes de aplicar el método de superficie de respuesta.

3.2.2.1 Prueba de normalidad

La prueba de Kolmogorov Smirnov es adecuada para muestras grandes (> 30 experimentos).

- **H₀**: Hipótesis nula
- **H₁**: Hipótesis alternativa

H₀: Los datos de temperaturas superficiales (°C) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz provienen de una distribución **normal**.

H₁: Los datos de temperaturas superficiales (°C) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz **no** provienen de una distribución **normal**.

- Índice de confiabilidad (I.C): 95%
- Nivel de significancia (α): 5%
- N° experimentos: 52

Establecido los parámetros anteriores en el software estadístico se obtiene el siguiente P-Valor:

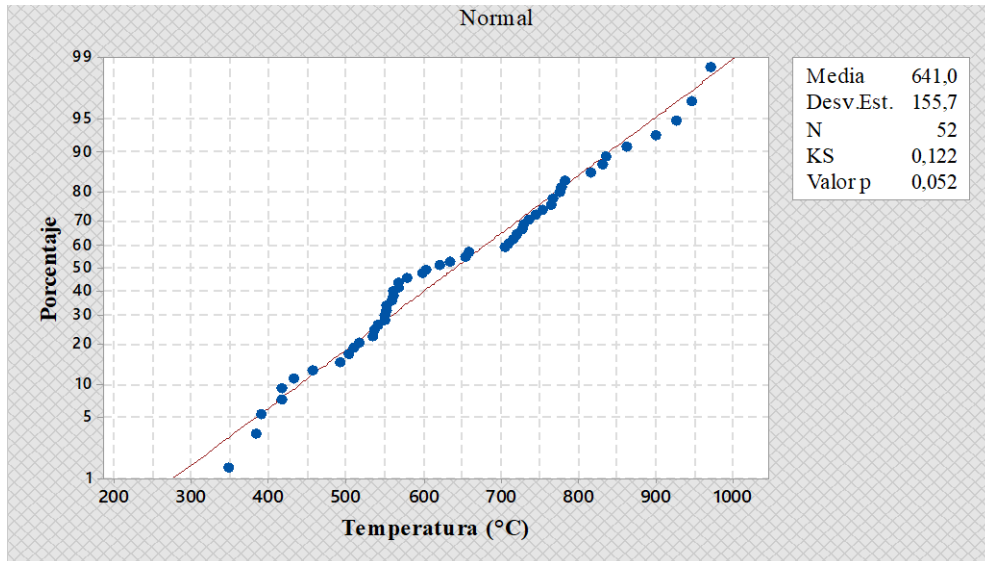


Figura 3.13. Verificación gráfica de la normalidad de datos, temperatura superficial.
Fuente: Software Minitab 18.1

Criterios para determinar Normalidad:

P-valor $\geq \alpha$ Aceptar H_0 = Los datos provienen de una distribución **normal**.

P-valor $< \alpha$ Aceptar H_1 = Los datos **NO** provienen de una distribución **normal**.

Tabla 3.31. Verificación de normalidad, temperatura superficial.

Normalidad		
P- Valor = 0,052	>	$\alpha = 0,05$

Fuente: Autor

Conclusión:

Como el P-valor (0,052) es mayor al nivel de significancia (0,05) se concluye que los datos de temperaturas superficiales (°C) del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz provienen de una distribución **normal**.

3.2.2.2 Prueba de igualdad de varianzas

Mediante la prueba de Levene se corrobora la igualdad de varianzas entre los dos compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica.

- **H₀:** Hipótesis nula
- **H₁:** Hipótesis alternativa

H₀: Las **varianzas** del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz son **iguales**.

H₁: Existe **diferencia** significativa entre las **varianzas** del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz.

- Índice de confiabilidad (I.C): 95%
- Nivel de significancia (α): 5%
- N° experimentos: 52

Establecido los parámetros anteriores en el software estadístico se obtiene el siguiente un P-Valor de 0,634.

Criterios para determinar Igualdad:

P-valor $\geq \alpha$ Aceptar H₀ = Las varianzas son iguales.

P-valor $< \alpha$ Aceptar H₁ = Existe diferencia significativa entre las varianzas.

Tabla 3.32. Verificación de igualdad de varianzas, temperatura superficial.

Igualdad de varianza		
P- Valor = 0,833	>	$\alpha = 0,05$

Fuente: Autor

Conclusión:

Como el P-valor (0,833) es mayor al nivel de significancia (0,05) se concluye que las **varianzas** del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz son **iguales**.

3.2.2.3 Análisis de varianza – términos de mayor y menor afectación

Mediante la tabla 3.33 y la figura 3.14 se analizan los términos que afectan y no afectan de manera significativa la Temperatura superficial de los materiales compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica.

Tabla 3.33. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan y no afectan significativamente al modelo, temperatura superficial.

Termino	Fuente	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
-	Modelo	8	1212600	151575	270,95	0,000
-	Lineal	3	1200248	400083	715,18	0,000
A	P	1	445246	445246	795,92	0,000
B	Vc	1	60658	60658	108,43	0,000
C	M	1	694345	694345	1241,20	0,000
-	Cuadrado	2	1420	710	1,27	0,291
AA	P ²	1	1419	1226	2,19	0,146
BB	Vc ²	1	0	0	0,00	0,984
	Interacción	3	10932	3644	6,51	0,001
AB	P*Vc	1	6538	6538	11,69	0,001
AC	P*M	1	3930	3930	7,03	0,011
BC	Vc*M	1	464	464	0,83	0,367
-	Error	43	24055	559		
-	Falta de ajuste	9	9157	1017	2,32	0,037
-	Error Puro	34	14897	438		
-	Total	51	1236655			

Fuente: Autor

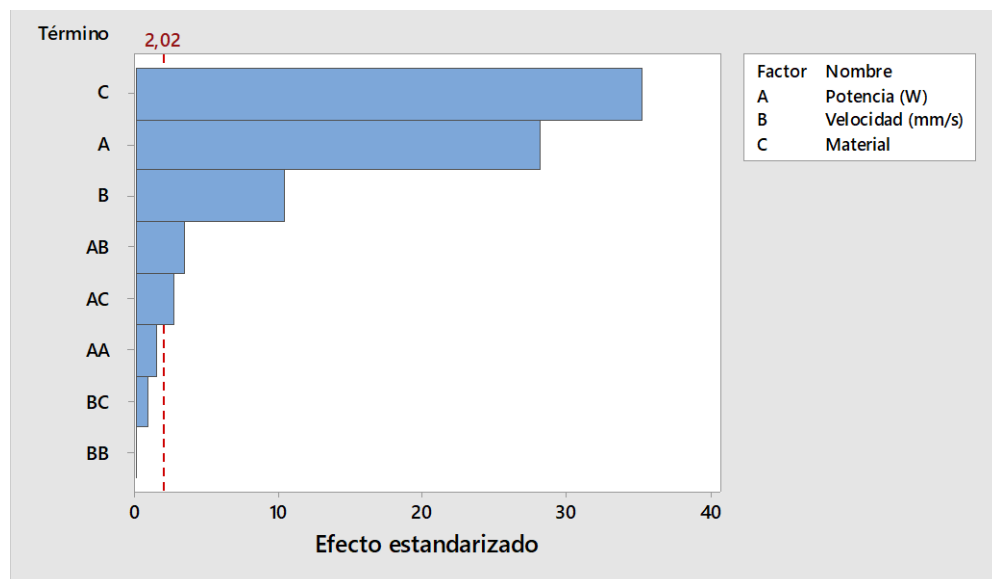


Figura 3.14. Pareto de efectos estandarizados, temperatura superficial (°C).

Fuente: Software Minitab 18.1

Mediante el diagrama de Pareto se puede apreciar que los términos que más influyen a la variable respuesta (Temperatura) son el tipo de material (matriz poliéster y matriz epóxica), la potencia, la velocidad de corte, la interacción de factores de Potencia*Velocidad y Potencia*Material. Mientras que los términos

que no tienen mayor influencia en la Temperatura superficial son los términos cuadráticos y la interacción de factores Velocidad*Material, lo que quiere decir que el diseño de superficie de respuesta se optimiza aún más y se ajusta a un modelo lineal, lo que se logra evitando incluir en el análisis los términos de menor influencia.

Al no considerar en el análisis los términos no significativos se obtiene la siguiente tabla 3.34 con los términos de mayor influencia en la Temperatura superficial, la misma que se representa de manera gráfica en el figura 3.15 y en la figura 3.16.

Tabla 3.34. Análisis de varianzas por ANOVA de los términos que afectan significativamente al modelo, temperatura superficial.

Termino	Fuente	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
-	Modelo	5	1210716	242143	429,42	0,000
-	Lineal	3	1200248	400083	709,51	0,000
A	P	1	445246	445246	789,60	0,000
B	Vc	1	60658	60658	107,57	0,000
C	M	1	694345	694345	1231,36	0,000
	Interacción	2	10468	5234	9,28	0,000
AB	P*Vc	1	6538	6538	11,59	0,001
AC	P*M	1	3930	3930	6,97	0,011
-	Error	46	25939	564		
-	Falta de ajuste	12	11041	920	2,10	0,045
-	Error Puro	34	14897	438		
-	Total	51	1236655			

Fuente: Autor

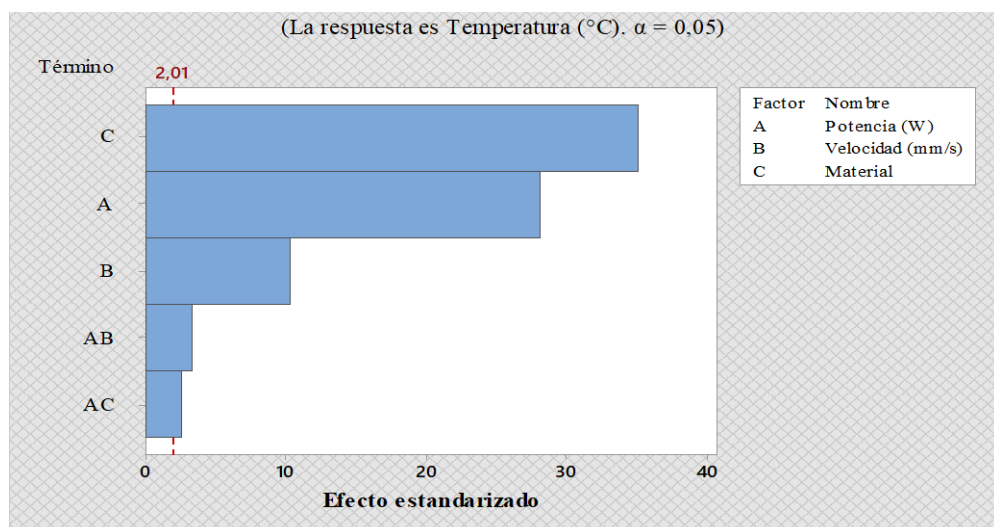


Figura 3.15. Pareto de efectos estandarizados de términos de mayor significancia, temperatura superficial.

Fuente: Software Minitab 18.

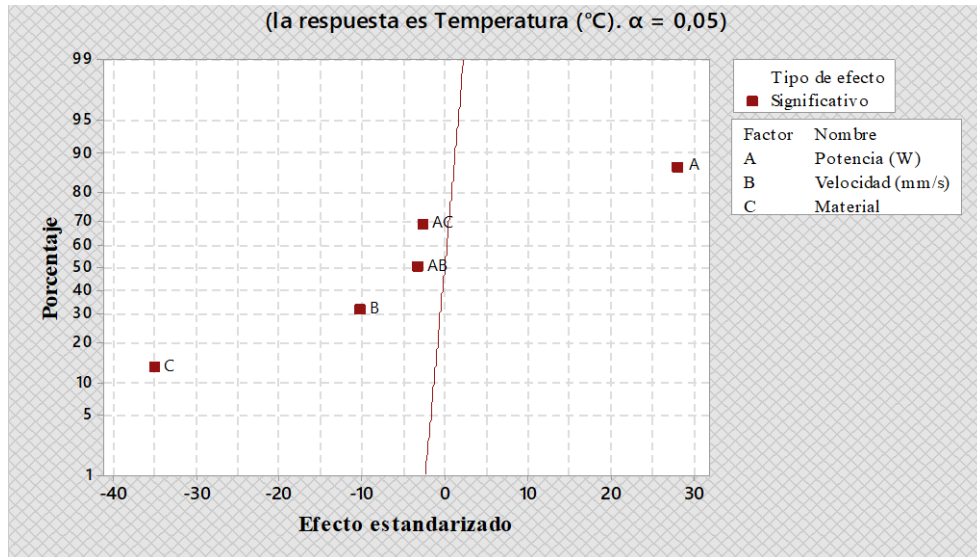


Figura 3.16. Efectos positivos y negativos de los términos de mayor significancia, temperatura superficial.
Fuente: Software Minitab 18.1

Mediante la gráfica normal de efectos estandarizados se indica que los términos de potencia (P), velocidad de corte (Vc), material y los factores de interacción Potencia*Velocidad y Potencia*Material presentan un efecto significativo en la Temperatura superficial, con la diferencia que la potencia tiene un efecto positivo y todos los demás términos un efecto negativo.

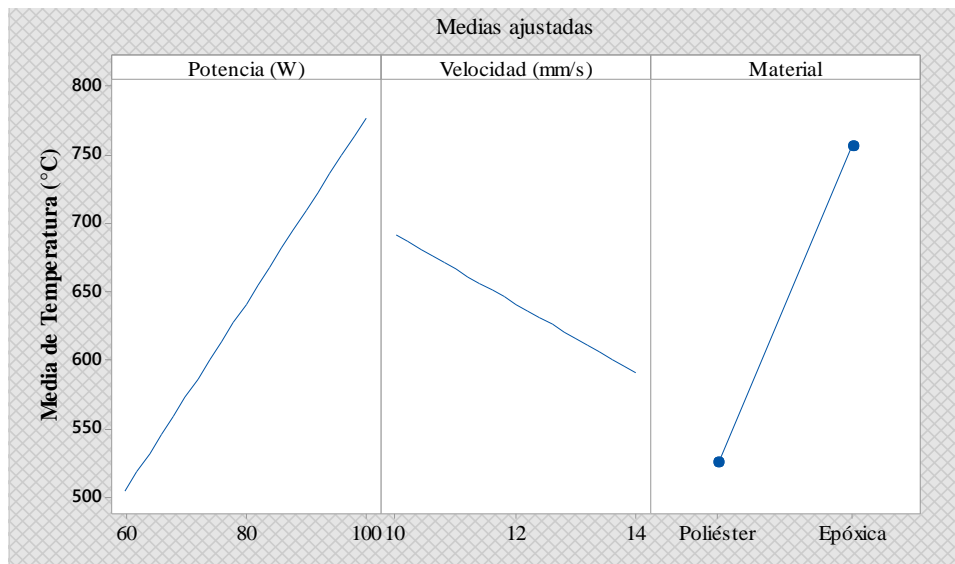


Figura 3.17. Gráfica de efectos principales de la temperatura superficial de los compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica.
Fuente: Software Minitab 18.1

La figura 3.17 indica que la Temperatura superficial de los materiales compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz se ve

afectada conforme la potencia (la temperatura se eleva) y velocidad de corte (la temperatura disminuye) se incrementan. Sin embargo, la mayor Temperatura superficial se presenta en el compuesto de matriz epóxica reforzada con cascarilla de arroz.

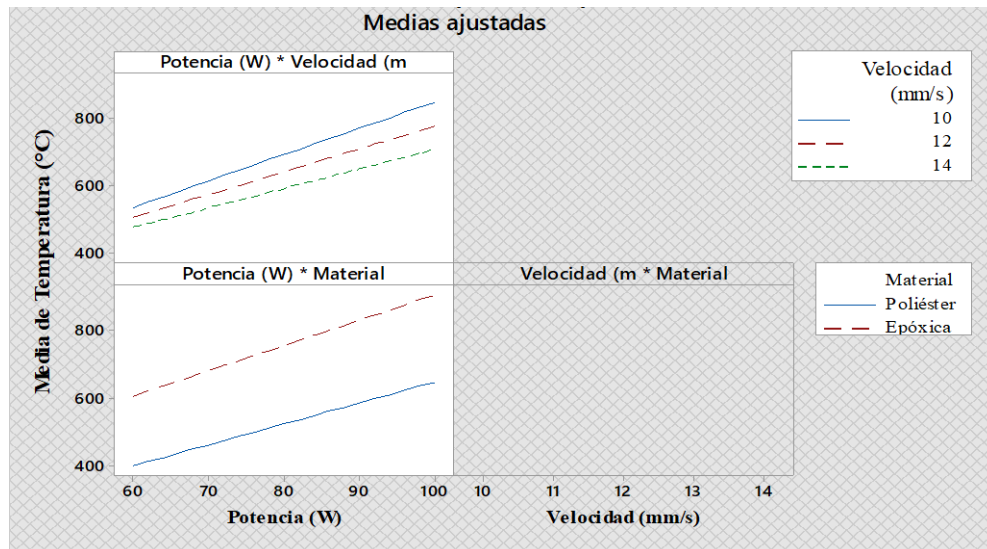


Figura 3.18. Gráfica de interacción para las temperaturas superficiales.

Fuente: Software Minitab 18.1

La gráfica de interacción para la temperatura superficial para los materiales compuestos presenta las siguientes tendencias:

- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 60 W y una velocidad de corte de 14 mm/s se genera una temperatura media de 468,5 °C.
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 100 W y una velocidad de corte de 10 mm/s se genera una temperatura media de 815,15 °C.
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 60 W en el material compuesto de matriz poliéster se genera una temperatura media de 403,55 °C.
- Si se efectúa el corte por láser de CO₂ con una potencia de 100 W en el material compuesto de matriz epóxica se genera una temperatura media de 898,55 °C.

3.2.2.4 Gráfica de superficie de respuesta

A partir de los datos de las temperaturas superficiales generadas por el rayo láser de CO₂, tanto del material compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica se genera la siguiente superficie de respuesta que relaciona la Temperatura superficial (eje z) con los parámetros de entrada: Potencia (eje x) y Velocidad de corte (y).

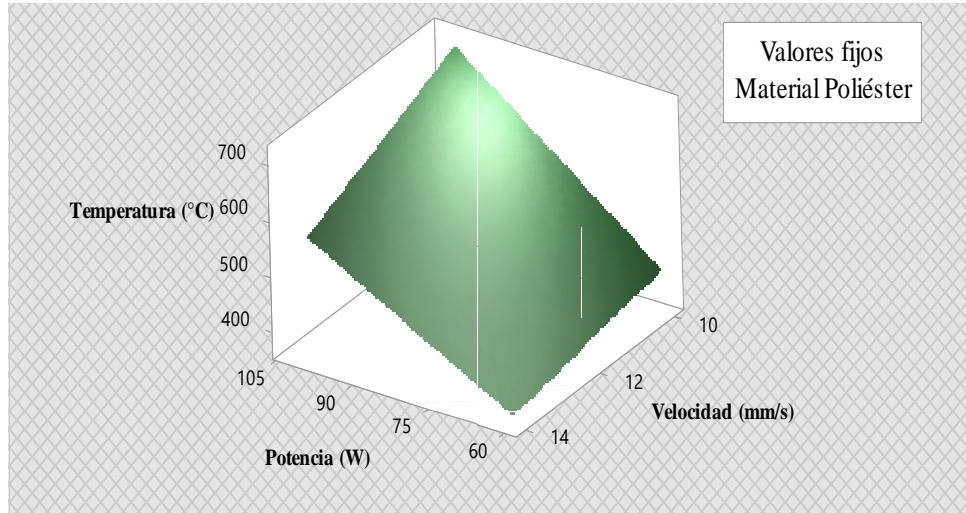


Figura 3.19. Superficie de respuesta de la temperatura superficial del compuesto de matriz poliéster.

Fuente: Software Minitab 18.1

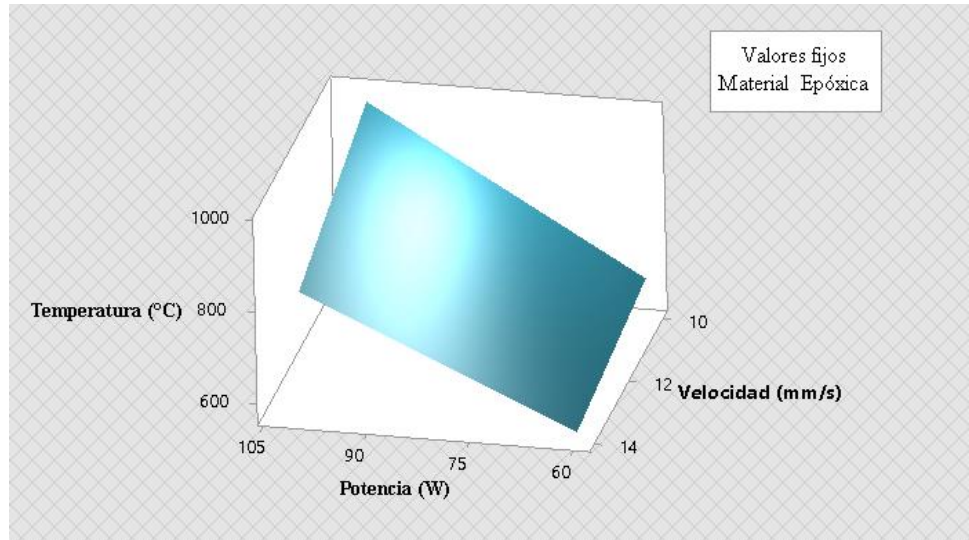


Figura 3.20. Superficie de respuesta de la temperatura superficial del compuesto de matriz epóxica.

Fuente: Software Minitab 18.1

- **Optimización de respuesta del compuesto de matriz poliéster**

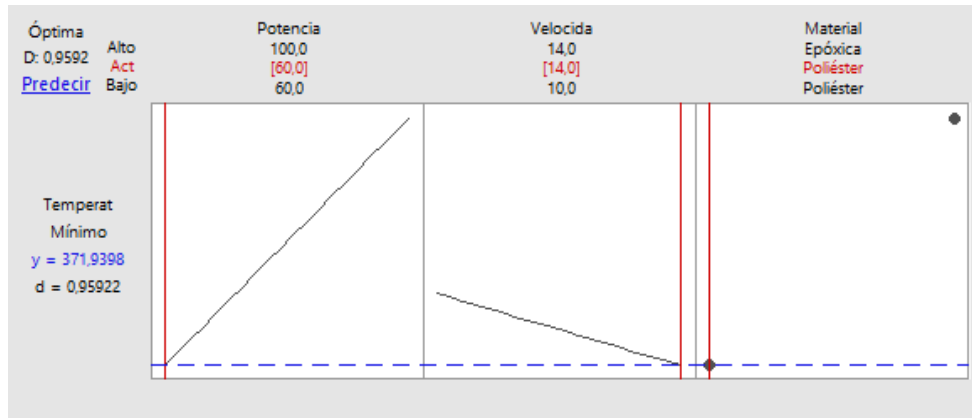


Figura 3.21. Gráfica 2D del punto óptimo de la temperatura superficial del compuesto de matriz poliéster.

Fuente: Software Minitab 18.1

La figura 3.21 ilustra los valores adecuados de operación para el proceso de corte láser de CO₂, con la cual se consigue la óptima Temperatura superficial del material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz. Es decir que con una potencia de 60 W y de una velocidad de corte de 14 mm/s se logra una Temperatura superficial de 371,9398 °C, en base a los datos recopilados del material compuesto de matriz poliéster. Sin embargo, es importante mencionar que el 95,92% de la variabilidad observada en la temperatura superficial del compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz es explicada por el modelo.

- **Optimización de respuesta del compuesto de matriz epóxica**

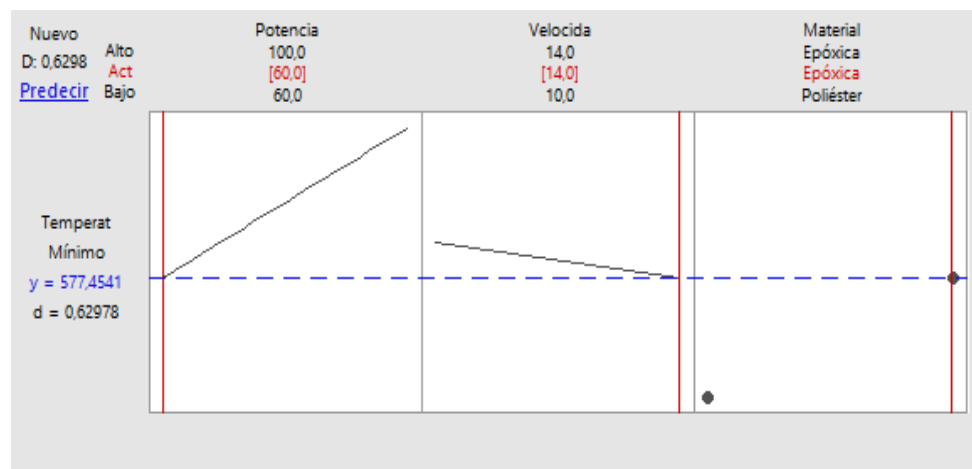


Figura 3.22. Gráfica 2D del punto óptimo de la temperatura superficial del compuesto de matriz epóxica.

Fuente: Software Minitab 18.1

La figura 3.22 ilustra los valores adecuados de operación para el proceso de corte láser de CO₂, con la cual se consigue la óptima Temperatura superficial del material compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz. Es decir que con una potencia de 60 W y de una velocidad de corte de 14 mm/s se logra una Temperatura superficial de 577,4541°C, en base a los datos recopilados del material compuesto de matriz epóxica. Sin embargo, podemos decir que el 62,98% de la variación observada en la temperatura superficial del compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz es explicada por el modelo.

3.3 Verificación de hipótesis

Una vez analizado los datos de la rugosidad (um) y la temperatura superficial (°C) en base a la metodología de superficie de respuesta y al diseño central compuesto para tres factores (2 continuos y 1 categórico) mediante el software estadístico Minitab 18.1 se procede a la verificación de la hipótesis planteada al inicio de la investigación la cual consiste en comprobar si “La variación de parámetros en el proceso de corte láser de CO₂ para el material compuesto de matriz poliéster reforzado de cascarilla de arroz influirá en la calidad de corte”, para aquello se utiliza el análisis de varianzas (ANOVA) y las tablas 3.30 y 3.34.

Teniendo en cuenta que para aceptar o rechazar la hipótesis nula, el P-valor deber cumplir los siguientes criterios de relación, estableciendo que el nivel de significancia (α) es del 5%.

P-valor $\geq \alpha$ Aceptar Ho

P-valor $< \alpha$ Aceptar H1

Verificación de la hipótesis respecto a la rugosidad (Ra) de los materiales compuestos, mediante ANOVA

Hipótesis

- **H₀:** La rugosidad superficial (Ra) *es igual* al variar los parámetros de corte por láser de CO₂.

- **H₁**: La rugosidad superficial (Ra) *es diferente* al variar los parámetros de corte por láser de CO₂.

La tabla 3.35 que se presenta a continuación es el resumen de la tabla 3.30 en el cual se describe el P-valor del modelo que contiene a los factores potencia, velocidad de corte y material (matriz poliéster y matriz epóxica) que tienen influencia sobre la respuesta rugosidad.

Tabla 3.35. Resumen del P-valor del modelo de regresión cuadrática de la rugosidad.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
Modelo	5	19,4014	3,8803	16,40	0,000
Error	46	10,8841	0,2366		
Total	51	30,2855			

Fuente: Autor

Conclusión:

El P-valor (0,000) determinado del análisis de superficie de respuesta mediante el análisis de varianzas por ANOVA resulta ser menor que el nivel de significancia (0,05), con la cual se concluye que la rugosidad superficial de los materiales compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz es diferente al variar los parámetros (potencia y velocidad) del proceso de corte por láser de CO₂, por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa (H₁).

Verificación de la hipótesis respecto a la temperatura superficial de los materiales compuestos, mediante ANOVA

Hipótesis

- **H₀**: La temperatura superficial (Ra) *es igual* al variar los parámetros de corte por láser de CO₂.
- **H₁**: La temperatura superficial (Ra) *es diferente* al variar los parámetros de corte por láser de CO₂.

La tabla 3.36 que se presenta a continuación es el resumen de la tabla 3.34 en el cual se describe el P-valor del modelo global que contiene a los factores potencia, velocidad de corte y material (matriz poliéster y matriz epóxica) que tienen influencia sobre la respuesta temperatura superficial.

Tabla 3.36. Resumen del P-valor del modelo de regresión lineal de la temperatura superficial.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
Modelo	5	1210716	242143	429,42	0,000
Error	46	25939	564		
Total	51	1236655			

Fuente: Autor

Conclusión:

El P-valor (0,000) determinado del análisis de superficie de respuesta mediante el análisis de varianzas por ANOVA resulta ser menor que el nivel de significancia (0,05), con la cual se concluye que la temperatura superficial de los materiales compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz es diferente al variar de los parámetros (potencia y velocidad) del proceso de corte por láser de CO₂, por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa (H₁).

Conclusión general de la hipótesis de investigación

Mediante la verificación de las hipótesis de la rugosidad y el efecto térmico (temperatura superficial) analizados en el material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz se concluye que la variación de los parámetros (potencia y velocidad) del proceso de corte por rayo láser de CO₂ influyen de manera significativa en la calidad del borde cortado. Esto es debido a que si se corta con potencias altas y velocidades bajas se obtiene como resultado altas rugosidades y un elevado efecto térmico. Pero si se corta con bajas potencias y altas velocidades la rugosidad de la cara intervenida con rayo láser del material compuesto disminuye al igual que el efecto térmico en el borde cortado.

CAPÍTULO IV.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El método de superficie de respuesta al ser una metodología de modelación y experimentación, permitió diseñar el modelo experimental de investigación, en base a las variables independientes (potencia y velocidad) y sus respectivos niveles (60, 80, 100 W y 10, 12, 14 mm/s), con el cual se generaron los tratamientos necesarios (52 experimentos totales) a ejecutarse en los materiales compuestos (26 experimentos en el compuesto de matriz poliéster y 26 en el compuesto de matriz epóxica), logrando conseguir de esta manera la mayor cantidad de información con el mínimo de costos y con la mejor eficiencia, permitiendo comprobar la hipótesis de la investigación.
- El material compuesto de matriz polimérica reforzada con cascarilla de arroz fue elaborado con una fracción volumétrica del 83% de matriz poliéster y un 17% de material de refuerzo (cascarilla de arroz), ya que mediante investigaciones previas enfocados en ensayos de tracción (ASTM D3039/D3039M-08), flexión (ASTM D7264/D7264M-07.13) e impacto (ASTM D 5628) se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas, con un porcentaje de aceptación del 90,91%.
- Las formas geométricas rectangulares permitieron determinar el acabado de la superficie (rugosidad de la superficie procesada por rayo láser) y el efecto térmico (temperatura superficial) que se generan en los compuestos de matriz poliéster y matriz epóxica, al ejecutar las respectivas combinaciones de factores y niveles; Potencia (60, 80 y 100 W) y velocidad de corte (10, 12 y 14 mm/s).
- Los valores óptimos de los parámetros de operación (potencia y velocidad) del proceso de corte por láser de CO₂, con la cual se consigue la mejor rugosidad del compuesto de matriz poliéster (3,1790 μm) y del compuesto de matriz epóxica (4,327 μm) reforzados con cascarilla de arroz es de 76,16

W y 14 mm/s. Es decir que el material que presenta menor rugosidad en la superficie intervenida con rayo láser de CO₂, es el compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz, siendo este compuesto el mejor para posibles aplicaciones.

- Los valores adecuados de operación para el proceso de corte láser de CO₂, con la cual se consigue la óptima Temperatura superficial del material compuesto de matriz poliéster (371,9398 °C) y del compuesto de matriz epóxica (577,4541°C) reforzados con cascarilla de arroz es de 60 W de potencia y de una velocidad de corte de 14 mm/s, con el cual se consigue que en los materiales compuestos cortados por rayo láser se queme en lo más mínimo. Es decir que si se utilizan potencias bajas y velocidades altas se logran temperaturas superficiales bajas. Al presentarse menores temperaturas en la superficie intervenida con rayo láser de CO₂, en el compuesto de matriz poliéster lo convierte en la mejor opción para posibles aplicaciones.
- Mediante los resultados de la rugosidad promedio (Ra) del compuesto de matriz poliéster y del compuesto de matriz epóxica, al ser manufacturados (corte) por rayo láser, se determinó que se encuentran dentro del rango aceptable [6,3 – 1,6] μm que establece la norma ISO 1302, es decir que ambos materiales compuestos presentan un buen acabado superficial, y sin mencionar que las temperaturas superficiales no generan un HAZ muy considerable.
- Mediante los resultados de las tasas de combustión que resultaron de los ensayos de inflamabilidad bajo la norma ISO 3795, tanto del compuesto de matriz poliéster (8,27 mm/min) y matriz epóxica (15,85 mm/min) se determinó que se encuentran dentro del rango permisible aceptable (Norma NTE INEN 1323: ≤ 100 mm/min y Norma NTE INEN 1668: ≤ 250 mm/min) que deben cumplir la inflamabilidad de los materiales en el interior de los vehículos de carretera.
- Mediante las gráficas de tiempo y tasas de combustión de los ensayos de inflamabilidad tanto de las probetas de material compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica reforzados con cascarilla de arroz se determinó

que la tasa de combustión es inversamente proporcional al tiempo de combustión, esto quiere decir que a menor tiempo de combustión la tasa de combustión incrementa, mientras que a mayor tiempo la tasa de combustión disminuye.

4.2 Recomendaciones

- La fuerza de desplazamiento del palpador debe ser igual a 0,75mN ya que si la fuerza del mismo es mayor a lo establecido por el manual, ocasiona que la punta de diamante genere rayaduras en la superficie a ser analizada, adquiriendo datos erróneos de la mediciones.
- La superficie a ser medida la rugosidad debe contener una área superficial lo suficientemente grande para que el palpador pueda realizar un recorrido considerable, para tener un mayor rango de adquisición de datos.
- En lo posible no tocar con las manos las superficies a ser analizadas, con la finalidad de no adquirir datos erróneos de las rugosidades a ser medidas.
- Ejecutar los ensayos de inflamabilidad tal como establece la norma ISO 3795, con la finalidad de obtener resultados confiables.
- Utilizar los equipos de protección personal idóneos para realizar los ensayos de inflamabilidad, ya que mediante el proceso de combustión se desprenden gases tóxicos como el dióxido de carbono y hollín negro muy fino que afectan la salud integral del encargado de realizar los ensayos.
- Construir una cámara con control de gases de combustión el cual disponga de un área específica para ubicar la máquina de ensayos de inflamabilidad.

Bibliografía

- [1] D. R. Askeland, P. P. Fulay y W. J. Wright, Ciencia e ingeniería de materiales, Sexta ed., México: Cengage Learning, 2011, pp. 660-661.
- [2] F. Stupenengo, Materiales y materiales primas, Primera ed., Buenos Aires, 2012.
- [3] J. William D. Callister, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, Segunda ed., Barcelona: Reverté, 2007.
- [4] G. Gibson, «Epoxy Resins,» de *Brydson's Plastics Materials*, Octava ed., 2017, pp. 773-797.
- [5] M. Vengatesan, A. Varghese y V. Mittal, «Thermal properties of thermoset polymers,» de *Thermosets: Structure, Properties and Applications*, Second ed., Mathew Deans, 2018, pp. 69 - 114.
- [6] R. Ramos, «Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio,» *Cimbra*, vol. I, pp. 42-52, 2010.
- [7] D. Hull, Materiales Compuestos, Primera ed., Barcelona : Reverté, 2003.
- [8] S. Velásquez , G. Pelaéz y D. Giraldo , «Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos,» *Dialnet*, vol. LXXX, nº 1, pp. 77-86, 2016.
- [9] E. Lalaleo Galarza, «Caracterización mecánica del material compuesto de matriz poliéster reforzada con cascarilla de arroz para determinar las propiedades mecánicas en aplicaciones industriales,» Ambato, 2016.
- [10] E. Molina Salas , «Evaluación del uso de la cascarilla de arroz en la fabricacion de bloques de concreto,» *ICOTEC*, pp. 10-11, 2010.

- [11] L. Montero García , «Estudio del mecanizado de materiales compuestos,» Leganés, 2010.
- [12] V. Senthilkumar, «Laser cutting process – A Review,» *DARSHAN* , vol. III, nº 1, pp. 44-48, 2014.
- [13] P. Pathik, G. Piyush y R. Shilpesh, «Laser Machining of Polymer Matrix Composites: Scope, Limitation and Application,» *IJETT*, vol. IV, nº 1, pp. 2391-2399, 2013.
- [14] C. Rodríguez, «Mejoramiento de la calidad del borde cortado en PMMA por láser de CO2,» Santiago de Chile, 2011.
- [15] A. Bresciani, A. Cocquio y C. Ricci, «Proceso innovador de corte láser para placas cerámicas,» *Qualicer*, vol. I, nº 1, pp. 1-14, 2010.
- [16] R. R. Rojas Moposita, «Estudio de corte láser por CO2 en materiales compuestos: Fibra de vidrio+resina poliéster, fibra de vidrio+fibra natural+resina poliéster,» Ambato, 2018.
- [17] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Quinta ed., México: Pearson Educación, 2008, pp. 1036-1042.
- [18] M. Boujelbene, «Influence of the CO2 laser cutting process parameters on the Quadratic Mean Roughness Rq of the low carbon steel,» *ELSEVIER*, vol. XX, pp. 259-264, 2018.
- [19] J. Ruiz , J. Arrizubieta, A. Calleja y S. Martínez, «Corte por láser y estampación en caliente,» *Delteco*, 2016.
- [20] Y. Cengel y M. Boles , *Termodinámica*, Segunda ed., México: McGraw-Hill, 2006, pp. 11-12.
- [21] Y. Cengel y A. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, Cuarta ed., México: McGrawHill Educación, 2011, pp. 22-23.

- [22] F. Incropera y D. De Witt, Fundamentos de transferencia de calor, Cuarta ed., México: Pearson Educación, 1996, pp. 73-78.
- [23] P. Davim, N. Barricas, M. Conceicao y C. Oliveira, «Some experimental studies on CO2 laser cutting quality of polymeric materials,» *ELSEVIER*, vol. CXCVIII, n° 3, pp. 99-104, 2008.
- [24] International Standard ISO 1302, Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation, Fourth ed., Madrid, 2002.
- [25] A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquiños, R. Comesaña y M. Boutinguiza, «Experimental study on the CO2 laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite,» *ELSEVIER*, vol. XLVIII, n° 8, pp. 1400-1409, 2012.
- [26] S. S. I.A. Choudhury, «Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation,» *ELSEVIER*, vol. XLII, n° 3, pp. 503-508, 2010.
- [27] A. Díaz , Diseño Estadístico de Experimentos, Segunda ed., Medellín: Universidad de Antioquia, 2009, pp. 8-9.
- [28] H. Gutiérrez y R. Salazar, Análisis y diseño de experimentos, Tercera ed., México: McGrawHill Educación, 2012, pp. 3-4.
- [29] A. Ganeshpurkar , V. Pandey , S. Asati, R. Maheshwari y M. Tekade, «Experimental Design and Analysis of Variance,» de *Dosage Form Design Parameters*, vol. II, Academic Press, 2018, pp. 281-301.
- [30] M. J. C. M. R. A. W. & P. V. Badii, «Diseños experimentales e investigación científica,» *UANL*, pp. 283-330, 2007.
- [31] J. Lazar, J. Feng y H. Hochheiser, de *Research Methods in Human Computer Interaction*, Second ed., Morgan Kaufmann, 2017, pp. 45-69.
- [32] D. Montgomery, Disign and analysis of experiments, Sixth ed., United States of America: Limusa Wiley, 2005, pp. 405-407, 455-460.

- [33] M. Cámara, M. De Zan, V. Candiotti y H. Goicoechea, *Diseño experimental y optimización de sistemas con múltiples respuestas*, 2016.
- [34] A. Cabrera Valencia, «Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de inflamabilidad vertical de materiales utilizados en el interior de las carrocerías.,» Ambato, 2018.
- [35] International Standard ISO 3795, Road vehicles, and tractors and machinery for agricultura and forestry - Determination of burning behaviour of interior materials, Second ed., Madrid.
- [36] C. Pérez, C. Castro y R. Valencia , «The cubic regression model of thermal estimation in the flammability test of the fibrous compound used in bus bodies,» *MATEC Web of Conferences*, vol. 264, n° 2004, pp. 1-5, 2019.
- [37] P. C. I. Choudhury, «Experimental evaluation of laser cut quality of glass fibre reinforced plastic composite,» *ELSEVIER*, vol. LI, n° 10, pp. 1125-1132, 2013.
- [38] C. Pérez, J. Paredes, E. Lalaleo, C. Arroba y D. Núñez , «Análisis Numérico/Experimental de las Propiedades Mecánicas del Compuesto de Matriz Poliéster Reforzado con Cascarrilla de Arroz,» *Ciencia*, vol. XIX, n° 4, pp. 503-515, 2017.

ANEXOS

Anexo A: Cortes preliminares del compuesto de matriz poliéster y matriz epóxica, para la determinación de las profundidades de corte por rayo láser de CO₂ a varios intervalos de potencia y velocidad de corte.



Anexo B: Calidad superficial para diversos procesos de manufactura establecida por la norma ISO 1302.

Rugosidad promedio en micrómetros – Ra μm													
Proceso	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.012
Arenado	■	■	■										
Aserrado	■	■	■	■	■	■	■						
Brochado				■	■	■	■	■					
Bruñido							■	■	■				
Cepillado		■	■	■	■	■	■						
Cizallado	■	■	■	■									
Corte con soplete	■												
Corte electroquímico		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Corte láser		■	■	■	■	■	■	■					
Electroerosión				■	■	■	■	■	■				
Estampado		■	■	■	■	■	■	■					
Esmerilado						■	■	■	■	■	■	■	
Extrusión			■	■	■	■	■	■					
Forjado		■	■	■	■	■	■	■					
Fresado		■	■	■	■	■	■	■	■				
Fundición a cera perdida				■	■	■	■	■					
Fundición a presión					■	■	■	■					
Fundición en arena		■	■	■	■	■	■	■					
Fundición en coquilla				■	■	■	■	■					
Granallado					■	■	■	■	■	■	■		
Laminado en caliente	■	■	■										
Laminado en frío				■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Lapidado								■	■	■	■	■	■
Limado				■	■	■	■	■	■				
Mandrilado		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Mortajado				■	■	■	■	■	■				
Oxicorte	■	■	■										
Pulido								■	■	■	■	■	■
Recalcado			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Rectificado				■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Superacabado								■	■	■	■	■	■
Taladrado			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Torneado		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Trefilado				■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	Aplicación frecuente					Aplicación menos frecuente							

Anexo C: Informe técnico de las mediciones de las rugosidades (Ra) de las probetas de material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz.



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA

MEDICIÓN DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN MUESTRAS DE
MATERIALES COMPUESTOS

ENERO DE 2019
AMBATO – ECUADOR

INFORME TÉCNICO Lb1-0001-2019

Objetivo

Establecer y mantener un método para evaluar la rugosidad superficial de un objeto o pieza producto.

Alcance

Aplicable a medición de rugosidad en superficies planas de valores Rz entre $0,03 \mu m$ y $20 \mu m$.

Proceso de medida bajo normas: ISO 4287-1997, ISO 3274 y ISO 5436-1

ANTECEDENTES:

Con fecha 03 de enero de 2019, el Sr. Carlos Tonato, domiciliado en la ciudad de Ambato – Tungurahua, solicita al Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para medir la calidad superficial de dos materiales compuestos.

Se reciben 26 muestras o probetas, bajo el nombre de: **(Resina poliéster combinado con cascarilla de arroz)** de aspecto compuesto del 83% de matriz y 17% de refuerzo. Por anverso: color ocre claro y brillante, superficie lisa y forma regular; por reverso: color ocre oscuro, superficie lisa. Las muestras tienen dimensiones promedias de: 40 mm de largo, 20 mm de ancho y espesor de 3,2 mm.

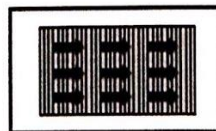
PROCESO GENERAL:

Alineación del objeto o pieza producto. Se procede antes de cada medición a alinear el objeto o pieza producto con el eje de desplazamiento del palpador.

Selección de los Parámetros a medir. Se selecciona los parámetros a medir en función de la información o documentación suministrada por el usuario o de las necesidades manifestadas por el mismo.

Antes de efectuar las respectivas mediciones de la rugosidad en las probetas se calibra el equipo de medición con la galga de calibración que debe estar cerca de $2,94 \mu m$ (Ra).

Las mediciones se realizan perpendicularmente a las líneas de mecanizado, como se indica en la figura adjunta.



Se efectuaron las mediciones de rugosidades superficiales de las probetas con las réplicas solicitadas por el usuario y los respectivos datos fueron registrados y tabulados.

CONDICIONES DE ENSAYO

- Temperatura: 20 °C
- Ángulo de la pendiente del cono: 60°
- Fuerza de medición estática: 0,75 mN
- Radio de la punta: 2µm

Se selecciona el palpador en función de la medición a realizar y siguiendo los lineamientos del manual de fabricante del Rugosímetro.

Un criterio práctico aproximado de selección de palpadores podría ser el siguiente:

Ra	Palpadores de radio ap
$R_a \leq 0,4 \mu m$	2 μm o 2,4 μm
$0,4 \mu m \leq R_a \leq 6 \mu m$	5 μm
$R_a \geq 6 \mu m$	10 μm

RESULTADOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA Centro de Transferencia y Tecnología			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
DATOS INFORMATIVOS:			
Fecha:	03/01/2019	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales de la FICM	Campus Huachi	
Equipo:	Rugosímetro digital MITUTOYO SurfTest SJ-210		
Realizado por:	Egdo. Gustavo Pomaquero	Revisado por:	Ing. Sebastián Villegas
Tipo de material:	Material compuesto (Resina poliéster combinado con cascarilla de arroz)		
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Tipo de Medición:	Medición de rugosidad (Ra)	Norma:	ISO 4287-1997
Dimensiones (mm):	40x20x3,2	Nº de probetas:	26


Resultados de la medición de rugosidad (um)

Nº	Código	Longitud: 40 mm		Longitud: 20 mm		Medición promedio
		Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	
1	1 LPA	4,330	4,189	4,427	3,373	4,080
2	2 LPA	3,550	2,852	2,277	4,153	3,208
3	3 LPA	3,023	3,298	2,675	2,551	2,887
4	4 LPA	3,855	3,602	5,037	2,225	3,680
5	5 LPA	3,073	4,037	4,276	4,625	4,003
6	6 LPA	4,402	3,864	4,069	3,423	3,940
7	7 LPA	3,798	3,995	5,236	3,387	4,104
8	8 LPA	2,225	3,905	3,350	3,751	3,308
9	9 LPA	3,123	3,337	2,510	2,513	2,871
10	10 LPA	3,451	3,078	4,091	3,846	3,617
11	11 LPA	3,271	4,152	2,324	2,326	3,018
12	12 LPA	3,602	3,978	3,628	3,853	3,765
13	13 LPA	4,697	4,035	3,745	3,897	4,094
14	27 LPA	3,594	4,160	2,343	3,792	3,472
15	28 LPA	4,359	4,036	3,003	5,298	4,174
16	29 LPA	2,170	2,137	2,747	2,250	2,326
17	30 LPA	3,824	3,664	4,868	4,278	4,159
18	31 LPA	4,183	3,667	4,046	3,667	3,891
19	32 LPA	3,445	5,178	5,568	4,554	4,686
20	33 LPA	5,327	4,836	3,118	3,495	4,194
21	34 LPA	3,033	3,955	3,001	3,047	3,259
22	35 LPA	3,102	3,611	3,104	3,121	3,235
23	36 LPA	5,118	5,357	2,222	2,366	3,766
24	37 LPA	2,382	3,378	3,639	2,987	3,097
25	38 LPA	3,263	3,764	4,202	4,231	3,865
26	39 LPA	3,407	4,475	2,978	4,625	3,871
Observaciones:						




.....
Ego. Gustavo Pomaquero
TÉCNICO LABORATORISTA


.....
Ing. Sebastián Villegas
TÉCNICO DE LABORATORIO




.....
Ing. Jorge Cevallos
COORDINADOR DE CTT



Anexo D: Informe técnico de las mediciones de las rugosidades (Ra) de las probetas del material compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz.



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA

MEDICIÓN DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN MUESTRAS DE
MATERIALES COMPUESTOS

ENERO DE 2019
AMBATO – ECUADOR

INFORME TÉCNICO Lb1-0002-2019

Objetivo

Establecer y mantener un método para evaluar la rugosidad superficial de un objeto o pieza producto.

Alcance

Aplicable a medición de rugosidad en superficies planas de valores Rz entre 0,03 μm y 20 μm .

Proceso de medida bajo normas: ISO 4287-1997, ISO 3274 y ISO 5436-1

ANTECEDENTES:

Con fecha 03 de enero de 2019, el Sr. Carlos Tonato, domiciliado en la ciudad de Ambato – Tungurahua, solicita al Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para medir la calidad superficial de dos materiales compuestos.

Se reciben 26 muestras o probetas, bajo el nombre de: **(Resina epóxica combinado con cascarilla de arroz)** de aspecto compuesto del 83% de matriz y 17% de refuerzo. Por anverso: color ocre claro y brillante, superficie lisa y forma regular; por reverso: color ocre oscuro, superficie lisa. Las muestras tienen dimensiones promedias de: **40 mm** de largo, **20 mm** de ancho y espesor de **3,2 mm**.

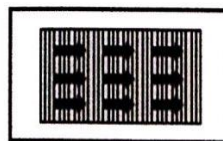
PROCESO GENERAL:

Alineación del objeto o pieza producto. Se procede antes de cada medición alinear el objeto o pieza producto con el eje de desplazamiento del palpador.

Selección de los Parámetros a medir. Se selecciona los parámetros a medir en función de la información o documentación suministrada por el usuario o de las necesidades manifestadas por el mismo.

Antes de efectuar las respectivas mediciones de la rugosidad en las probetas se calibra el equipo de medición con la galga de calibración que debe estar cerca de 2,94 μm (Ra).

Las mediciones se realizan perpendicularmente a las líneas de mecanizado, como se indica en la figura adjunta.



Se efectuaron las mediciones de rugosidades superficiales de las probetas con las réplicas solicitadas por el usuario y los respectivos datos fueron registrados y tabulados.

CONDICIONES DE ENSAYO

- Temperatura: 20 °C
- Ángulo de la pendiente del cono: 60°
- Fuerza de medición estática: 0,75 mN
- Radio de la punta: 2µm

Se selecciona el palpador en función de la medición a realizar y siguiendo los lineamientos del manual de fabricante del Rugosímetro.

Un criterio práctico aproximado de selección de palpadores podría ser el siguiente:

Ra	Palpadores de radio ap
$R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$	2 μm o 2,4 μm
$0,4 \mu\text{m} \leq R_a \leq 6 \mu\text{m}$	5 μm
$R_a \geq 6 \mu\text{m}$	10 μm

RESULTADOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
Centro de Transferencia y Tecnología			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
DATOS INFORMATIVOS:			
Fecha:	03/01/2019	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales de la FICM	Campus Huachi	
Equipo:	Rugosímetro digital MITUTOYO SurfTest SJ-210		
Realizado por:	Egdo. Gustavo Pomaquero	Revisado por:	Ing. Sebastián Villegas
Tipo de material:	Material compuesto (Resina epóxica combinado con cascarilla de arroz)		
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Tipo de Medición:	Medición de rugosidad (Ra)	Norma:	ISO 4287-1997
Dimensiones (mm):	40x20x3,2	Nº de probetas:	26


Resultados de la medición de rugosidad (um)

Nº	Código	Longitud: 40 mm		Longitud: 20 mm		Medición promedio
		Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	
1	14 LEA	3,693	3,915	4,834	2,646	3,772
2	15 LEA	4,965	5,062	4,211	5,012	4,813
3	16 LEA	5,277	5,583	4,176	4,589	4,906
4	17 LEA	6,109	5,146	3,649	4,034	4,735
5	18 LEA	5,270	5,705	6,430	6,504	5,977
6	19 LEA	4,337	5,821	5,268	4,935	5,090
7	20 LEA	4,345	4,649	4,188	3,923	4,276
8	21 LEA	3,623	3,926	3,887	4,283	3,930
9	22 LEA	4,080	4,328	4,780	5,859	4,762
10	23 LEA	4,784	5,282	4,715	6,472	5,313
11	24 LEA	4,650	4,871	3,922	5,577	4,755
12	25 LEA	4,556	3,954	3,585	3,981	4,019
13	26 LEA	4,593	4,641	4,048	4,127	4,352
14	40 LEA	4,784	5,143	4,726	3,683	4,584
15	41 LEA	5,114	5,796	4,593	4,633	5,034
16	42 LEA	6,312	5,727	4,200	4,199	5,110
17	43 LEA	5,253	3,926	4,882	4,226	4,572
18	44 LEA	5,010	5,855	4,597	6,010	5,368
19	45 LEA	4,957	4,369	5,354	5,226	4,977
20	46 LEA	4,161	4,031	6,544	6,338	5,269
21	47 LEA	4,904	4,248	4,875	4,778	4,701
22	48 LEA	4,812	4,338	3,885	4,331	4,342
23	49 LEA	5,487	4,064	5,663	5,705	5,230
24	50 LEA	4,777	5,005	6,123	3,532	4,859
25	51 LEA	4,971	4,490	5,177	5,551	5,047
26	52 LEA	4,730	4,904	4,478	4,343	4,614

Observaciones:




.....
Egdo. Gustavo Pomaquero
TÉCNICO LABORATORISTA


.....
Ing. Sebastián Villegas
TÉCNICO DE LABORATORIO


.....
Ing. Jorge Cevallos
COORDINADOR DE CTT

Anexo F: La Norma Internacional ISO 3795 “Road vehicles, and tractors and machinery for agricultura and forestry - Determination of burning behaviour of interior materials”

Estándar internacional

ISO 3795 segunda edición 1989-10-15

Vehículos de carretera y tractores y maquinaria para agricultura y silvicultura - Determinación del comportamiento de combustión de los materiales interiores.

Vehículos de carretera y tractores y equipos agrícolas y forestales. – Determinación de características de combustión de materiales internos.

Prologo.

ISO (La organización internacional para la estandarización) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización (Cuerpo - Los miembros de ISO). El trabajo de preparación de estándares internacionales normalmente se lleva a cabo a través de comités técnicos de ISO. Cada miembro interesado en un tema para el cual se ha establecido un comité técnico tiene el derecho de estar representado en ese comité, organizaciones internacionales, gubernamentales y no gubernamentales, en coordinación con ISO, también toman parte en el trabajo. ISO colabora estrechamente con la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC) sobre todos los asuntos de estandarización electrotécnica.

Los proyectos de normas internacionales aprobados por los comités técnicos se distribuyen a los organismos miembros para su aprobación antes de ser aceptados como Normas Internacionales por el Consejo ISO.

Se aprueban de acuerdo con los procedimientos ISO que requieren menos del 75% de aprobación por parte de los organismos miembros que votan.

La Norma Internacional ISO 3795 fue preparada conjuntamente por Comités Técnicos ISO / TC 22, Vehículos de carretera e ISO / TC 23, Tractores y maquinaria para la agricultura y silvicultura.

Esta segunda edición cancela y reemplaza la primera edición (ISO 3795: 1976), el alcance de los cuales se ha ampliado para incluir tractores y maquinaria para la agricultura y silvicultura.

© ISO 1989

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse o utilizarse de ninguna forma ni por ningún medio, ya sea electrónico o mecánico, incluidas fotocopias y microfilmes, sin permiso por escrito del editor.

Organización internacional para la estandarización
Case postale 56 CH-1211 geneva 20 Suiza
Impreso en Suiza

Introducción.

La evaluación del comportamiento de combustión de los materiales interiores se basa en la suposición de que es poco probable que ocurra un incendio en el compartimiento de pasajeros cuando la tasa de combustión del el material interior bajo la acción de una pequeña llama es cero o muy pequeño.

En el marco de las normas internacionales para la seguridad de los vehículos de motor preparadas por grupos competentes de la Comisión Económica para Europa (ECEDJNO), ISO había sido solicitado desarrollar un método para la determinación del comportamiento de combustión de materiales interiores en vehículos de motor. Amplia información sobre los métodos de prueba existentes fue recolectada y evaluada En vista de las normas de seguridad que ya son obligatorias, las consideraciones se basaron principalmente en el procedimiento de prueba definido en US-FMVSS 302.

Se prestó considerable atención al problema de la ventilación de la combustión cámara. Se realizaron dos series de pruebas comparativas para investigar diferentes variaciones de diseño.

Después de largas discusiones, se decidió descrito en este estándar internacional. Para incorporar la cámara de combustión

Además, se decidió requerir la presencia de cables de soporte como parte del equipo estándar para evitar interpretaciones subjetivas del comportamiento de la muestra por el personal de prueba.

Vehículos de carretera y tractores y maquinaria para agricultura y silvicultura - Determinación del comportamiento de combustión de materiales interiores

1. Alcance

Esta norma internacional especifica un método para determinar la velocidad de combustión horizontal de los materiales utilizados en el compartimiento de los ocupantes de los vehículos de carretera (por ejemplo, automóviles, camiones, vagones, autocares) y de tractores y maquinaria para la agricultura y la silvicultura, después de exposición a una llama pequeña.

Este método permite probar materiales y partes del equipamiento interior del vehículo individualmente o en combinación hasta un grosor de 13 mm. Se usa para juzgar la uniformidad de los lotes de producción de dichos materiales con respecto a su comportamiento de combustión.

Debido a las muchas diferencias entre la situación del mundo real (aplicación y orientación dentro del interior del vehículo, condiciones de uso, fuente de ignición, etc.) y las condiciones exactas de prueba especificadas en esta Norma Internacional, este método no puede considerarse adecuado para la evaluación de todas verdaderas características de combustión en el vehículo.

2. Referencia normativa

La siguiente norma contiene disposiciones que, mediante la referencia en este texto, constituyen disposiciones de esta Norma Internacional. En el momento de la publicación, la edición indicada era válida. Todas las normas están sujetas a revisión y se alienta a las partes de los acuerdos basados en esta norma internacional a investigar la posibilidad de aplicar la edición más reciente de la norma que se indica a continuación. Los miembros de IEC e ISO mantienen registros de las Normas Internacionales actualmente vigentes.

ISO 2763-1: 1989, Tolerancias generales - Parte I: Tolerancias para dimensiones lineales y angulares sin indicaciones de tolerancia individual.

3. Definiciones

Para los propósitos de esta Norma Internacional, las siguientes definiciones aplicadas.

3.1. Velocidad de combustión:

Cociente de la distancia quemada medida de acuerdo con esta norma internacional y el tiempo necesario para quemar esta distancia.

Se expresa en mililitros por minuto.

3.2. Material compuesto:

Material compuesto por varias capas de materiales similares o diferentes intimamente unidos en sus superficies mediante cementación, unión, revestimiento, soldadura, etc.

Cuando se conectan materiales diferentes de forma intermitente (por ejemplo, cosiendo, soldadura de alta frecuencia, remachado), luego, para permitir la preparación de muestras individuales de acuerdo con la cláusula 6, dichos materiales no se considerarán materiales compuestos.

3.3. Lado expuesto:

Lado que mira hacia el compartimiento del ocupante cuando el material está montado en el vehículo.

4. Principio

Una muestra se sostiene horizontalmente en un soporte en forma de U y se expone a la acción de una llama definida de baja energía durante 15 s en una cámara de combustión, actuando la llama en el extremo libre de la muestra. La prueba determina si y cuando la llama se extingue o el tiempo en que la llama pasa una distancia medida.

5. Aparatos

5.1. Cámara de combustión

(Vea la figura 11, preferiblemente de acero inoxidable y que tenga las dimensiones indicadas en la figura 2.) El frente de la cámara contiene una ventana de observación resistente a las llamas, que puede cubrir el frente y que puede construirse como un panel de acceso.

La parte inferior de la cámara tiene orificios de ventilación, y la parte superior tiene una ranura de ventilación alrededor. La cámara de combustión se coloca en cuatro pies, 10 mm de alto.

La cámara puede tener un orificio en un extremo para la introducción del portamuestras que contiene la muestra; en el extremo opuesto, se proporciona un orificio para la línea de gas. El material fundido queda atrapado en una sartén (ver figura 3) que se coloca en el fondo de la cámara entre los orificios de ventilación sin cubrir ningún orificio de ventilación.

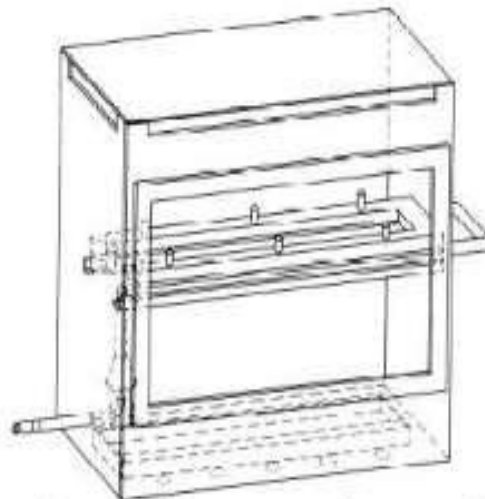


Figura 1 - Ejemplo de cámara de combustión con soporte de muestra y bandeja de goteo

Dimensiones en milímetros
Tolerancias según ISO 2768-1

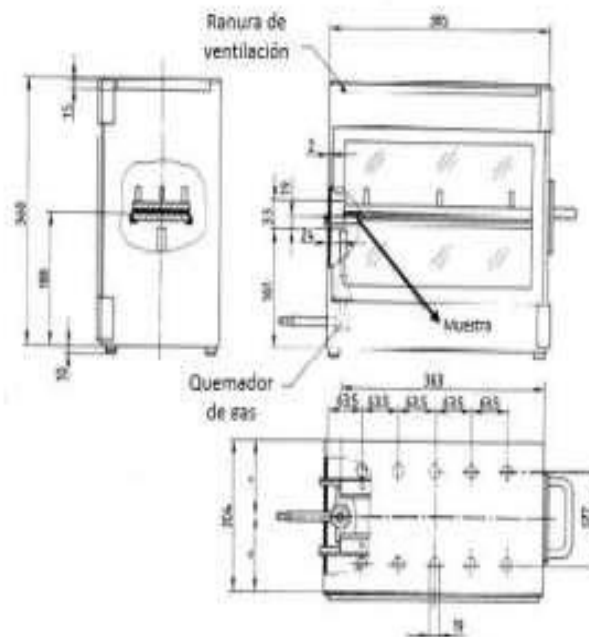


Figura 2 - Ejemplo de cámara de combustión

Dimensiones en milímetros
Tolerancias según ISO 2768-1

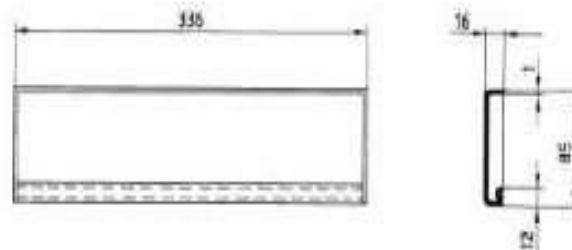


Figura 3 - Bandeja de goteo típica

5.2. Soporte de muestra,

Que consta de dos placas de metal en forma de U o marcos de material resistente a la corrosión. Las dimensiones se dan en Figura 4.

La placa inferior está equipada con clavijas, la superior con los correspondientes agujeros para asegurar una sujeción consistente de la muestra. Los pasadores también sirven como puntos de medición en el comienzo y final de la distancia de combustión.

Se proporcionará un soporte en forma de cables resistentes al calor de 0,25 mm de diámetro que abarquen el marco a intervalos de 25 mm sobre el marco en forma de U inferior (véase la figura 5).

El plano del lado inferior de las muestras debe estar a 178 mm por encima de la placa del piso. La distancia del borde frontal de la muestra al soporte del extremo de la cámara debe ser de 22 mm; la

distancia de los lados longitudinales del soporte de muestras desde los lados de la cámara debe ser de 50 mm (todas las dimensiones internas). (Ver figuras 1 y 2.)

5.3. Quemador de gas.

La fuente de ignición pequeña es provista por un mechero Bunsen que tiene un diámetro interno de 9,5 mm. Está ubicado en el gabinete de prueba de modo que el centro de su boquilla esté a 19 mm por debajo del centro del borde inferior del extremo abierto de la muestra (consulte la figura 2).

5.4. Gas de prueba.

El gas suministrado al quemador tendrá un poder calorífico de aproximadamente 38 MJ / m³ (por ejemplo, gas natural).

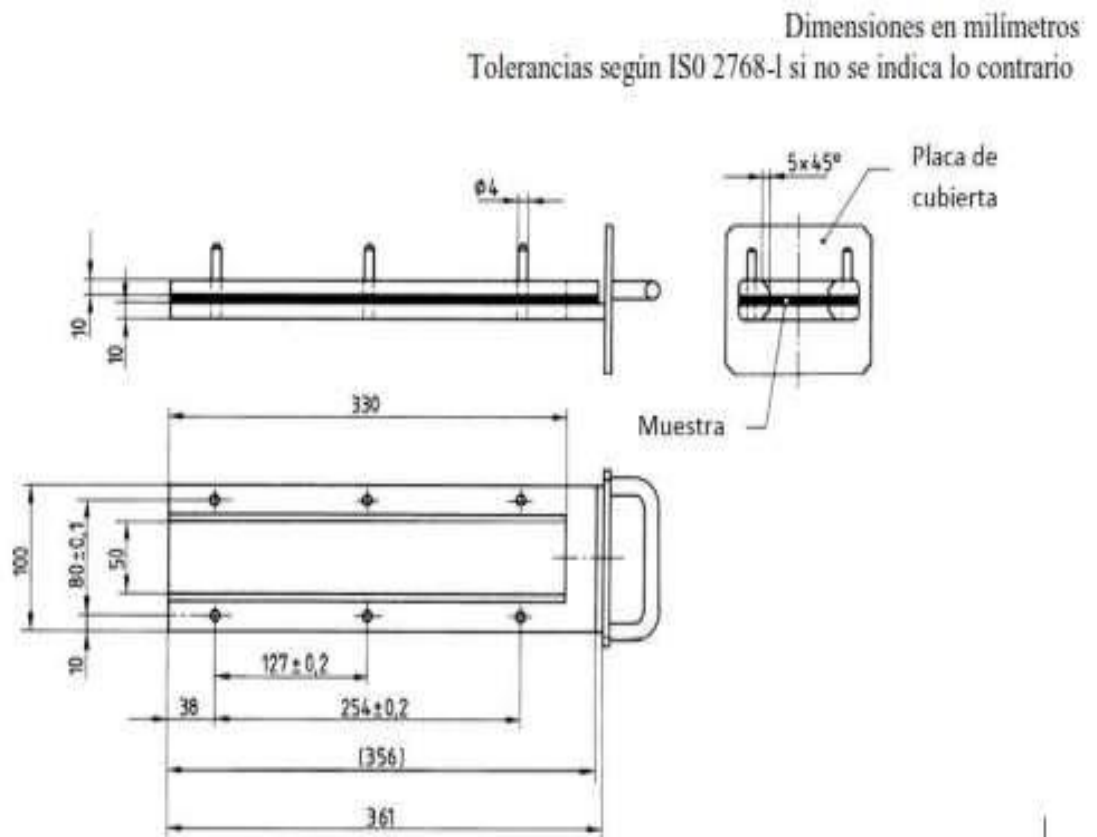


Figura 4 - Ejemplo de portamuestras

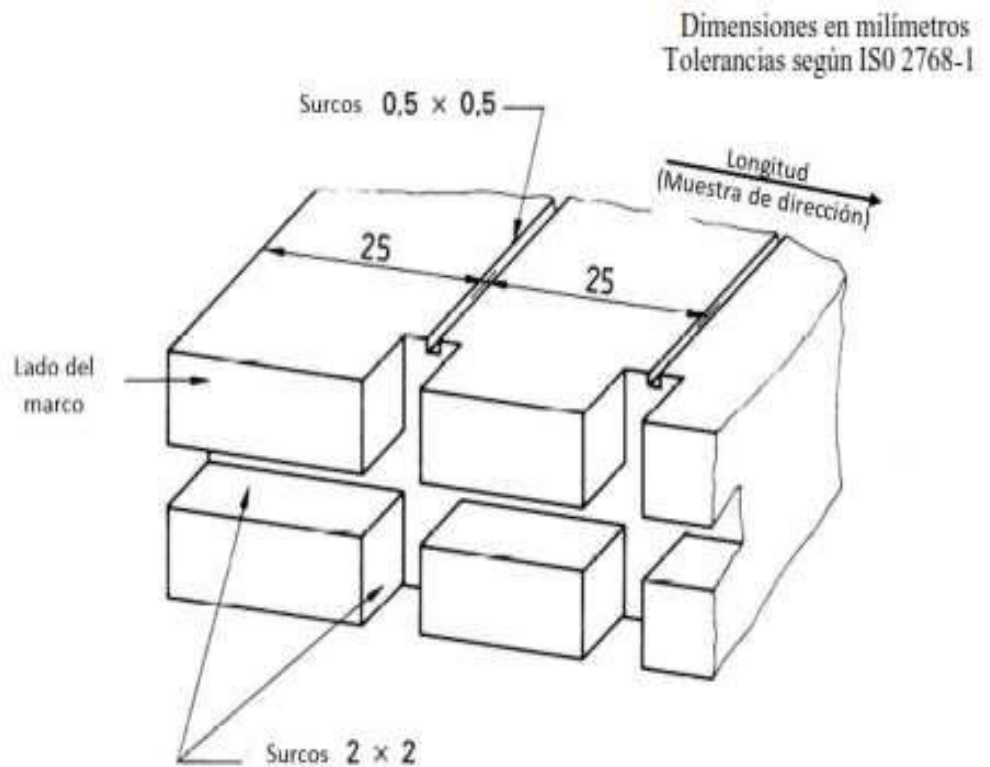


Figura 5 - Ejemplo de sección del diseño inferior del bastidor en U para instalación de soporte de cables

5.5. Peine de metálico

Al menos 110 mm de longitud, con siete a ocho dientes lisos y redondeados por cada 25 mm.

5.6. Reloj de parada o cronómetro

Con una precisión de 0,5 s.

5.7. Armario de humos.

La cámara de combustión puede colocarse en un conjunto de campana de humos siempre que el volumen interno sea al menos 20 veces, pero no más de 110 veces, mayor que el volumen de la cámara de combustión y siempre que no haya dimensión única de altura, ancho o longitud. El armario de los humos es mayor de 2,5 veces cualquiera de las otras dos dimensiones.

Antes de la prueba, la velocidad vertical del aire a través de la campana extractora se medirá 100 mm delante y detrás de la posición final donde se ubicará la cámara de combustión. Deberá estar entre 0,1 m/s y 0,3 m/s para evitar posibles molestias, por productos de combustión, al operador. Es posible utilizar una campana extractora con ventilación natural y una velocidad de aire adecuada.

6. Muestras

6.1. Forma y dimensiones

La forma y dimensiones de las muestras se muestran en la figura 6. El grosor de la muestra corresponde al grosor del producto a analizar. No debe ser más de 13 mm. Al tomar los permisos de muestra, la muestra debe tener una sección constante en toda su longitud.

Dimensiones en milímetros

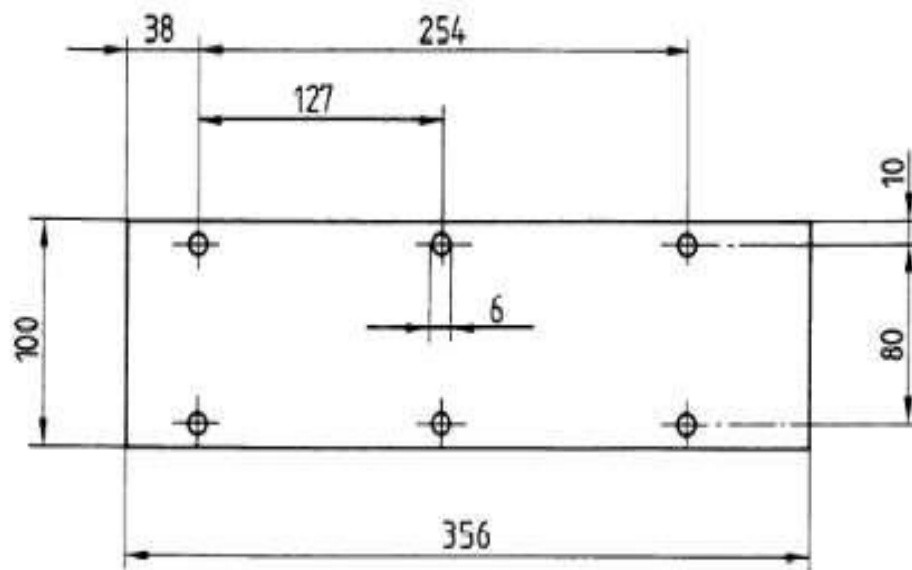


Figura 6 Muestra

Cuando la forma y dimensiones de un producto no permitan tomar una muestra del tamaño dado, se mantendrán las siguientes dimensiones mínimas:

- Para muestras que tengan un ancho de 3 mm a 60 mm, la longitud será de 356 mm. En este caso, el material se prueba en el ancho del producto.
- Para muestras que tengan un ancho de 60 mm a 100 mm, la longitud deberá ser de al menos 138 mm. En este caso, la distancia de combustión potencial corresponde a la longitud de la muestra, comenzando la medición en el primer punto de medición.
- Las muestras que tienen un ancho de menos de 60 mm y más cortas de 356 mm, y muestras que tienen un ancho de 60 mm a 100 mm y más cortas de 138 mm, no se pueden analizar de acuerdo con este método; tampoco pueden las muestras tener un ancho inferior a 3 mm.

6.2. Muestreo

Se tomarán al menos cinco muestras del material bajo prueba. En materiales que tienen diferentes tasas de combustión en diferentes direcciones del material (las pruebas preliminares lo mostrarán), las cinco (o más) muestras deben tomarse y colocarse en el aparato de prueba de modo que se mida la tasa de combustión más alta.

Cuando el material se suministre en anchuras, se cortará una longitud de al menos 500 mm cubriendo todo el ancho. A partir de esto, las muestras se tomarán de manera que estén al menos a 100 mm del borde del material y equidistantes entre sí.

Las muestras se tomarán de la misma manera de los productos terminados, cuando la forma del producto lo permita. Cuando el espesor del producto tiene 13 mm o más, se reducirá a 13 mm mediante un proceso mecánico aplicado al lado que no mira al compartimento del ocupante.

Los materiales compuestos (ver 3.2.) Deberán probarse como si fueran de construcción uniforme.

En el caso de materiales fabricados con capas superpuestas de diferente composición que no sean materiales compuestos, todas las capas de material incluidas a una profundidad de 13 mm desde la superficie que mira hacia el compartimento de ocupantes deberán probarse individualmente.

6.3. Condicionamiento

Las muestras deben acondicionarse durante al menos 24 h pero no más de 7 días a una temperatura de 23 grados centígrados más menor 2 grados centígrados y un pariente humedad del 50 % más menor 5% y se mantendrá bajo estas condiciones hasta inmediatamente antes de la prueba.

7. Procedimiento

- 7.1. Coloque las muestras con las superficies con pelo o con pelo en un piso superficie y peine dos veces contra la siesta usando el peine (5.5).
- 7.2. Coloque la muestra en el portamuestras (5.2) de modo que el lado expuesto quede hacia abajo de la llama.
- 7.3. Ajuste la llama de gas a una altura de 38 mm utilizando la marca en la cámara, cerrándose la entrada de aire del quemador (5.3). Antes de comenzar la primera prueba, la llama debe arder al menos durante 1 minuto para estabilización.
- 7.4. Empuje el portamuestras (5.2) dentro de la cámara de combustión (5.1) para que el extremo de la muestra quede expuesto a la llama, y después de 15 sg. corte el flujo de gas.
- 7.5. La medición del tiempo de combustión comienza en el momento en que el pie de la llama pasa el primer punto de medición. Observe la propagación de la llama en el lado que se quema más rápido que el otro (lado superior o inferior).
- 7.6. La medición del tiempo de combustión se completa cuando la llama llega al último punto de medición o cuando la llama se apaga antes de llegar al último punto de medición. Si la llama no llega al último punto de medición, mida la distancia quemada hasta el punto donde la llama se extinguió. La distancia quemada es la parte descompuesta de la muestra, que es destruido en su superficie o en el interior por la quema.
- 7.7. En tanto la muestra no se encienda o no continúe ardiendo después de que el quemador se haya extinguido, o cuando la llama se extinga antes de alcanzar el primer punto de medición, para que no se mida el tiempo de combustión, tenga en cuenta que la tasa de combustión es 0 mm / min.
- 7.8. Al ejecutar una serie de pruebas o repetir las pruebas, asegúrese de que la cámara de combustión y el portamuestras tengan una temperatura máxima de 30 ° C antes de comenzar la próxima prueba.

8. Cálculo

La tasa de combustión, B, en milímetros por minuto, viene dada por la fórmula.

$$B = \frac{s}{t} * 60$$

Dónde:

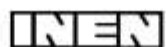
s = es la distancia quemada, en milímetros;

t = es el tiempo, en segundos, para grabar la distancia s.

9. Informe de prueba

- a) Tipo, marcado y color de la muestra de prueba;
- b) si la muestra era un compuesto o una materia única
- c) dimensiones de la muestra, incluidos los valores de espesor máximo y mínimo;
- d) preparación de la muestra, incluido el método para reducir el espesor (si el espesor es mayor a 13 mm) de acuerdo con 6.2;
- e) posición de la muestra en el producto (longitudinal, transversal);
- f) número de muestras analizadas;
- g) resultados de la prueba:
 - distancia quemada, en milímetros, y tiempo de combustión, en Segundos;
 - otras observaciones (autoextinguible, etc.);
- h) Todos los valores individuales calculados de la velocidad de combustión, en milímetros por minuto;
- i) condiciones especiales de prueba (uso de humos, uso de ventilador, etc.)
- j) cualquier condición diferente de las especificadas en esta Norma Internacional;
- k) fecha de la prueba.

Anexo G: Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1323:2009 “VEHÍCULOS AUTOMOTORES, CARROCERIAS DE BUSES, REQUISITOS”.



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA

**NTE INEN 1323:2009
Primera revisión**

VEHICULOS AUTOMOTORES. CARROCERIAS DE BUSES. REQUISITOS.

Primera Edición

ROAD VEHICLES. BUS BODIES. REQUIREMENTS

First Edition

DESCRIPTORES: Ingeniería automotriz, sistemas para vehículos automotores, carrocerías y componentes, buses, requisitos.
MC 01.01-401
CDU: 629.11.011.0
CIRU: 3043
ICS: 43.020.60

Anexo H: Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1668 “VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS INTRARREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTERPROVINCIAL”.



NORMA
TÉCNICA
ECUATORIANA

NTE INEN 1668
Primera revisión

**VEHICULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS
INTRAREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL**

INTRAREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL PUBLIC TRANSPORT VEHICLES

Correspondencia:

DESCRIPTORES: Bus Interprovincial, bus Intraprovincial, minibús, transporte de pasajeros, carrocerías metálicas
ICS: 43.020

30
Páginas

Anexo I: Informe técnico de los ensayos de inflamabilidad de las probetas del material compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz.



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA



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

**INFORME DE ENSAYO DE INFLAMABILIDAD
SEGÚN NORMA ISO 3795**

DICIEMBRE DE 2018
AMBATO – ECUADOR

ANTECEDENTES:

Con fecha 19 de diciembre de 2018, el Sr. Carlos Tonato, domiciliado en la ciudad de Ambato – Tungurahua, solicita al Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para realizar la prueba de inflamabilidad según la norma ISO 3795, en muestras de materias para piezas interiores de carrocerías de buses.

La norma ISO 3795 es una norma internacional que señala la metodología estandarizada que se debe seguir para la “Determinación del comportamiento frente al fuego de los materiales y se aplica a vehículos de carreteras, tractores y maquinarias para agricultura y la silvicultura.

Se reciben 5 muestras o probetas ingresadas bajo el nombre de: Material compuesto (**Resina poliéster combinado con cascarilla de arroz**) de aspecto compuesto del 83% de matriz y 17% de refuerzo. Por anverso: color ocre claro, superficie lisa y forma regular; por reverso: color ocre oscuro, superficie rugosa. Las muestras tienen dimensiones promedias de: 356 mm de largo, 70 mm de ancho y espesor de 4.5 mm.


PROCESO GENERAL:

Según lo indica el método, la prueba de inflamabilidad se realizó sobre sus respectivas submuestras, las cuales se prepararon y manipularon de acuerdo con lo señalado en la norma ISO 3795.

Las pruebas se efectuaron dentro de una cámara extractora de gases, en cuyo interior las muestras se colocaron de manera horizontal en su respectivo, soporte dentro de la cámara de combustión.

Para proporcionar la llama se utilizó un mechero bunsen y gas GLP.

Se efectuaron los ensayos con las réplicas solicitadas y los datos fueron registrados y tabulados.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
Centro de Transferencia y Tecnología			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
DATOS INFORMATIVOS:			
Fecha:	19/12/2018	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales de la FICM		Campus Huachi
Máquina:	Banco de pruebas CTT-FICM		
Realizado por:	Ing. Cristian Pérez	Revisado por:	Ing. Sebastián Villegas
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Tipo de Ensayo:	Prueba de Inflamabilidad	Norma:	ISO 3795
Tipo de material:	Material compuesto (Resina poliéster combinado con cascarilla de arroz)		
Dimensiones (mm):	356 x 70 x 4,5	Nº de probetas:	5
			
Conjunto de muestras antes de las pruebas			
Resultados Según La Norma 3795			
N- De Probetas	Distancia (mm)	Tiempo (s)	Tasa de combustión B(mm/min)
A	254	1688,4	9,03
B	254	2103	7,25
C	254	2042,4	7,46
D	254	1932	7,89
E	254	1567,2	9,72
F	254	1688,4	9,03
Promedio			8,27
Observaciones: Durante el proceso de combustión la llama es no es auto - extingible. Se percibe al inicio una emisión moderada de humo con presencia de hollín y se mantiene durante todo el tiempo de combustión. Las muestras se consumieron por ambos lados de forma homogénea.			



Conclusiones:

- De acuerdo a lo señalado en la norma NTE INEN 1668 año 2015, (Vehículos de transporte Público de Pasajeros Intrarregional, Interprovincial e Intraprovincial), artículo 5.9.2 (Inflamabilidad de los materiales), puedo indicar que las muestras tomadas del Material: MATERIAL COMPUESTO (RESINA POLIESTER COMBINADO CON CASCARILLA DE ARROZ) tienen un índice de 8,27 mm/min. El material analizado cumple con el requisito establecido en la norma (Índice de combustión máximo permisible en la norma es 100 mm/min).
- De acuerdo con lo señalado en la norma NTE INEN 1323 puedo indicar que las muestras tomadas del Material: MATERIAL COMPUESTO (RESINA POLIESTER COMBINADO CON CASCARILLA DE ARROZ) tienen un índice de combustión de 8,27 mm/min. El material analizado cumple con el requisito establecido en la norma (Índice de combustión máximo permisible en la norma es 250 mm/min).



.....
 Ing. Cristian Pérez
TÉCNICO DOCENTE



.....
 Ing. Sebastián Villegas
TÉCNICO DE LABORATORIO




.....
 Ing. Jorge Cevallos
COORDINADOR DE CTT

Anexo J: Informe técnico de los ensayos de inflamabilidad de las probetas del material compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz.



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA

INFORME DE ENSAYO DE INFLAMABILIDAD
SEGÚN NORMA ISO 3795

DICIEMBRE DE 2018
AMBATO – ECUADOR

ANTECEDENTES:

Con fecha 19 de diciembre de 2018, el Sr. Carlos Tonato, domiciliado en la ciudad de Ambato – Tungurahua, solicita al Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para realizar la prueba de inflamabilidad según la norma ISO 3795, en muestras de materias para piezas interiores de carrocerías de buses

La norma ISO 3795 es una norma internacional que señala la metodología estandarizada que se debe seguir para la “Determinación del comportamiento frente al fuego de los materiales” y se aplica a vehículos de carreteras, tractores y maquinarias para agricultura y la silvicultura.

Se reciben 5 muestras o probetas ingresadas bajo el nombre de: **(Resina epóxica combinado con cascarilla de arroz)** de aspecto compuesto del 83% de matriz y 17% de refuerzo. Por anverso: color ocre claro y brillante, superficie lisa y forma regular; por reverso: color ocre oscuro, superficie rugosa. Las muestras tienen dimensiones promedias de: 356 mm de largo, 70 mm de ancho y espesor de 4,5 mm.


PROCESO GENERAL:

Según lo indica el método, la prueba de inflamabilidad se realizó sobre sus respectivas submuestras, las cuales se prepararon y manipularon de acuerdo a lo señalado en la norma ISO 3795.

Las pruebas se efectuaron dentro de una cámara extractora de gases, en cuyo interior las muestras se colocaron de manera horizontal en su respectivo, soporte dentro de la cámara de combustión.

Para proporcionar la llama se utilizó un mechero bunsen y gas GLP.

Se efectuaron los ensayos con las réplicas solicitadas y los datos fueron registrados y tabulados.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
Centro de Transferencia y Tecnología			
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
DATOS INFORMATIVOS:			
Fecha:	19/12/2018	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales de la FICM	Campus Huachi	
Máquina:	Banco de pruebas CTT-FICM		
Realizado por:	Ing. Cristian Pérez	Revisado por:	Ing. Sebastián Villegas
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Tipo de Ensayo:	Prueba de Inflamabilidad	Norma:	ISO 3795
Tipo de material:	Material compuesto (Resina epoxi combinado con cascarilla de arroz)		
Dimensiones (mm):	356 x 70 x 4,5	Nº de probetas:	5
			
Conjunto de muestras antes de las pruebas			
Resultados Según La Norma 3795			
N- De Probetas	Distancia (mm)	Tiempo (s)	Tasa de combustión B(mm/min)
A	254	1158	13,16
B	254	906,6	16,81
C	254	972	15,68
D	254	909	16,77
E	254	904,2	16,85
F	254	1158	13,16
Promedio			15,85
Observaciones: Durante el proceso de combustión la llama es no es auto - extingible. Se percibe al inicio una emisión moderada de humo con presencia de hollín y se mantiene durante todo el tiempo de combustión. Además, se observó que existe desprendimiento del material en la combustión de las probetas epóxicas debido a que la matriz de arroz no está enlazada entre sí. No obstante, el proceso de combustión fue homogéneo.			



Conclusiones:

- De acuerdo con lo señalado en la norma NTE INEN 1668 año 2015, (Vehículos de transporte Público de Pasajeros Intrarregional, Interprovincial e Intraprovincial), artículo 5.9.2 (Inflamabilidad de los materiales), puedo indicar que las muestras tomadas del Material: MATERIAL COMPUESTO (RESINA EPÓXICA COMBINADO CON CASCARILLA DE ARROZ) tienen un índice de 15,85 mm/min. El material analizado cumple con el requisito establecido en la norma (Índice de combustión máximo permisible en la norma es 100 mm/min).
- De acuerdo con lo señalado en la norma NTE INEN 1323 puedo indicar que las muestras tomadas del Material: MATERIAL COMPUESTO (RESINA EPÓXICA COMBINADO CON CASCARILLA DE ARROZ) tienen un índice de combustión de 15,85 mm/min. El material analizado cumple con el requisito establecido en la norma (Índice de combustión máximo permisible en la norma es 250 mm/min).



Ing. Cristian Pérez

TÉCNICO DOCENTE



Ing. Sebastián Villegas

TÉCNICO DE LABORATORIO

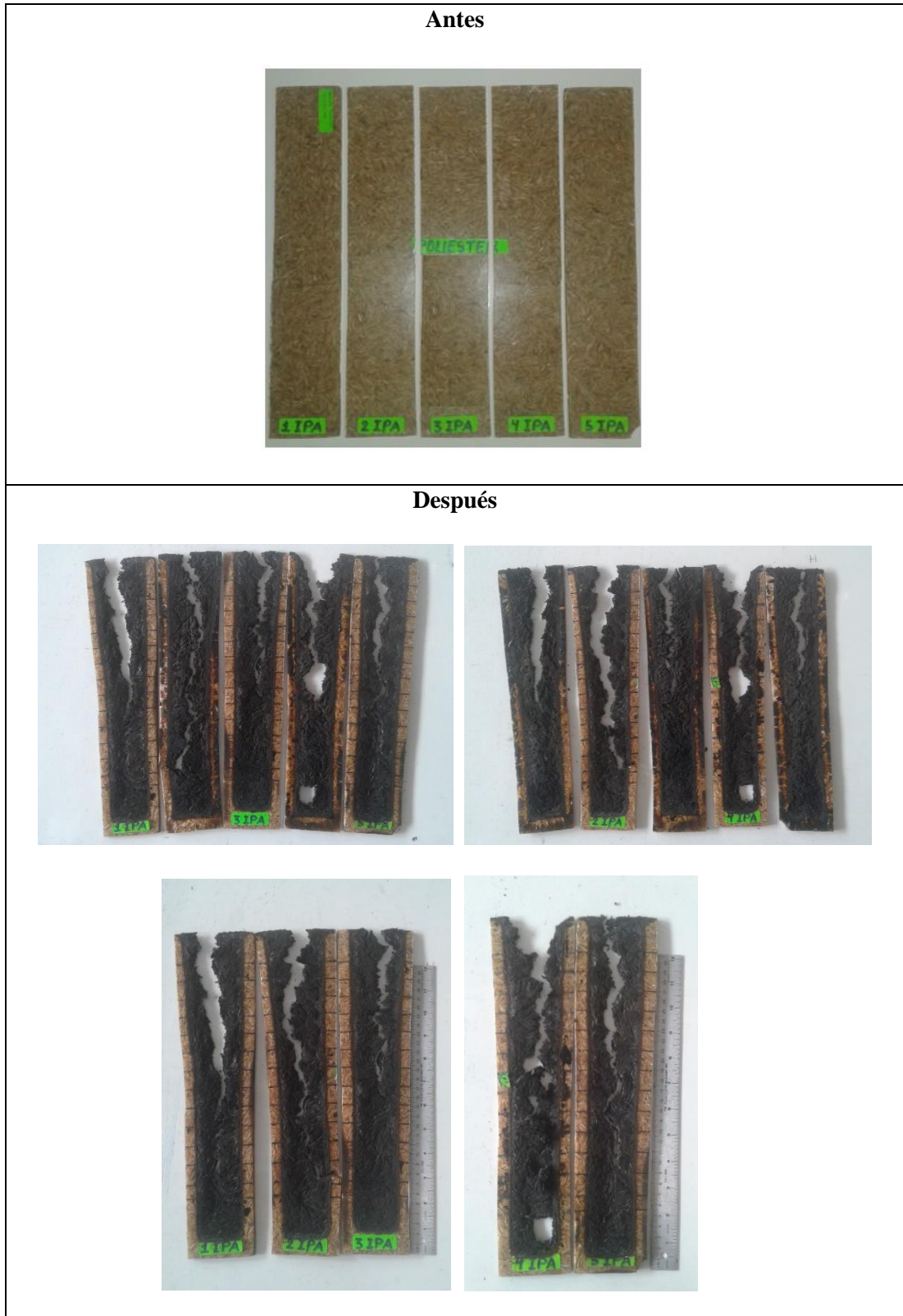



Ing. Jorge Cevallos

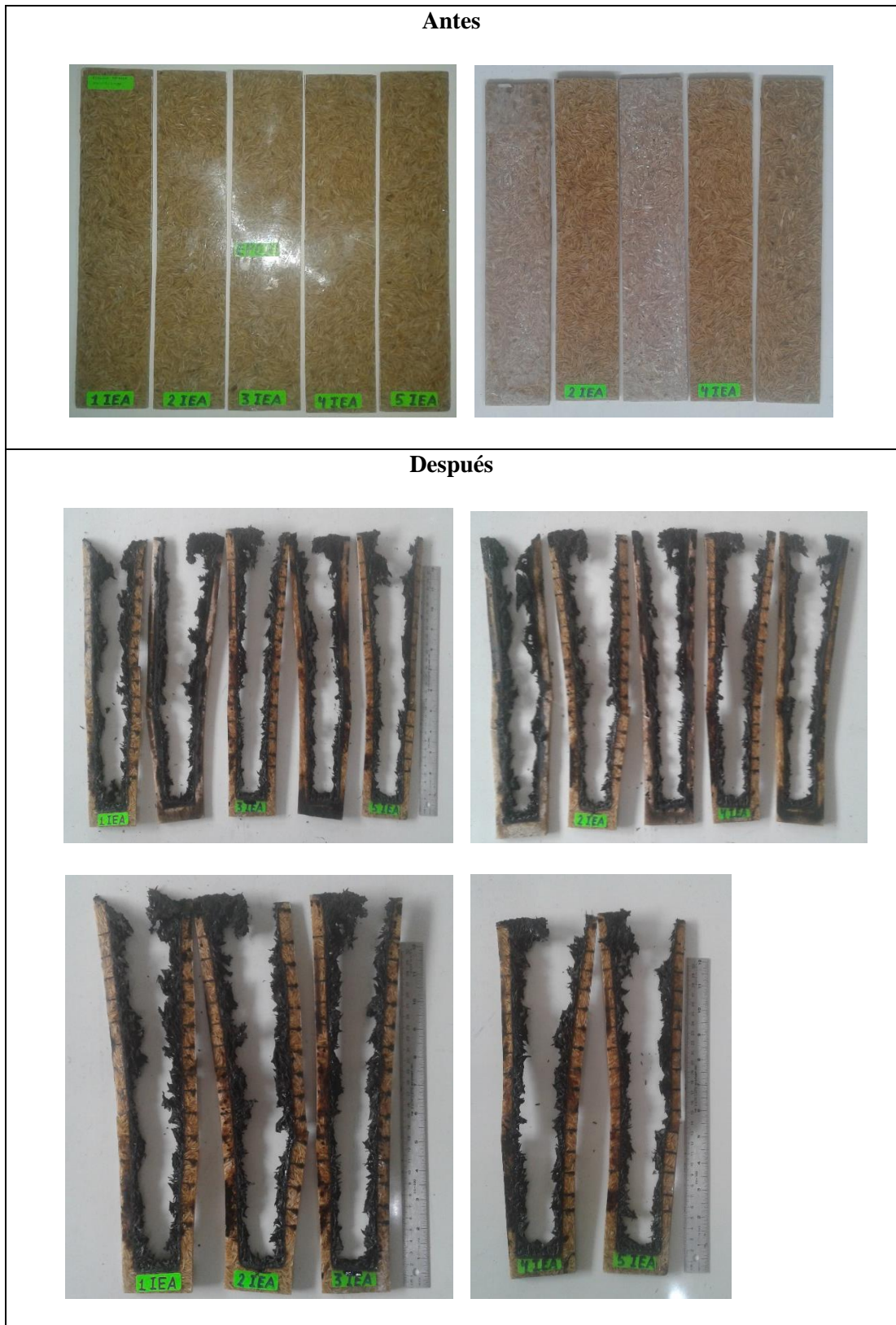
COORDINADOR DE CTT

Anexo K: Probetas antes y después de ser ensayadas en el banco de pruebas de inflamabilidad.

a) Compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz

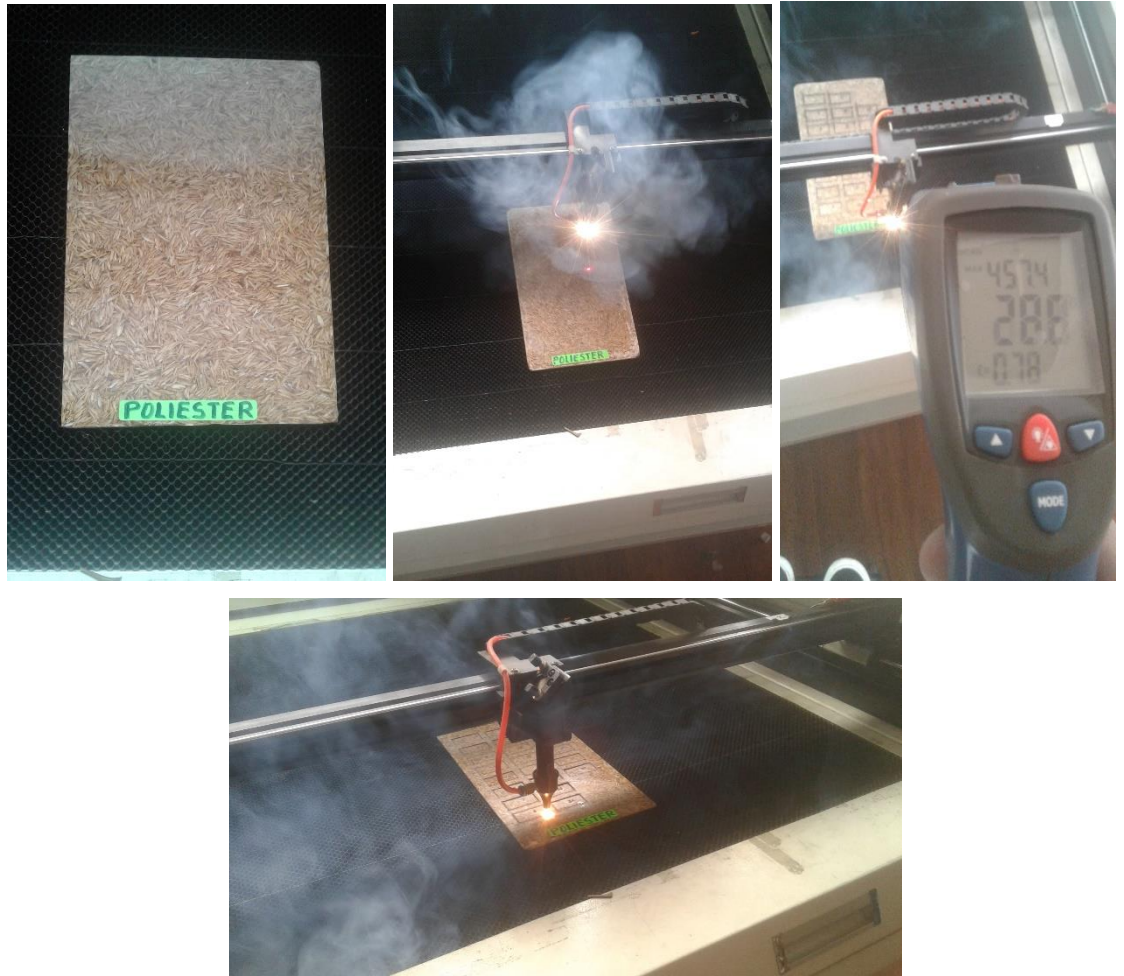


b) Compuesto de matriz epóxica reforzado con cascarilla de arroz

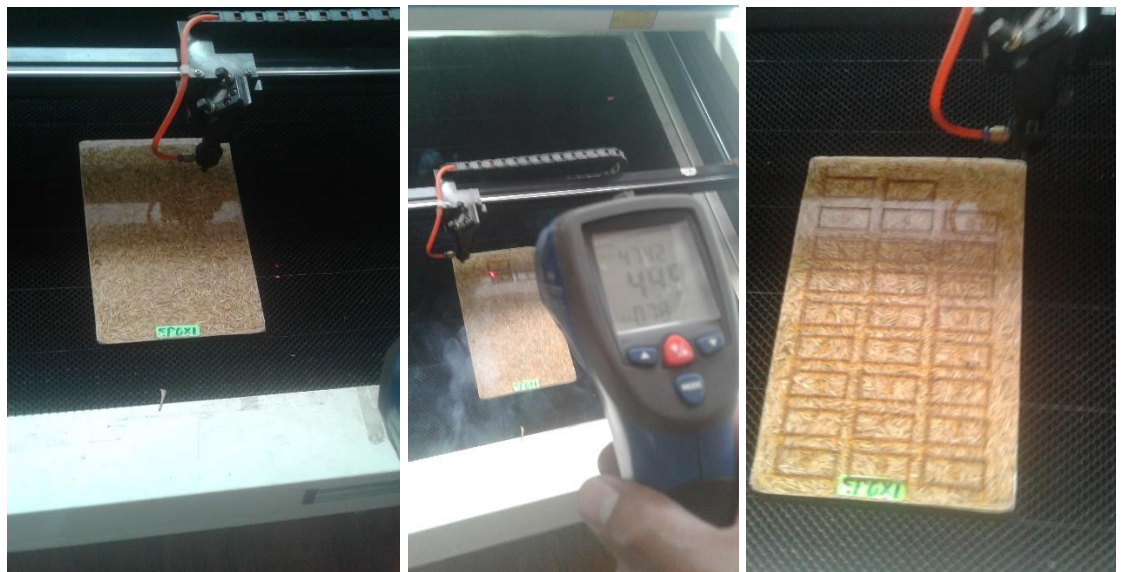


Anexo L: Cortes por láser de CO₂ de los compuestos de matriz poliéster y epóxica.

a) Proceso de corte por láser del compuesto de matriz poliéster.



b) Proceso de corte por láser del compuesto de matriz epóxica



Anexo M: Licencia del software estadístico Minitab 18.1.

o - cf.perez@uta.edu.ec

https://outlook.office.com/owa/?realm=uta.edu.ec&exsvurl=1&ll-cc=3082&modul=0

Factura del pedido: 100652081023

OnTheHub

vie 01/02/2019 11:42

Para Perez Salinas Cristian Fabian <cf.perez@uta.edu.ec>

** Este es un mensaje automático - por favor, no responda ya que no recibirá respuesta.

**

OnTheHub[®] eStore
by Kivuto

Estimado cristian perez:

Gracias por el pedido.

01/02/2019 11:46

o - cf.perez@uta.edu.ec

https://outlook.office.com/owa/?realm=uta.edu.ec&exsvurl=1&ll-cc=3082&modul=0

Todos los detalles sobre su pedido, incluido cualquier clave del producto, código de activación o vínculo de descarga necesarios (si es el caso), están disponibles en su tienda web en [Su cuenta/Pedidos](#).

Si es redirigido a la página de inicio de sesión interna de su organización, tendrá que iniciar sesión con las credenciales proporcionadas por su organización.

Resumen de pedido

Información del pedido

Número de pedido: 100652081023
Fecha del pedido: 2019-02-01 11:39
Hora estándar del Este

Nombre: cristian perez
Correo electrónico: cf.perez@uta.edu.ec
Tarjeta de crédito: MasterCard
*****5407
Esta transacción puede reflejarse como "estore.onthehub.com" en su estado de su cuenta.

Dirección de facturación

cristian perez
Avenida Los Chasquis y Rio Payamino
Tungurahua 180150
Ecuador

Items (Todos los precios están en Dólares estadounidenses)

Vea los detalles para recuperar los artículos de su pedido.

	Cantidad	Precio unitario	Importe
1. Minuta IS (Multilingüe) (26 Minuto (Borrador) - Descripción)	1	\$29.99	\$29.99
2. Extensión Acceso Cuadrante (24 minutos)	1	\$4.95	\$4.95
		Subtotal:	\$34.94
		Impuestos:	--
		Total:	\$34.94

Asegúrese de que toda la información listada a continuación sea correcta y guarde esta factura para su registro.

Si tiene alguna pregunta, consulte la [página de Ayuda de la tienda web](#).

Gracias,
OnTheHub

01/02/2019 11:46

<https://outlook.office.com/owa/?realm=uta.edu.ec&cs=vn1&l&l-cc=3082&mod=1=0>