



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 DE CORTE LÁSER POR CO₂ EN MATERIALES COMPUESTOS:
FIBRA DE VIDRIO (FV) + RESINA POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRIO (FV) +
FIBRA NATURAL (FN) + RESINA POLIÉSTER”.

AUTOR: Rony Rubén Rojas Moposita.

TUTOR: Ing. Mg. Cristian Pérez.

AMBATO - ECUADOR

2018

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: “ESTUDIO DE CORTE LÁSER POR CO₂ EN MATERIALES COMPUESTOS: FIBRA DE VIDRIO (FV) + RESINA POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRIO (FV) + FIBRA NATURAL (FN) + RESINA POLIÉSTER” elaborado por el señor RONY RUBÉN ROJAS MOPOSITA, 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, febrero del 2018

.....

Ing. Mg. Cristian Pérez

DOCENTE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DEL TRABAJO

Declaro que los criterios expresados en el proyecto experimental denominado: “ESTUDIO DE CORTE LÁSER POR CO₂ EN MATERIALES COMPUESTOS: FIBRA DE VIDRIO (FV) + RESINA POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRIO (FV) + FIBRA NATURAL (FN) + RESINA POLIÉSTER”, así como también las ideas, análisis, conclusiones son auténticas y de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor del presente proyecto.

Ambato, febrero del 2018

EL AUTOR

.....

Rony Rubén Rojas Moposita

C.I. 1804445821

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación según las normas de la institución.

Sedo los derechos en línea patrimoniales de este Proyecto Técnico con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto Técnico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, febrero del 2018

EL AUTOR

.....

Rony Rubén Rojas Moposita

CI: 1804445821

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por el egresado Rony Rubén Rojas Moposita de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “ESTUDIO DE CORTE LÁSER POR CO₂ EN MATERIALES COMPUESTOS: FIBRA DE VIDRIO (FV) + RESINA POLIÉSTER (RP), FIBRA DE VIDRIO (FV) + FIBRA NATURAL (FN) + RESINA POLIÉSTER (RP)”

Ambato, marzo 2018

Para constancia firman:

.....

Ing. Mg. Luis Escobar

.....

Ing. Mg. Christian Castro

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación, primero a Dios por haberme brindado la sabiduría e inteligencia para culminar esta etapa de mi vida y a mis padres Gloria Moposita y William Rojas que siempre me inspiraron para salir adelante y quienes estuvieron a mi lado guiándome por el camino del bien y apoyándome siempre para poder culminar mi carrera, así también a mis hermanas Rocio y Liliana por su apoyo incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento más grande es para Dios por la sabiduría e inteligencia que me ha dado para poder culminar esta etapa tan importante de mi vida, a mis padres por estar conmigo en todo momento esforzándose día a día para brindarme su apoyo incondicionalmente durante toda mi formación universitaria, a mis hermanas Rocío y Liliana también por todo su apoyo y por impulsarme día a día para terminar con esta etapa tan importante de mi vida.

A mi tutor Ing. Mg. Cristian Pérez, por el apoyo y guía brindada en todo el proceso de ejecución de mi proyecto de titulación.

A mis amigos en general que me acompañaron en el transcurso de esta etapa universitaria quienes fueron un impulso importante para llegar a la meta.

Finalmente, el agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato y a la carrera de Ingeniería Mecánica que me acogieron y me prepararon durante los últimos 5 años para salir a la vida profesional.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	I
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	II
AUTORÍA DEL TRABAJO	III
DERECHOS DE AUTOR	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VII
RESUMEN EJECUTIVO	XX
CAPÍTULO I.....	1
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1 TEMA	1
1.2 ANTECEDENTES	1
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO II.	5
2. FUNDAMENTACIÓN	5
2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1.1 Ciencia e ingeniería de los materiales.....	5
2.1.1.1 Materiales compuestos	6
2.1.1.2 Fibra de vidrio	7
2.1.1.3 Fibras naturales	8
2.1.1.4 Fibra de cabuya	8

2.1.2 Corte de materiales compuestos.....	9
2.1.2.1 Problemas y soluciones	10
2.1.3 Corte por haz de láser (LBC).....	11
2.1.3.1 Láser.....	11
2.1.3.2 Clasificación.....	12
2.1.4 Láser por CO ₂	13
2.1.5 Parámetros del láser.....	15
2.1.5.1 Potencia.....	15
2.1.5.2 Haz.....	15
2.1.6 Parámetros del material.....	16
2.1.6.1 Propiedades térmicas.....	16
2.1.6.2 Densidad.....	16
2.1.6.3 Difusividad térmica.....	17
2.1.7 Parámetros del proceso.....	17
2.1.7.1 Velocidad de corte.....	17
2.1.7.2 Gas auxiliar	18
2.1.7.3 Forma de la boquilla.....	19
2.1.8 Calidad de corte.....	20
2.1.8.1 Rugosidad superficial	20
2.1.8.2 Rugosímetro	21
2.1.9 Pulso de energía en la superficie.....	21
2.1.10 Diseño experimental (DOE).....	22
2.1.10.1 Diseño factorial	23
2.1.10.2 Diseño factorial 2 ³	23
2.2 HIPÓTESIS.....	24

2.3 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS	24
2.3.1 Variable independiente.....	24
2.3.2 Variable dependiente.....	24
CAPÍTULO III.....	25
3. METODOLOGÍA	25
3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	25
3.1.1 Métodos de investigación.....	25
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	26
3.2.1 Población.....	26
3.2.2 Muestra.....	27
3.2.2.1 Diseño Experimental.....	27
3.2.2.2 Formas geométricas de corte.....	29
3.2.2.3 Espesor de los materiales	30
3.2.2.4 Parámetros de entrada para el compuesto tradicional	31
3.2.2.5 Parámetros de entrada para el compuesto híbrido.....	32
3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	33
3.3.1 Variable independiente.....	34
3.3.2 Variable dependiente.....	35
3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	36
3.5 PLAN PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS.....	36
3.5.1 Diagrama del proceso.....	36
3.5.2 Procesamiento.....	40
3.5.2.1 Composición de los materiales.....	40
3.5.2.2 Tabulación de pesos totales de fibras y resina	42
3.5.2.3 Obtención del molde base	42

3.5.2.4 Obtención de la fibra de cabuya	43
3.5.2.5 Tejido de la fibra de cabuya	43
3.5.2.6 Fabricación de los compuestos: tradicional e híbrido	44
3.5.2.7 Curación y desmontaje	45
3.5.2.8 Ensayos preliminares de corte láser	46
3.5.2.9 Selección de parámetros de entrada	48
3.5.2.10 Ensayos reales de corte láser.....	48
3.5.2.11 Fabricación de porta probeta.....	54
3.5.2.12 Rugosímetro	55
3.5.2.13 Calibración de rugosímetro	56
3.5.2.14 Medición de la rugosidad.....	57
3.5.2.15 Efecto térmico láser.....	58
CAPÍTULO IV	60
4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	60
4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS	60
4.1.1 Compuesto tradicional.....	60
4.1.1.1 Temperaturas medidas con el pirómetro	60
4.1.1.2 Mediciones de la rugosidad.....	62
4.1.1.3 Densidad.....	64
4.1.1.4 Temperatura superficial calculada	66
4.1.1.5 Tabulación y selección de temperaturas superficiales	69
4.1.1.6 Distribución de temperaturas a diferentes espesores.....	70
4.1.2 Compuesto híbrido.....	74
4.1.2.1 Temperaturas medidas con el pirómetro	74
4.1.2.2 Mediciones de la rugosidad.....	75

4.1.2.3 Densidad.....	77
4.1.2.4 Temperatura superficial calculada	78
4.1.2.5 Tabulación y selección de temperaturas superficiales	81
4.1.2.6 Distribución de temperaturas a diferentes espesores.....	82
4.1.3 Temperaturas críticas.....	86
4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	88
4.2.1 Análisis de rugosidad (Ra) del compuesto tradicional formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio.....	88
4.2.1.1 Prueba de normalidad de los datos de rugosidad (Ra)	88
4.2.1.2 Análisis del diseño factorial de la rugosidad (Ra) del compuesto tradicional.....	89
4.2.2 Análisis de rugosidad (Ra) del compuesto híbrido formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio y cabuya.....	90
4.2.2.1 Prueba de normalidad de los datos de rugosidad (Ra)	91
4.2.2.2 Análisis del diseño factorial de la rugosidad (Ra) del compuesto híbrido...	92
4.2.3 Análisis de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio.....	93
4.2.3.1 Prueba de normalidad de los datos de la temperatura crítica de corte (T)	93
4.2.3.2 Análisis del diseño factorial de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional	94
4.2.4 Análisis de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto híbrido formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio y cabuya.....	96
4.2.4.1 Prueba de normalidad de los datos de la temperatura crítica de corte (T)	96
4.2.4.2 Análisis del diseño factorial de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto híbrido	98
4.2.5 Interpretación y selección de resultados.....	99

4.2.5.1 Rugosidad superficial (Ra) óptima.....	99
4.2.5.2 Temperatura crítica (T) óptima	100
4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS	101
4.3.1 ANOVA y verificación de hipótesis específicas de la rugosidad superficial (Ra).....	101
4.3.1.1 Compuesto tradicional.....	102
4.3.1.2 Compuesto híbrido	102
4.3.2 ANOVA y verificación de hipótesis específicas de la temperatura crítica (T) de corte.....	103
4.3.2.1 Compuesto tradicional.....	103
4.3.2.2 Compuesto híbrido	104
CAPÍTULO V.....	106
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
5.1 CONCLUSIONES	106
5.2 RECOMENDACIONES	108

ÍNDICE DE GRÁFICOS Y TABLAS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características mecánicas de la fibra de cabuya.....	9
Tabla 2-2 Comparación para diferentes materiales.....	13
Tabla 2-3 Rugosidad permitida para cada proceso.	20
Tabla 2-4 Modelo Experimental de Tres Factores.....	23
Tabla 3-1 Características de la máquina utilizada.....	28
Tabla 3-2 Factores controlables.	29
Tabla 3-3 Factores no controlables.	29
Tabla 3-4 Salida o respuesta.	29
Tabla 3-5 Propiedades físicas del compuesto tradicional (FV + RP).	31
Tabla 3-6 Parámetros y niveles de entrada.	32
Tabla 3-7 Factores y niveles del compuesto tradicional.	32
Tabla 3-8 Número de probetas para el compuesto tradicional.....	32
Tabla 3-9 Parámetros y niveles de entrada.	33
Tabla 3-10 Factores y niveles del compuesto híbrido.....	33
Tabla 3-11 Número de probetas para el compuesto híbrido	33
Tabla 3-12 Operacionalización de variable independiente.	34
Tabla 3-13 Operacionalización de variable dependiente.	35
Tabla 3-14 Pesos totales de fibras y resina.	42
Tabla 3-15 Parámetros en cortes preliminares del compuesto tradicional.....	46
Tabla 3-16 Parámetros en cortes preliminares del compuesto híbrido.	47
Tabla 3-17 Parámetros seleccionados del compuesto tradicional.....	48
Tabla 3-18 Parámetros seleccionados del compuesto híbrido.	48
Tabla 3-19 Parámetros combinados utilizados en los cortes láser reales del compuesto tradicional.	51
Tabla 3-20 Parámetros combinados utilizados en los cortes láser reales del compuesto híbrido.....	53
Tabla 4-1 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas rectangulares de la réplica 1	60

Tabla 4-2 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas circulares de la réplica 1.	61
Tabla 4-3 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas rectangulares de la réplica 2.	61
Tabla 4-4 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas circulares de la réplica 2	62
Tabla 4-5 Resultados de la rugosidad superficial, compuesto tradicional	62
Tabla 4-6 Medición de masa promedio, compuesto tradicional	64
Tabla 4-7 Propiedades y datos generales para los cálculos del compuesto tradicional	66
Tabla 4-8 Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto tradicional, probetas rectangulares	67
Tabla 4-9 Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto tradicional, probetas circulares.	68
Tabla 4-10 Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto tradicional, probetas rectangulares.	69
Tabla 4-11 Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto tradicional, probetas circulares.	69
Tabla 4-12 Datos para cálculos de distribución de temperaturas en el compuesto tradicional.	70
Tabla 4-13 Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas rectangulares, réplica 1.	70
Tabla 4-14 Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas circulares, réplica 1.	71
Tabla 4-15 Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas rectangulares, réplica 2.	72
Tabla 4-16 Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas circulares, réplica 2.	73
Tabla 4-17 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas rectangulares de la réplica 1	74

Tabla 4-18 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas circulares de la réplica 1.	74
Tabla 4-19 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas rectangulares de la réplica 2.	75
Tabla 4-20 Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas circulares de la réplica 2.	75
Tabla 4-21 Resultados de la rugosidad superficial, compuesto híbrido.....	75
Tabla 4-22 Medición de masa promedio, compuesto tradicional.	77
Tabla 4-23 Propiedades y datos generales para los cálculos del compuesto híbrido.	78
Tabla 4-24 Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto híbrido, probetas rectangulares	79
Tabla 4-25 Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto híbrido, probetas circulares.....	80
Tabla 4-26 Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto híbrido, probetas rectangulares	81
Tabla 4-27 Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto híbrido, probetas circulares.	81
Tabla 4-28 Datos para cálculos de distribución de temperaturas en el compuesto híbrido	82
Tabla 4-29 Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas rectangulares, réplica 1.....	82
Tabla 4-30 Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas circulares, réplica 1	83
Tabla 4-31 Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas rectangulares, réplica 2.....	84
Tabla 4-32 Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas circulares, réplica 2.	85
Tabla 4-33 Temperaturas críticas del compuesto tradicional, probetas rectangulares	86
Tabla 4-34 Temperaturas críticas del compuesto tradicional, probetas circulares.	86

Tabla 4-35 Temperaturas críticas del compuesto híbrido, probetas rectangulares.	87
Tabla 4-36 Temperaturas críticas del compuesto híbrido, probetas circulares.....	87
Tabla 4-37 Factores de corte para una rugosidad óptima del compuesto tradicional.	99
Tabla 4-38 Factores de corte para una rugosidad óptima del compuesto híbrido.	100
Tabla 4-39 Factores de corte para una temperatura óptima del compuesto tradicional	100
Tabla 4-40 Factores de corte para una temperatura óptima del compuesto híbrido.	101
Tabla 4-41 Verificación de hipótesis con respecto a la rugosidad del compuesto tradicional.....	102
Tabla 4-42 Verificación de la hipótesis con respecto a la rugosidad del compuesto híbrido.	103
Tabla 4-43 Verificación de la hipótesis con respecto a la temperatura crítica del compuesto tradicional.	103
Tabla 4-44 Verificación de hipótesis con respecto a la temperatura crítica del compuesto híbrido.....	104

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 2-1 La evolución de la ingeniería de materiales con el tiempo	5
Figura 2-2 Material compuesto a escala microscópica.	6
Figura 2-3 Palo de golf fabricado en material compuesto.	7
Figura 2-4 Poder de aislamiento de la fibra de vidrio.	8
Figura 2-5 Planta de Cabuya.	8
Figura 2-6 Mecanizado CNC en fibra de vidrio.	9
Figura 2-7 Esquema del corte por láser.	12
Figura 2-8 Espectro electromagnético.	14
Figura 2-9 Proceso de corte por láser de CO ₂	15
Figura 2-10 Haz de láser: tipos.	16
Figura 2-11 Variación de la velocidad de corte con el grosor de la pieza.	18
Figura 2-12 Diseños de boquillas para corte láser	19
Figura 2-13 Rugosímetro.	21
Figura 3-1 Máquina cortadora láser utilizada.	27
Figura 3-2 Variables del proceso a experimentar.	28
Figura 3-3 Modelo general del experimento.	29
Figura 3-4 Formas Geométricas de Corte: a) Rectangular y b) Circular	30
Figura 3-5 Dimensionamiento plancha base para cada compuesto.	30
Figura 3-6 Molde base.	42
Figura 3-7 Fibra de cabuya peinada.	43
Figura 3-8 Tejido de fibra de cabuya.	43
Figura 3-9 Materiales.	44
Figura 3-10 Equipos y herramientas.	44
Figura 3-11 Equipo de protección personal	45
Figura 3-12 Curación de los compuestos.	45
Figura 3-13 Compuestos desmontados.	45
Figura 3-14 Cortes preliminares del compuesto tradicional	46
Figura 3-15 Cortes preliminares del compuesto híbrido.	47
Figura 3-16 Proceso de corte láser	49
Figura 3-17 Codificación para el compuesto tradicional.	49

Figura 3-18 Codificación para el compuesto Híbrido.....	49
Figura 3-19 Cortes láser reales de probetas del compuesto tradicional.....	50
Figura 3-20 Cortes láser reales de probetas del compuesto híbrido.....	52
Figura 3-21 Diseño porta probetas.....	54
Figura 3-22 Eje SAE 1018 de 2,5".	54
Figura 3-23 Porta probeta terminada.....	54
Figura 3-24 Rugosímetro MITUTOYO SJ 210.	55
Figura 3-25 Rugosímetro ensamblado.	55
Figura 3-26 Galga de calibración.....	56
Figura 3-27 Ubicación para calibración.....	56
Figura 3-28 Calibración correcta.	56
Figura 3-29 Ubicación de probeta y rugosímetro.	57
Figura 3-30 Medición de la rugosidad.	57
Figura 3-31 Medición de la temperatura superficial con el pirómetro.....	58
Figura 3-32 Medición de las masas de todas las probetas de los dos compuestos: tradicional e híbrido.	58
Figura 4-1 Probabilidad normal de la rugosidad (Ra), compuesto tradicional. ...	88
Figura 4-2 Efectos principales de la rugosidad (Ra), compuesto tradicional.	89
Figura 4-3 Interacción para la rugosidad (Ra), compuesto tradicional.....	90
Figura 4-4 Probabilidad normal de la rugosidad (Ra), compuesto híbrido.....	91
Figura 4-5 Efectos principales de la rugosidad (Ra), compuesto híbrido.....	92
Figura 4-6 Interacción para la rugosidad (Ra), compuesto híbrido.	92
Figura 4-7 Probabilidad normal de la temperatura crítica (T), compuesto tradicional.....	94
Figura 4-8 Efectos principales de la temperatura crítica (T), compuesto tradicional.	95
Figura 4-9 Interacción para la temperatura crítica (T), compuesto tradicional....	95
Figura 4-10 Probabilidad normal de la temperatura crítica (T), compuesto híbrido	97
Figura 4-11 Efectos principales de la temperatura crítica (T), compuesto híbrido	98

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo experimental realizado en dos tipos de materiales: compuesto (fibra de vidrio y resina poliéster) e híbrido (fibra de vidrio, fibra de cabuya y resina poliéster), fabricados por el autor en formas de planchas individualmente bajo especificaciones establecidas fueron sometidas al proceso de corte láser por CO₂, con la finalidad de determinar los parámetros adecuados que brinden una gran calidad de corte en los materiales ya antes mencionados. Se realizaron pruebas de corte experimentales para poder definir los parámetros manipulables y el rango de los mismos; dichos parámetros fueron la potencia de la máquina, la velocidad de corte y distintas geometrías para evaluar la precisión del proceso.

Una vez realizadas las pruebas preliminares se procedió a la realización del diseño experimental (DOE) para definir las distintas combinaciones entre potencia, velocidad y geometría de corte existentes con las cuales se determinaron un número de 36 combinaciones para cada uno de los materiales. La máquina láser con la cual se realizaron los distintos cortes es de la marca NICE CUT modelo NC-1612 que tiene un rango máximo de 100W de potencia y su gas auxiliar es CO₂ perteneciente a MASTER GRAFIC: CNC LÁSER – CNC ROUTER – CNC PLASMA ubicado en la ciudad de Ambato por lo que hizo posible la realización de los ensayos.

La calidad de corte se la evaluó en base a la rugosidad superficial (Ra) y a la temperatura crítica (T) de corte, se utilizó un rugosímetro Mitutoyo SJ-210 para la medición de la rugosidad y para determinar la temperatura se realizaron cálculos térmicos del caso denominado “pulso de energía sobre una superficie”; se tomaron medidas de la temperatura en la superficie mientras se cortaban con un pirómetro CEM DT – 8867H comprobando así las temperaturas calculadas.

Finalmente se definieron los parámetros óptimos que brindaron una buena rugosidad superficial con la menor temperatura crítica que disminuye sin duda la cantidad de material quemado en el proceso de corte láser por CO₂ brindando así una buena calidad de corte.

ABSTRACT

The present experimental work carried out in two types of materials: composite (glass fiber and polyester resin) and hybrid (fiberglass, cabuya fiber and polyester resin), manufactured by the author in individual plate forms under established specifications were submitted to the laser cutting process by CO₂, in order to determine the appropriate parameters that provide a high quality of cut in the aforementioned materials. Experimental cutting tests were carried out in order to define the manipulable parameters and the range of them; These parameters were the power of the machine, the cutting speed and different geometries to evaluate the precision of the process.

Once the preliminary tests were carried out, the experimental design (DOE) was carried out to define the different combinations between power, speed and existing cutting geometry with which a number of 36 combinations were determined for each of the materials. The laser machine with which the different cuts were made is of the brand NICE CUT model NC-1612 that has a maximum range of 100W of power and its auxiliary gas is CO₂ belonging to MASTER GRAFIC: CNC LASER - CNC ROUTER - CNC PLASMA located in the city of Ambato for what made possible the realization of the tests.

The cut quality was evaluated based on the surface roughness (Ra) and the critical temperature (T) of the cut, a Mitutoyo SJ-210 rugosimeter was used to measure the roughness and thermal calculations were carried out to determine the temperature. case called "pulse of energy on a surface"; measurements of surface temperature were taken while cutting with a CEM DT - 8867H pyrometer, thus checking the calculated temperatures.

Finally, the optimal parameters that gave a good surface roughness with the lowest critical temperature were defined, which undoubtedly reduces the amount of material burned in the laser cutting process by CO₂ thus providing a good quality of cut.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 TEMA

“ESTUDIO DE CORTE LÁSER POR CO₂ EN MATERIALES COMPUESTOS: FIBRA DE VIDRIO (FV) + RESINA POLIÉSTER, FIBRA DE VIDRIO (FV) + FIBRA NATURAL (FN) + RESINA POLIÉSTER”

1.2 ANTECEDENTES

El uso de materiales compuestos cada vez es más grande debido a sus diversas propiedades; entre los materiales compuestos más utilizados se encuentran las diferentes fibras como: fibra de vidrio y fibras naturales como refuerzo y con resina poliéster como matriz.

En la industria carrocería y aeronáutica utilizan estos materiales compuestos, pero en nuestro País no existe un estudio de corte que sea rápido, eficiente y de buena calidad como lo haría el corte mediante láser por CO₂ para los materiales compuestos ya antes mencionados [1].

Cuando un material polimérico es cortado mediante láser de CO₂, está influenciada por diversos factores como: velocidad de corte, potencia de láser, presión de gas y la posición de focal; los mismos que van establecidos para distintos espesores del material que se va a cortar, con el fin de obtener una alta calidad del corte; es decir, obtener un corte totalmente recto y sin imperfecciones o estrías [1].

Las ventajas más importantes al realizar un corte mediante láser a diferencia de los sistemas convencionales existentes son:

- La concentración de la energía se da en una zona muy pequeña del material sin afectar el resto.
- La eliminación de vibraciones ya que interactúa únicamente el haz con el material, con lo que no es necesario sujetar el material que se va a cortar.

- Se puede manipular la radiación con la que se quiere cortar.
- Grandes posibilidades de acoplarla con procesos automáticos [2].

Ciertos parámetros de corte para materiales compuestos de madera, definieron que la posición más idónea se centra en la superficie, utilizando una potencia de láser de 400 a 500W y a una velocidad de corte que va de 20 in/min; también partió utilizando aire comprimido con una boquilla de 0,05 in de diámetro; siendo estos parámetros un gran aporte para futuros estudios incluyendo el presente trabajo [2].

El láser se hizo popular en muchas aplicaciones dentro de la industria, como por ejemplo el procesamiento de materiales, en el cual interviene el corte de estructuras de ingeniería debido a su gran densidad de potencia y requerimientos de precisión [3].

Por medio del corte por láser es posible el corte de varios materiales avanzados, como son los metales, plásticos, cauchos, madera, cerámica y materiales compuestos. El objetivo de estos estudios es analizar el efecto que tiene la variación de los parámetros del corte en las características de calidad del mismo; el corte de la madera con láser es una de las primeras en aparecer dentro del procesamiento de materiales en las industrias de embalajes para el corte de las molduras de madera contrachapada; los sistemas láser son muy utilizados debido a la ventaja que tienen para cortar patrones de geometrías complicadas en la actualidad [3].

1.3 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo experimental está enfocado al área de manufactura más específicamente a la calidad del acabado superficial, debido a la necesidad de un sistema de corte para materiales compuestos como es la fibra de vidrio (FV) + resina poliéster y fibra de vidrio (FV) + fibra natural (FN) + resina poliéster que

son los materiales en los que está enfocado el presente trabajo, el mismo que busca acabados de calidad en el corte mediante la tecnología de láser por CO₂; ya que actualmente el único método de corte utilizado para estos tipos de materiales es el mecánico, pero este método de corte tan utilizado actualmente no brinda un acabado de calidad para ciertas aplicaciones.

Actualmente ya se utiliza el corte láser por CO₂ para diferentes materiales como el acero y la madera, el mismo que ha dado resultados de calidad en el proceso de corte; debido a estos antecedentes y a la disposición de los materiales compuestos de fibra de vidrio (FV) + resina poliéster y fibra de vidrio (FV) + fibra natural (FN) + resina poliéster, que se encuentran disponibles en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, se realizó el planteamiento del ya mencionado trabajo experimental.

La puesta en marcha de este trabajo abre las puertas para futuras investigaciones del proceso de corte láser en otros tipos de materiales compuestos, ya que este tipo de materiales cada vez ganan más campo en las industrias debido a sus propiedades; y con la existencia de un sistema de corte que sea rápido, eficiente y de calidad para estos materiales como lo es por láser, las grandes industrias podrían implementar este sistema para procesos que se realicen en cadena utilizando materiales compuestos.

Los principales beneficiarios de dicho trabajo experimental serían los mismos estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica, los cuales podrían utilizar este sistema de corte para proyectos en general que se compongan de partes con geometría compleja; en los cuales puedan reemplazar materiales como el metal por los distintos materiales compuestos ya que existiría un sistema de corte adecuado y con acabados de calidad.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Estudiar los parámetros de corte láser por CO₂ en materiales compuestos: Fibra de vidrio (FV) + resina poliéster, Fibra de Vidrio (FV) + Fibra Natural (FN) + resina poliéster.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar de manera experimental la presente investigación de corte láser por CO₂ en los materiales compuestos ya mencionados.
- Desarrollar pruebas experimentales en los materiales compuestos en diferentes estratificaciones.
- Analizar la calidad de corte en base a la rugosidad y el efecto térmico láser presentado del mismo.

CAPÍTULO II.

FUNDAMENTACIÓN

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1.1 Ciencia e ingeniería de los materiales

El hombre ha evolucionado y junto a él también los materiales y la ingeniería, han evolucionado en el pasar del tiempo y lo siguen haciendo; el mundo actualmente experimenta cambios dinámicos al igual que los materiales, en gran parte el progreso industrial ha dependido de las mejoras y los avances que presentan los materiales con los que se trabaja actualmente [4].

En la figura 2-1 se ilustra una predicción que está basada en hipótesis de arqueólogos en el transcurso del tiempo.

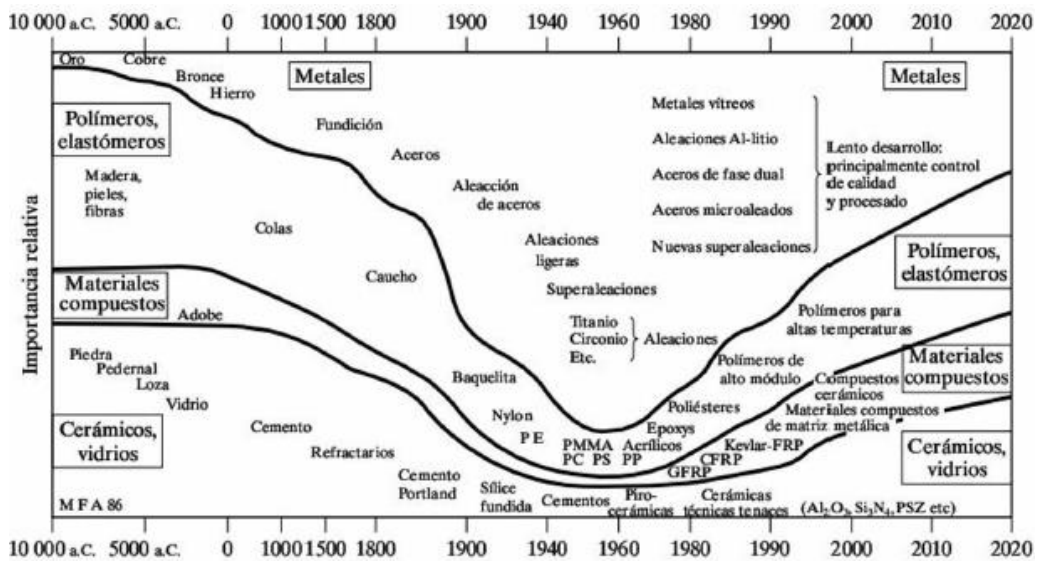


Figura 2-1. La evolución de la ingeniería de materiales con el tiempo. Fuente: Introducción a la ciencia de materiales; Shackelford [5]

La elección de un material idóneo es un problema que se presenta normalmente, ya que actualmente existen un sin número de materiales; al momento de elegir uno de estos materiales se debe considerar diferentes criterios para tomar la decisión final. Estos criterios están basados en las condiciones de servicio que

tendrá el material, así como las propiedades requeridas del material; un ejemplo claro de estas propiedades son la resistencia y ductilidad, que son regularmente las propiedades que definen la elección final del material [6].

2.1.1.1 Materiales compuestos

Se define a un material compuesto como la unión de dos o más materiales para formar un nuevo; estos materiales conservan sus propiedades iniciales de cada uno y el nuevo material compuesto obtendrá propiedades distintas a las de cada uno de los que fue conformado. La composición de la mayoría de estos materiales se forma por la unión de un material de relleno o conocido también como de refuerzo, con la unión de una resina aglomerante específica con el objeto de conseguir ciertas características y propiedades [4].

Un claro ejemplo de material compuesto más conocido es el plástico reforzado con fibra de vidrio; este material está formado por una cierta cantidad de fibras de vidrio compactadas en una matriz polimérica. Este material compuesto es bastante bueno; ya que reúne las mejores características de cada uno de sus componentes [5].

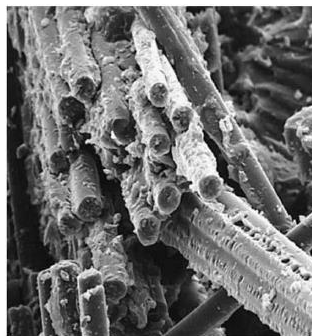


Figura 2-2. Material compuesto a escala microscópica. Fuente: Introducción a la ciencia de materiales; Shachelford [5]

La fibra de vidrio tiene una resistencia mecánica alta debido a que se compone de vidrio, y debido a la combinación del polímero se hace flexible; por todo esto los materiales que se desarrollan actualmente son materiales compuestos [6].



Figura 2-3. Palo de golf fabricado en material compuesto. Fuente: Introducción a la ciencia de materiales; Shackelford [5]

2.1.1.2 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es utilizada como material de refuerzo en matrices de plástico formando así ciertos compuestos estructurales al igual que compuestos para moldeo; estos materiales compuestos por plástico y con la fibra de vidrio tienen ciertas características que son muy favorables como por ejemplo: la relación entre resistencia – peso es muy alta, la estabilidad dimensional es muy buena al igual que resistencia al calor, al frío, la humedad y corrosión, excelentes propiedades de aislamiento tipo eléctrico; pero lo que la hace muy usada es el costo y la facilidad de fabricación.

Existen dos tipos de vidrio utilizados en la producción de la fibra, estos son los vidrios tipo E (eléctricos) y S (alta resistencia) [4].

La fibra de vidrio ha revolucionado en la técnica del aislamiento térmico, es incombustible y no se degrada fácilmente; además, es muy liviano y de fácil colocación. A continuación, se muestran las equivalencias comparativas con otros materiales que tienen 3cm de fibra de vidrio en función a su poder aislante térmico [7].

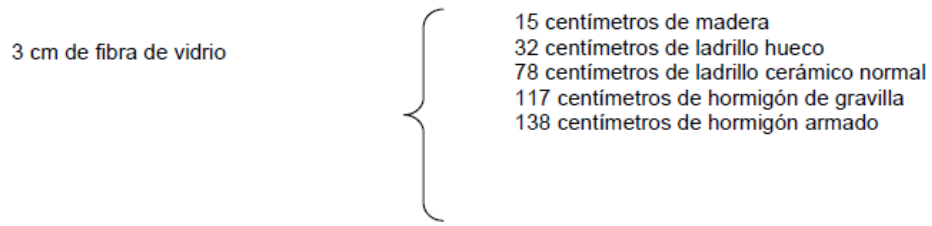


Figura 2-4. Poder de aislamiento de la fibra de vidrio. Fuente: Fibra de vidrio, pruebas y aplicaciones; Morales Ortuño [7]

2.1.1.3 Fibras naturales

Este tipo de fibras son sustancias las cuales se producen por medio de plantas y animales de formas alargadas, las mismas que pueden ser hiladas obteniendo así hebras o trozos de hilos; las fibras naturales se clasifican en dos tipos: vegetales y animales [8].

2.1.1.4 Fibra de cabuya

Está dentro de las fibras llamadas duras, dentro de las cuales se encuentran las fibras que provienen de hojas de ciertas plantas como el abacá, plátano y formio. Son llamadas fibras duras debido a que son de mayor grosor, son más rígidas y ásperas ya que tienen grandes cantidades de lignina a diferencia de otros tipos de fibras [1].



Figura 2-5. Planta de Cabuya. Fuente: Autor

La hoja de la cabuya es de donde se extrae esta fibra, esta planta crece de forma silvestre y es cultivada en los valles y laderas. Esta planta es distribuida y comercializada de manera libre en el sector de la sierra y puede alcanzar la altura de hasta 1,5 metros. Las propiedades mecánicas de esta fibra se muestran a continuación.

Tabla 2-1. Características mecánicas de la fibra de cabuya. Fuente: Lohr Rodríguez, Calidad del borde cortado en PMMA por láser de CO₂ [1]

Resistencia a la tracción	305 (MPa)
Resistencia al corte	112 (MPa)
Módulo de elasticidad	7,5 (MPa)
Elongación a la fractura	5 %
Densidad	1,3 g/cm ³

2.1.2 Corte de materiales compuestos

Los materiales compuestos son fabricados casi en su totalidad en la forma final deseada; por esto, las operaciones de mecanizado son pocas; una de estas es el fresado, que es realizado para reducir el material a un contorno final; otra operación es el taladrado, realizado para unir el material con otros elementos, estos pueden ser o no materiales compuestos. Estas operaciones resultan por lo general ser complicadas, por esto es necesaria la investigación sobre el comportamiento de los materiales compuestos en diferentes procesos de mecanizado y corte [10].



Figura 2-6. Mecanizado CNC en fibra de vidrio. Fuente: https://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10773/PFC_Laura_Montero_Garcia.pdf

2.1.2.1 Problemas y soluciones

Existen varias dificultades en el proceso de mecanizado y corte en materiales compuestos como son:

- Coexistencia de una matriz blanda con uno resistente o abrasivo como el material Kevlar, este material es difíciles mecanizar.
- Los materiales heterogéneos se mecanizan bien pero solo en un sentido, por consecuencia un lado puede quedar con un acabado de corte perfecto pero los lados transversales podrían quedar dañados.
- Al momento de realizar el corte existen grandes posibilidades de producir delaminación, romper su estructura o quemarlo [10].

El último de estos problemas es el más grande y al que más se le debe atacar para disminuir o eliminare el riesgo por completo; ya que estos materiales tienen un sin número de valores añadidos por su proceso de fabricación al que son expuestos antes de ser cortados, y por esto se han tomado ciertas medidas para evitar la mayoría de estos problemas como son:

- La inexistencia de fluido refrigerante al provocar rozamiento en la zona de corte; la presencia de altas temperaturas en el proceso de corte genera degradación en el material; para lo cual se debe realizar el corte con un proceso adecuado, el mismo que se debe refrigerar con aire a presión y no con fluidos refrigerantes ya que estos generan degradación deformaciones y reacciones químicas en la zona de corte [10].
- La aparición de microgrietas; para procesos de corte tradicionales se los debe realizar con herramientas bien afiladas ya que esto evita un calentamiento excesivo en el material [10].

- Deterioro mecánico que produce delaminación del material compuesto; para lo cual el corte se lo debe realizar en dirección del sentido de las fibras para mejorar la calidad [10].

2.1.3 Corte por haz de láser (LBC)

2.1.3.1 Láser

La palabra láser son siglas formadas de “light amplification by stimulated emission of radiation”, lo que en nuestro idioma significa “amplificación de luz por emisión estimulada de radiación” [16].

En su gran mayoría los materiales pueden ser cortados por algún tipo de láser como son los metales, la madera, los plásticos, el caucho y materiales compuestos, entre otros; por otro lado, existen ciertos materiales que no se pueden cortar por cualquier tipo de láser por razones grandes de seguridad. El principio fundamental científico presente en el corte por láser de cualquier tipo de materiales es el mismo que ocurre en el corte por láser mediante CO₂ [11].

El haz del láser mediante un lente de enfoque se centra principalmente en la superficie del material; esto conlleva al calentamiento de la superficie del material en un volumen muy pequeño, dicho volumen se calienta, funde y se vaporiza velozmente por su alta temperatura, seguido va el soplado de gas por un chorro, ocasionando un corte de alta calidad. Mientras el haz se mueve por la superficie, el diámetro de la ranura de corte se hace ligeramente mayor al del diámetro del haz, el chorro de gas a presión ayuda a expulsar el material fundido; este gas se llama “gas auxiliar”, el mismo que fluye en igual dirección que el láser [11].

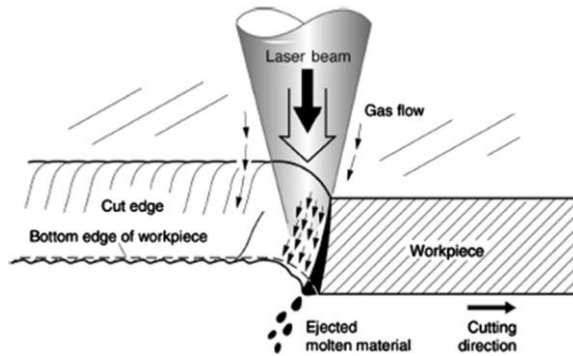


Figura 2-7. Esquema del corte por láser. Fuente: *CO₂ Laser Cutting; Powell John [11]*

2.1.3.2 Clasificación

Se clasifican de acuerdo con su medio láser, del que se tienen tres categorías como: gas, líquido y sólido; todos los tipos de láser operan de un modo temporal de los dos existentes que son: modo de onda continua (CW) y modo pulsado. En el modo CW, el haz láser se emite permanentemente sin interrupción hasta finalizar el corte; por otro lado, en el modo pulsado el haz de láser es emitido periódicamente en cortos lapsos de tiempo cada pulsación de corte [12].

Los tipos de láser comúnmente utilizados en los materiales de la actualidad están en forma de sólido o gas. Existen tres tipos de láser de forma sólida: láser de rubí, láser de vidrio de neodimio y láser de granate de aluminio de itrio y neodimio (Nd-YAG).

El tipo Nd-YAG tiene una longitud de onda de 1,06 mm, por lo que ha reemplazado a los otros tipos porque puede mantener potencias más grandes en períodos más largos que los otros tipos [12].

Los tipos de láser por gas actualmente son casi todos los láseres de dióxido de carbono (CO₂), el mismo que tiene 10,6 mm de longitud de onda, por lo que se ha demostrado que son los más eficientes para la producción a gran escala [12].

Existen otros tipos de sistemas láser utilizados en la industria de procesamiento de materiales como es el **láser de monóxido de carbono (CO)**, otro es el **láser Excimer**, etc. Se puede hacer una comparación entre los tipos de láser antes

nombrados, puede hacerse la comparación en términos de coste por potencia de salida y coste de operación frente a energía de salida [12].

La siguiente tabla detalla la comparación entre corte por láser CO₂ y láser Nd-YAG aplicados a diferentes materiales.

Tabla 2-2. Comparación para diferentes materiales. Fuente: Laser Machining: Theory and Practice; Chryssolouris [12]

Material	CO₂ laser	Nd-YAG láser
Metales		
Acero dulce	Excelente	Excelente
Acero inoxidable	Excelente	Excelente
Aleación de acero	Excelente	Excelente
Acero de herramientas	Excelente	Excelente
Aluminio / aleaciones de aluminio	Justo - bueno	Bueno
Cobre / aleaciones de cobre	Difícil	Justo
Titanio	Bueno	Bueno
Oro / plata	Pobre	Difícil
No metales orgánicos		
Plásticos (polímeros)	Bueno - excelente	Pobre
Compuestos	Pobre - excelente	Pobre - justo
Caucho	Bueno	Pobre
Madera	Excelente	Pobre
Papel / cartón	Excelente	Pobre - bueno
Cuero	Excelente	Pobre - bueno
Textiles sintéticos	Excelente	Pobre - bueno
No metales inorgánicos		
Cuarzo	Bueno - excelente	No posible
Vidrio	Difícil	No posible
Cerámicos	Justo - bueno	Justo
Piedra y roca	Pobre	Pobre

2.1.4 Láser por CO₂

Las moléculas producidas por el CO₂ tienen altos niveles rotacionales y vibracionales; es decir, absorben energía por cada distancia de longitud de onda infrarroja. La emisión del CO₂ en el láser se genera por la transición que se genera entre estos dos niveles. Como ya se mencionó anteriormente, la longitud

de onda de este tipo de láser es de 10,6 micrómetros, la misma que está situada dentro de los infrarrojos lejanos como se muestra a continuación [17].



Figura 2-8. Espectro electromagnético. Fuente: *El láser: la luz de nuestro tiempo;* García, Fernández [17]

Este tipo de láser consiste en la transformación de la energía eléctrica en luz de haz láser, la misma que se la puede transmitir en distancias grandes; el láser se desvía con el uso de espejos y se lo enfoca en un punto en específico muy pequeño que mide menos de una décima de milímetro, esto trabaja como herramienta de corte fija; con esto se puede obtener densidades de potencia muy altas que sean capaces de fundir y así poder cortar prácticamente todos los tipos de materiales sin importar el contorno y la geometría de los mismos a grandes velocidades. A continuación, se muestra un diagrama del proceso de corte por láser de CO₂ completo [17].

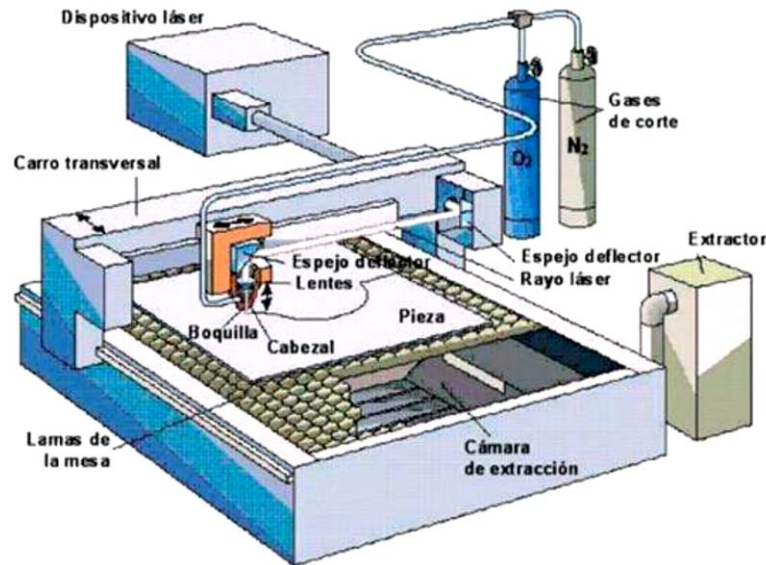


Figura 2-9. Proceso de corte por láser de CO₂. Fuente: *El láser: la luz de nuestro tiempo*; García, Fernández [17]

2.1.5 Parámetros del láser

2.1.5.1 Potencia

La potencia del láser es muy importante, cualquier tipo de aumento de la potencia permitirá también elevadas velocidades del corte con lo que se podrían realizar cortes de mayores espesores; una potencia de láser baja dirige a una penetración parcialmente; por lo tanto, el material que se funde no va hacer expulsado impidiendo que el corte se inicie. Si la potencia es muy alta, esto permite una penetración completa con un buen corte en la zona; pero también provocaría que las esquinas cortadas se quemen, al igual que una mayor presencia de escoria lo que disminuye la calidad del corte [13].

2.1.5.2 Haz

El haz es la distribución de la energía que es expulsada por una sección. En el proceso de corte por láser (LBC), este parámetro tiene distribución Gaussiana, lo que nos da un punto enfocado muy pequeño, al igual que la densidad de potencia y profundidad del enfoque; esto permite la reducción del ancho del

corte y aumento de la velocidad, al igual que el aumento de los espesores de los materiales a cortar [13].

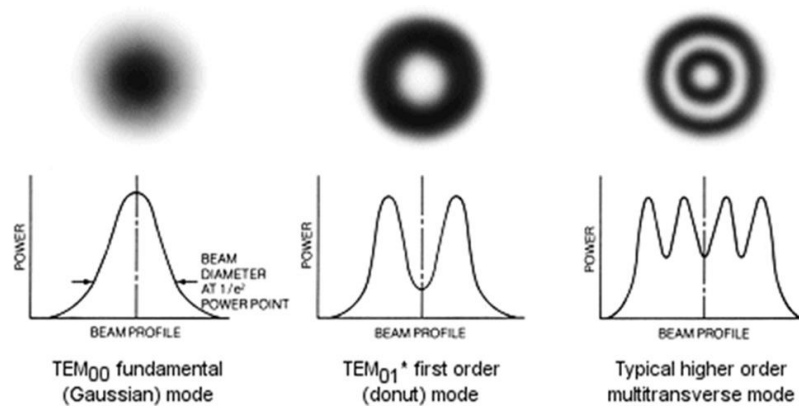


Figura 2-10. Haz de láser: tipos. Fuente: Laser Material Processing; Steen [13]

2.1.6 Parámetros del material

2.1.6.1 Propiedades térmicas

Para realizar el corte por láser intervienen propiedades propias de los materiales como son: la conductividad térmica, temperatura de fusión y reflectividad óptica; por ejemplo, el corte láser en los metales es más difícil que en los no metales, ya que en los metales es necesaria una alta densidad de potencia a velocidades de corte bajas para aumentar la temperatura hasta llegar a la de fusión del material [14].

2.1.6.2 Densidad

Es la propiedad que tienen todos los materiales: sólidos, líquidos y gases; esta propiedad determina la cantidad de material que se encuentra comprimido en un cierto espacio, dando lugar a la formación del material y está definida por la ecuación 2- 1 [4].

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ec. 2- 1}$$

Dónde:

- ρ = Densidad (kg/m³)
- m = Masa (kg)
- v = Volumen (m³)

2.1.6.3 Difusividad térmica

Esta propiedad aparece en la transferencia de calor en régimen transitorio, la misma que indica la velocidad con la que se distribuye el calor por un cierto material; es la relación entre el calor conducido y el calor almacenado en un volumen de material. Si el valor es alto quiere decir que se distribuye rápidamente el calor, mientras que con un valor pequeño significa que la mayoría del calor es absorbido por el mismo material y se la encuentra mediante la ecuación 2- 2 [23].

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \quad \text{Ec. 2- 2}$$

Dónde:

- α = Difusividad térmica (m²/s)
- k = Conductividad térmica (W/m°C)
- ρ = Densidad (kg/m³)
- Cp = Calor específico (J/kg°C)

2.1.7 Parámetros del proceso

2.1.7.1 Velocidad de corte

La velocidad de corte es establecida dependiendo del espesor del material a cortar ya que si el espesor es muy grande la velocidad de corte debe disminuir y viceversa en el procesos como se muestra en la siguiente figura; en la misma se ilustra una cierta velocidad de corte máxima que puede ser aplicada para que se pueda realizar el corte en un material de cierto espesor; ya que si la velocidad de corte es mayor a la máxima dada en la curva, el láser no podrá penetrar todo el

espesor, por otro lado si la velocidad de corte es menor a la de la curva los bordes del corte se quemarían dando malos resultados de corte [14].

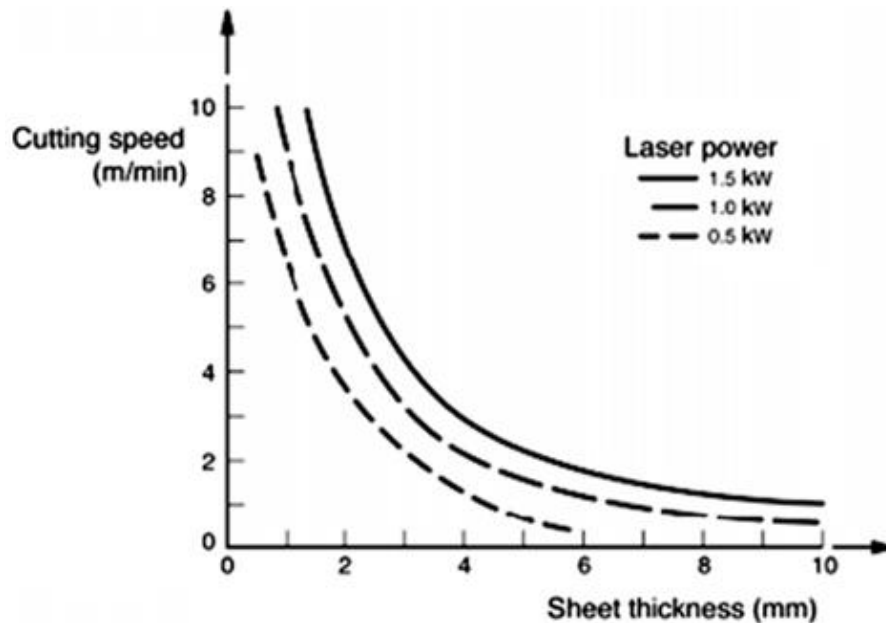


Figura 2-11. Variación de la velocidad de corte con el grosor de la pieza. Fuente: *Laser Processing of Engineering Materials; Ion [14]*

2.1.7.2 Gas auxiliar

Utilizar algún tipo de gas auxiliar en este tipo de corte es muy importante ya que cumple cuatro funciones específicas que intervienen en la eficiencia del corte; estas funciones son: expulsar el material fundido, proteger el lente del láser de salpicaduras, enfriar el borde cortado y debido a la reacción exotérmica que produce se genera una fuente de calor adicional dependiendo el gas utilizado. Si se utiliza un gas activo como es el O_2 , se genera óxido en la superficie después de realizar el corte, lo que necesitará de procesos de limpieza. El uso de gases inertes o nitrógeno no producen óxido en la superficie, pero pueden reducir de gran manera la velocidad de corte. [15]

La presión del gas es muy importante ya que con esto se puede reducir la formación de escoria y se puede restringir a una cierta anchura el haz del láser; la pureza del gas utilizado es un factor que afecta el rendimiento del corte, ya que tan solo una pequeña cantidad de impureza reduce la velocidad de corte o a su vez puede aumentar la escoria después del corte [15].

En los procesos de corte por láser (LBC) existen diferentes tipos de gases utilizados; el nitrógeno (N_2) es un gas inerte de los más utilizados principalmente por su precio económico, y es utilizado para cortar el acero inoxidable y aleaciones. El argón (Ar) es otro tipo de gas utilizado específicamente para cortar materiales como el titanio y sus aleaciones, ya que este gas evita la aparición de óxidos de titanio o nitruros de titanio. El oxígeno (O_2) es utilizado para el corte del acero dulce y aceros inoxidables específicamente para realizar cortes a grandes velocidades. El helio brinda calidades de corte altas por su acabado. Finalmente, dentro de las opciones más utilizadas se encuentra el aire comprimido ya que se puede cortar el aluminio, polímeros, madera, compuestos, alúmina y vidrio principalmente porque es de fácil acceso al mismo [15].

2.1.7.3 Forma de la boquilla

La boquilla que se utiliza cumple ciertas funciones principales dentro del proceso de corte como son: dirigir el gas coaxialmente al del láser, disminuir la presión por el lente láser minimizando el movimiento y desalineación del lente láser, finalmente la forma de la boquilla ayuda a minimizar la turbulencia del material fundido ya que mantiene una presión estable en la superficie del material cortado. El orificio y el diseño de la boquilla son los que determinan la forma que tendrá el chorro del gas, esto afecta directamente la calidad del corte [15].

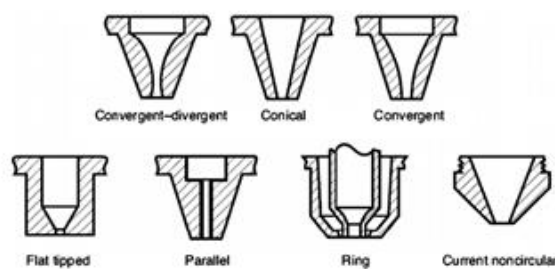


Figura 2-12. Diseños de boquillas para corte láser. Fuente: *Principles of Laser Materials Processing; Kannatey Asibn [15]*

2.1.8 Calidad de corte

La calidad de corte es un factor muy importante que tomarse en cuenta en los diferentes procesos; por esto es necesario el estudio detallado de las superficies, ya que de este factor depende el funcionamiento, rendimiento, comercialización y debe ser llamativo a simple vista. Para conseguir todo esto es necesaria la selección correcta del proceso, maquinaria, equipos y herramientas [21].

2.1.8.1 Rugosidad superficial

Las superficies totalmente lisas están compuestas por una abstracción matemática; toda superficie por más lisa o perfecta que parezca siempre va a presentar irregularidades, las mismas que se generan debido al proceso de corte o de fabricación del mismo [21].

Tabla 2-3. Rugosidad permitida para cada proceso. Fuente: ISO 1302; AENOR [21]

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													
Mandrillado													
Mortajado													
Oxicorte													
Pulido													
Recalcado													
Rectificado													
Superacabado													
Taladrado													
Torneado													
Trefilado													
	Aplicación frecuente						Aplicación menos frecuente						

2.1.8.2 Rugosímetro

La medición de la rugosidad es posible gracias a los rugosímetros; son instrumentos de precisión que constan de una aguja que se introduce en los picos, el captador que registra los movimientos realizados por la aguja, el patín que es el apoyo de la superficie, la motorización encargada de arrastrar la aguja por toda la superficie y finalmente la electrónica que registra los datos de respuesta deseados [22].

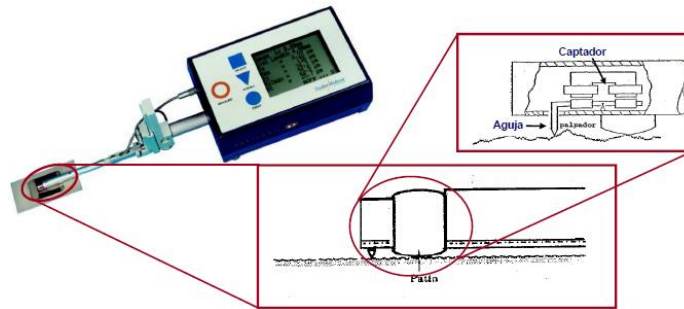


Figura 2-13. Rugosímetro. Fuente: Metrología del acabado superficial; Escuela de Ingeniería de Bilbao [22]

2.1.9 Pulso de energía en la superficie

Es un caso de conducción de calor en régimen transitorio utilizado cuando existe transferencia de calor en forma de energía ($e_s = \text{constante}$) sobre una cierta área de superficie en un tiempo determinado; un ejemplo de aplicación de este caso es cuando se le aplica un pulso láser a la superficie. La energía entra por completo al cuerpo aplicado sin perder calor desde la superficie; se determina mediante la ecuación 2-3 [23].

$$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} * \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \quad \text{Ec. 2- 3}$$

Dónde:

- $T(x, t)$ = Temperatura final (°C)
- T_i = Temperatura inicial (°C)
- e_s = Pulso de energía (J/m^2)

- k = Conductividad térmica (W/m°C)
- t = Tiempo de pulso (s)
- α = Difusividad térmica (m²/s)
- x = Espesor (m)

2.1.10 Diseño experimental (DOE)

La realización de experimentos o pruebas es algo común dentro del campo industrial con el fin de comprobar ideas o resolver problemas frecuentes dentro de un campo en específico; por ejemplo, la realización de cambios dentro de un proceso u operación, realizar cambios en diversos materiales, la creación de un material nuevo, determinar parámetros de operación de alguna máquina en específica.

Todo esto se lo realiza gracias al diseño estadístico de experimentos, ya que el diseño de experimentos nos ayuda a determinar el tipo de pruebas a realizarse, la forma de realizarlas y el número de pruebas o experimentos; con esto se obtienen datos que al ser analizados brindan respuestas a las interrogantes antes planteadas. Algunos ejemplos de problemas a solucionar mediante el diseño experimental se muestran a continuación [19].

- Conocer la composición interna y características de un material en específico.
- Rediseñar nuevos sistemas, productos o procesos.
- Reducción del ciclo de trabajo de máquinas o procesos.
- Encontrar los parámetros adecuados de operación como velocidad, temperatura, humedad, entre otros, para eliminar o reducir defectos dentro de un proceso.
- Verificación y comparación entre 2 o más instrumentos o herramientas de precisión.
- Comparación de distintos materiales para seleccionar el que mejor comportamiento tenga [19].

2.1.10.1 Diseño factorial

Este tipo de diseño estudia los efectos que ocasionan no solo uno sino varios factores sobre la respuesta del experimento que se busca.

Los factores antes mencionados pueden ser cualitativos como: tipos de máquinas, tipo de material utilizado, operador de la máquina o la falta de algún proceso previo. Existen también los factores cuantitativos como: la temperatura, la humedad, la velocidad, la presión, entre otros [19].

En el diseño factorial se debe realizar al menos dos niveles de prueba para cada factor; con este tipo de diseño se pueden correr combinaciones de forma aleatoria que se forman con los niveles y factores objetos de la investigación.

Los factores del experimento se los designa con k ; es decir con $k = 2$ factores y con dos niveles, el diseño factorial queda de la forma $2 \times 2 = 2^2$; lo que se entiende que se tendrá en total cuatro combinaciones experimentales. Para la obtención del número de corridas del experimento se debe multiplicar los tratamientos por las réplicas [19].

2.1.10.2 Diseño factorial 2^3

Dicho diseño factorial es utilizado cuando se quiere investigar la influencia que tienen 3 factores (A, B, C) sobre una o más variables que se estudian, cada uno con sus respectivos niveles de prueba en cada uno de ellos; el arreglo factorial queda de la forma $a \times b \times c$, que consta de $a \times b \times c$ número de tratamientos experimentales [19].

Tabla 2-4. Modelo Experimental de Tres Factores. Fuente: Análisis y diseño de experimentos; Gutiérrez [19]

Factor	U. originales			U. codificadas		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
A: Tipo de suspensión	A_1	A_2	A_3	-1	0	1
B: Abertura de malla	40	-	60	-1	-	1
C: Temperatura	0	-	30	-1	-	1

2.2 HIPÓTESIS

¿La variación de los parámetros en el proceso de corte láser por CO₂ para el compuesto tradicional y el compuesto híbrido influirá en la calidad del corte?

2.3 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS

2.3.1 Variable independiente

La variación de los parámetros en el proceso de corte láser por CO₂ para el compuesto tradicional y el compuesto híbrido

2.3.2 Variable dependiente

Calidad del corte.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN.

3.1.1 Métodos de investigación.

- Método Bibliográfico.

Para la realización del presente proyecto es importante la investigación; por lo tanto, se partió utilizando el método bibliográfico ya que este método permite acceder a la información de proyectos y artículos técnicos que se refieran al corte de láser por CO₂ aplicados a diferentes materiales que se han realizado dentro y fuera del País.

- Método Descriptivo.

Fué necesaria la descripción del proceso de corte por láser de CO₂ con sus respectivos parámetros a considerar para efectuar el trabajo experimental como: haz de láser, potencia de la máquina, velocidad de corte, entre otros.

- Método de diseño de experimentos (DOE).

Otro de los métodos principales a utilizados fue el método de diseño de experimentos también llamado método DOE, ya que con este método fue posible llegar a la solución del tema de investigación haciendo un mínimo número de cortes y pruebas posibles en los materiales compuestos objeto del presente trabajo experimental. Por lo tanto, tras aplicar el mencionado método en el trabajo experimental se supo exactamente cómo influye cada uno de los factores tanto de nuestros materiales compuestos, como de los parámetros de la máquina cortadora a láser de CO₂.

- Método Exploratorio.

Una vez definido el proceso y los parámetros que considerar, se procedió a combinarlos de diferentes formas ya que muchas veces estas combinaciones dan resultados inesperados.

- Método Empírico.

Los métodos empíricos fueron muy utilizados tales como: la observación, ya que fue de mucha utilidad para analizar los parámetros y resultados del corte láser por CO₂.

- Método de análisis de resultados.

El análisis de resultados fue muy importante ya que con esta técnica se pudo verificar la calidad de corte en el material y cuantificarlos después de cada experimentación de corte a distintos parámetros, estableciendo así los avances de cada corte para mejorarlos en los siguientes cortes de los materiales compuestos antes mencionados.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 Población

Como población se tomaron en cuenta dos tipos de materiales compuestos los cuales son:

El *compuesto tradicional* conformado por fibra de vidrio (FV) + resina poliéster, ya que este tipo de material es el más utilizado dentro de la industria carrocería para producción de guardachoques para buses en la provincia de Tungurahua; dicho material fue fabricado en forma de plancha con dimensiones específicas y justificadas para la realización de los ensayos de corte láser en el mismo [18].

También se realizaron ensayos con un *compuesto híbrido* conformado por fibra de vidrio (FV) + fibra de cabuya (FN) + resina poliéster; este material fue tomado en cuenta para la experimentación debido a una tesis de maestría realizada y aprobada en la cual se buscó reemplazar el material compuesto tradicional antes

mencionado por este compuesto híbrido, del cual se obtuvieron excelentes resultados para reemplazarlo en la industria carrocera; al igual que el compuesto tradicional, el compuesto híbrido se fabricó en forma de plancha con dimensiones específicas y justificadas [18].

Dichos materiales tienen composiciones específicas que cumplen con las normas internacionales (Tracción ASTM D3039-00, Flexión ASTM D7264-07 e Impacto ASTM D5628-10) con lo cual fueron idóneas para la realización del presente proyecto experimental. [18]

3.2.2 Muestra

3.2.2.1 Diseño Experimental.

- **Proceso:** Corte láser por CO₂.
- **Máquina:** Cortadora láser CO₂ modelo NC – C1290



Figura 3-1. Máquina cortadora láser utilizada. Fuente: Autor

Tabla 3-1. Características de la máquina utilizada. Fuente: <http://www.nice-cut.com/es/index.php?c=msg&ts=gch&>

Descripción de la máquina	
Modelo	NC - C1290
Tubo de láser	Enfriamiento de agua de vidrio sellado CO ₂ tubo de láser
Sistema de control	32 bit dsp
Memoria	256m de memoria flash en la junta principal
Tipo de unidad	micro motor paso a paso
Potencia del láser	100W
Tamaño de trabajo (mm)	1200 * 900 (con lateral doble puerta abierta)
Velocidad máxima	1200mm/s
Software	Easycut 5.3
Forma de imagen	Plt, dxf, bmp, ai, el horario de verano
Resolución	dpi 1000
Capacidad de repetición	Mn 0.01
Interfaz	Usb2.0 y usb de disco
Energía	110-240v / 50 - 60 hz
Dimensiones de la máquina (mm)	2040*1460*1070

- **Variables de entrada:** espesor del material, potencia de la máquina, velocidad de corte, presión de gas CO₂, haz de láser, forma de boquilla.
- **Variables de salida:** calidad de corte en base a la rugosidad y efecto térmico láser.

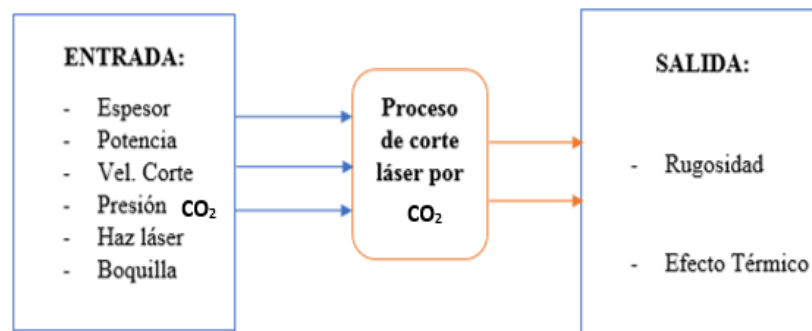


Figura 3-2. Variables del proceso a experimentar. Fuente: Autor

En la ejecución de los experimentos existen factores que pueden ser manipulados directamente por el investigador; pero existen otros factores que no pueden ser alterados ya que dependen del mismo proceso, máquina, condiciones ambientales, etc. Para el presente experimento a continuación se presentan los

factores que pueden ser o no controlables, ya que de estos factores depende el tipo de diseño experimental utilizado.

- **Factores controlables:**

Tabla 3-2. Factores controlables. Fuente: Autor

Espesor del material (mm)	X ₁
Potencia de la máquina (W)	X ₂
Velocidad de corte (mm/s)	X ₃
Geometría de corte	X ₄

- **Factores difíciles de controlar:**

Tabla 3-3. Factores no controlables. Fuente: Autor

Presión del gas CO ₂ (Pas, PSI)	Z ₁
Haz del láser	Z ₂
Forma de boquilla	Z ₃

- **Salida o respuesta:**

Tabla 3-4. Salida o respuesta. Fuente: Autor

Rugosidad de acabado (μm)	Y
Efecto térmico en el material	Y'

- **Diagrama:**

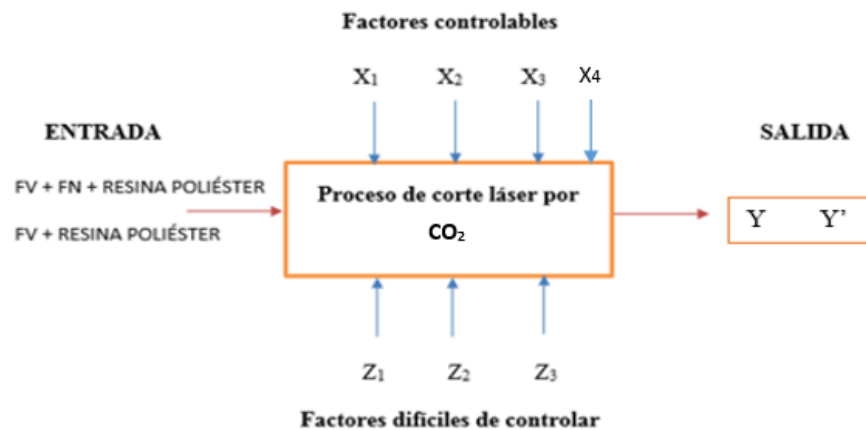


Figura 3-3. Modelo general del experimento. Fuente: Autor

3.2.2.2 Formas geométricas de corte

Debido a la inexistencia de normas internacionales para el proceso de corte láser por CO₂; las formas geométricas seleccionadas se las tomó como referencia de un estudio previo realizado en cortes por láser CO₂ en materiales poliméricos

con los cuales las trayectorias de corte recto (figura 3-4. a) nos permite determinar la calidad del acabado mediante la rugosidad y el efecto térmico; por otra parte, la geometría circular (figura 3-4. b) nos permite evaluar la precisión de corte que tiene dicho sistema lo cual también afecta directamente al acabado del corte. [20]

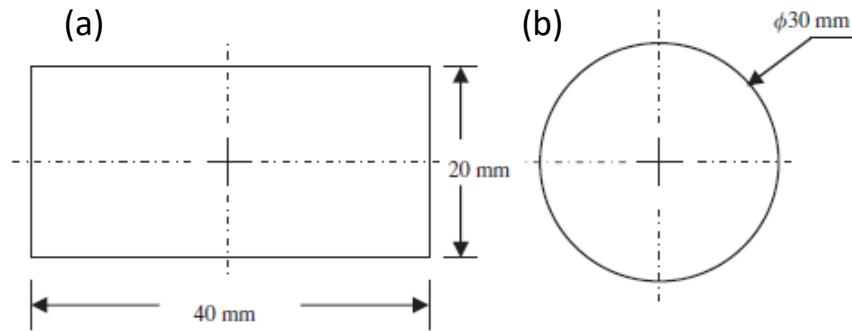


Figura 3-4. Formas geométricas de corte: a) rectangular y b) circular. Fuente: Corte por láser de materiales poliméricos; S. Shirley [20]

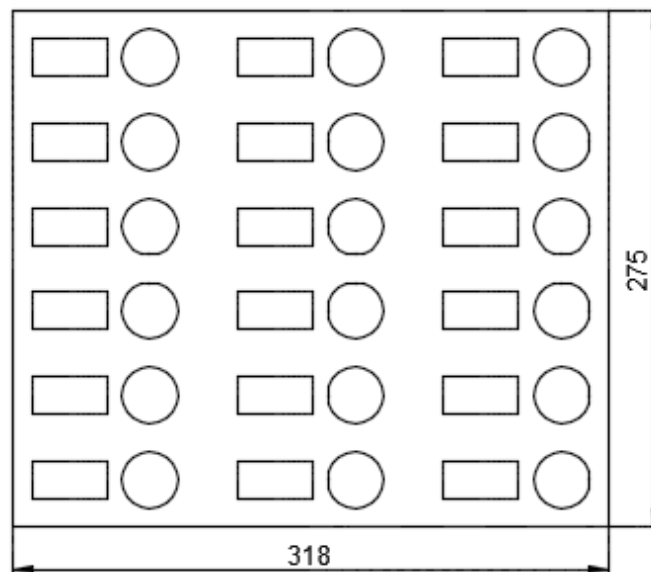


Figura 3-5. Dimensionamiento plancha base para cada compuesto. Fuente: Autor

3.2.2.3 Espesor de los materiales

El espesor de los materiales fue tomado como referente el utilizado para la construcción de guardachoques de 3 empresas reconocidas en el campo carrocerero; la medida se la tomó de varias muestras para determinar un espesor promedio. El calibrador pie de rey fue utilizado para dichas mediciones tomadas

del material compuesto por fibra de vidrio (FV) más resina poliéster (RP); las empresas carroceras construyen dicho material compuesto tomando en cuenta el número de capas del material (FV) que para estos casos utilizan *tres capas*, por ello se ha tomado un estudio previo realizado en el cual se determinó dicho espesor. [18]

Tabla 3-5. Propiedades físicas del compuesto tradicional (FV + RP). Fuente: Estudio de polímeros híbridos; Ing. Juan Paredes [18]

#	Comp.	Ensayo	Cod.	Peso (g)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Vol. (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
1	FV+RP (MI-IBCE)	Tracción	P-MI	24,82	3,14	24,24	250,4	19,06	1,5
			P-IB	30,4	3,7	26,18	250	24,22	1,62
			P-CE	23,34	3	25,52	250	19,14	1,55
Promedio Tracción			P-TT	26,19	3,28	25,31	250,13	20,81	1,56

2	FV+RP (MI-IBCE)	Flexión	P-MI	9,64	3,05	14,56	160	7,11	1,46
			P-IB	10,98	3,9	14,64	160	9,14	1,58
			P-CE	8,78	3,34	13,82	160	7,39	1,52
Promedio Flexión			P-TF	9,8	3,43	14,34	160	7,88	1,53

3	FV+RP (MI-IBCE)	Impacto	P-MI	12,42	2,96	58	57,6	9,89	1,52
			P-IB	17,66	3,92	59	58,8	13,59	1,6
			P-CE	16,26	3,56	59,6	59	12,52	1,52
Promedio Impacto			P-TI	15,45	2,96	58,87	58,47	12	1,55

Espesor promedio =	3,2	Densidad promedio =	1,55
---------------------------	------------	----------------------------	-------------

En la tabla 4 se definió el espesor promedio del material el cual es de **e=3,2mm**; este mismo espesor fue tomado como referencia para la fabricación del compuesto híbrido (FV + FN + RP) objeto de nuestro trabajo experimental.

3.2.2.4 Parámetros de entrada para el compuesto tradicional

- Fibra de Vidrio (FV) + Resina Poliéster (RP).

Tabla 3-6. Parámetros y niveles de entrada. Fuente: Autor

Variables	Símbolo	Unidades	Niveles		
			Bajo	Medio	Alto
A: Potencia láser	P	Watt	50	80	100
B: Velocidad de corte	v	mm/s	6	8	10
C: Geometría de corte	-	-	Circular	-	Rectangular

Modelo del experimento.

Para realizar el modelo experimental se seleccionaron los siguientes datos: réplicas ($m=2$), potencia láser ($A=3$), velocidad de corte ($B=3$), geometría de corte ($C=2$).

El número total de pruebas (n) de corte para este caso es igual a:

$$n = m * A * B * C = 2 * 3 * 3 * 2 = 36$$

Tabla 3-7. Factores y niveles del compuesto tradicional. Fuente: Autor

A: Potencia (W)	Nombre	Nivel	B: Vel. Corte (mm/s)	Nombre	Nivel	C: Geometría	Nombre	Nivel
50	A1	Bajo	6	B1	Bajo	Circular	C1	Bajo
80	A2	Medio	8	B2	Medio	-	-	-
100	A3	Alto	10	B3	Alto	Rectangular	C2	Alto

Tabla 3-8. Número de probetas para el compuesto tradicional. Fuente: Autor

	A1			A2			A3			# Probetas
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	
C1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18
C2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18
	Total									36

3.2.2.5 Parámetros de entrada para el compuesto híbrido

- Fibra de Vidrio (FV) + Fibra de Cabuya (FN) + Resina Poliéster (RP).

Tabla 3-9. Parámetros y niveles de entrada. Fuente: Autor

Variables	Símbolo	Unidades	Niveles		
			Bajo	Medio	Alto
A: Potencia láser	P	Watt	85	90	100
B: Velocidad de corte	v	mm/s	5	7	10
C: Geometría de corte	-	-	Circular	-	Rectangular

Modelo del experimento.

Para realizar el modelo experimental se seleccionaron los siguientes datos: réplicas ($m=2$), potencia láser ($A=3$), velocidad de corte ($B=3$), geometría de corte ($C=2$).

El número total de pruebas (n) de corte para este caso es igual a:

$$n = m * A * B * C = 2 * 3 * 3 * 2 = 36$$

Tabla 3-10. Factores y niveles del compuesto híbrido. Fuente: Autor

A: Potencia (W)	Nombre	Nivel	B: Vel. Corte (mm/s)	Nombre	Nivel	C: Geometría	Nombre	Nivel
85	A1	Bajo	5	B1	Bajo	Circular	C1	Bajo
90	A2	Medio	7	B2	Medio	-	-	-
100	A3	Alto	10	B3	Alto	Rectangular	C2	Alto

Tabla 3-11. Número de probetas para el compuesto híbrido. Fuente: Autor

	A1			A2			A3			# Probetas
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	
C1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18
C2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	18
	Total									36

3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.3.1 Variable independiente

La variación de los parámetros en el proceso de corte láser por CO₂ para el compuesto tradicional y el compuesto híbrido

Tabla 3-12. Operacionalización de variable independiente. Fuente: Autor

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS / HERRAMIENTAS
<p>CORTE LÁSER POR CO₂:</p> <p>Proceso que transforma la energía eléctrica en haz láser y mediante espejos es dirigida a un punto específico, con esto se logra potencias altas que funden los materiales para cortarlos a grandes velocidades y con mayor precisión.</p>	Parámetros de corte láser.	Potencia de la máquina (W).	<p>Compuesto Tradicional:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bajo (50 W) - Medio (80 W) - Alto (100 W) <p>Compuesto Híbrido:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bajo (85 W) - Medio (90 W) - Alto (100 W) 	<ul style="list-style-type: none"> • Observación directa. • Método Bibliográfico. • Método DOE 2³. • Ensayos preliminares.
		Velocidad de corte (mm/s).	<p>Compuesto Tradicional:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bajo (6 mm/s) - Medio (8 mm/s) - Alto (10 mm/s) <p>Compuesto Híbrido:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bajo (5 mm/s) - Medio (7 mm/s) - Alto (10 mm/s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Observación directa. • Método Bibliográfico. • Método DOE 2³. • Ensayos preliminares.

3.3.2 Variable dependiente

Calidad del corte.

Tabla 3-13. Operacionalización de variable dependiente. Fuente: Autor

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS / HERRAMIENTAS
<p>CALIDAD DE CORTE: Parámetro que define la efectividad de un corte, es evaluado por varios factores principalmente el acabado superficial que está dado por la rugosidad.</p>	<p>Evaluación de la calidad superficial.</p>	<p>Rugosidad superficial promedio en micrómetros - Ra (μm).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicación frecuente: (6,3 – 1,6 μm) - Aplicación exacta: (1,6 – 0,4 μm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Norma ISO 1302. • Rugosímetro. • Observación directa. • Bibliográfica.
		<p>Efecto térmico en base a la temperatura crítica de corte ($^{\circ}\text{C}$)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) - Distribución de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Observación directa. • Pirómetro. • Cálculo analítico.

3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para la presente investigación se utilizaron ciertas técnicas de recolección para la información que se mencionan a continuación.

- Bibliográficas.

Para la recolección de información sobre el tema de corte láser, ha sido utilizado el internet como fuente principal, consultas en tesis y artículos técnicos relacionados con el tema que han servido para incluirlas como referencias útiles en la búsqueda de los resultados de la presente investigación.

- Observación y experimentación directa.

Debido a la poca información disponible sobre el tema se procedió a realizar una experimentación preliminar para definir ciertos factores; dicha experimentación se la realizó en MASTER GRAFIC: CNC LÁSER.

- Fichas técnicas.

En el transcurso de la investigación se usaron fichas técnicas y registros para guardar la información obtenida de los diferentes experimentos con los cuales se evaluaron los resultados obtenidos después del proceso de corte láser.

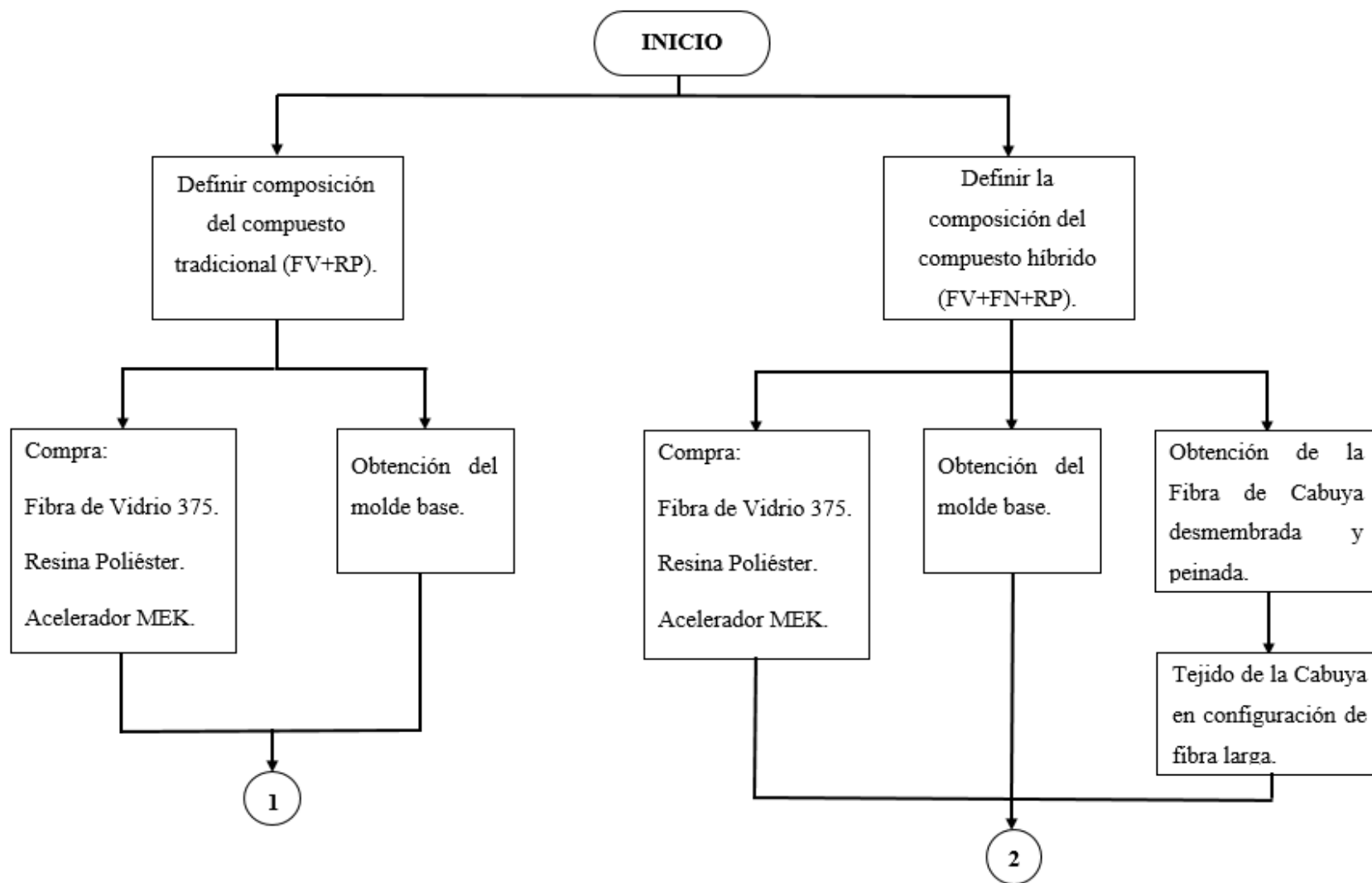
- Guías de laboratorios e informes.

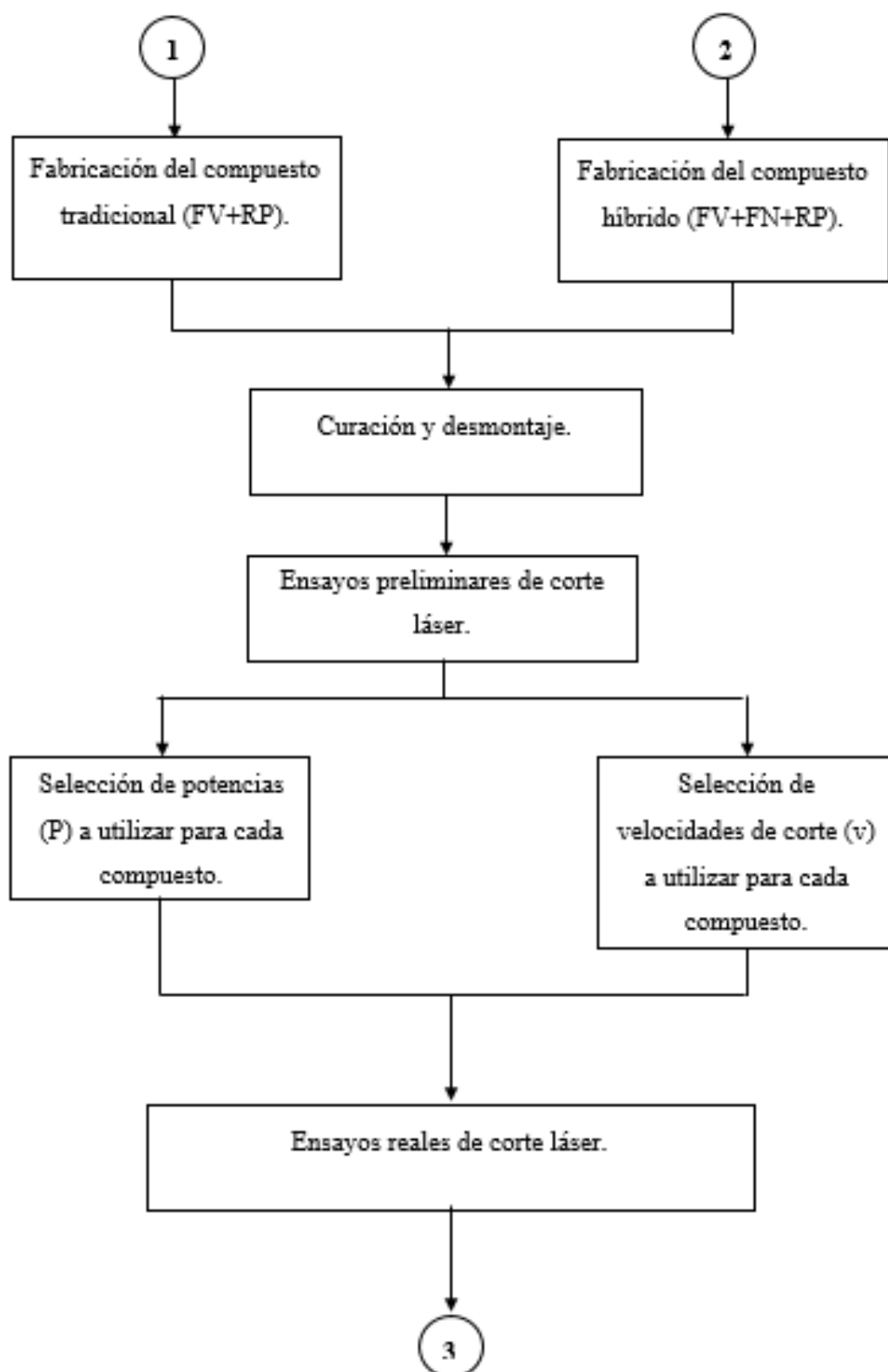
La utilización de las guías establecidas bajo norma para los laboratorios fue de mucha ayuda para presentar un informe correcto de los resultados obtenidos en la presente investigación.

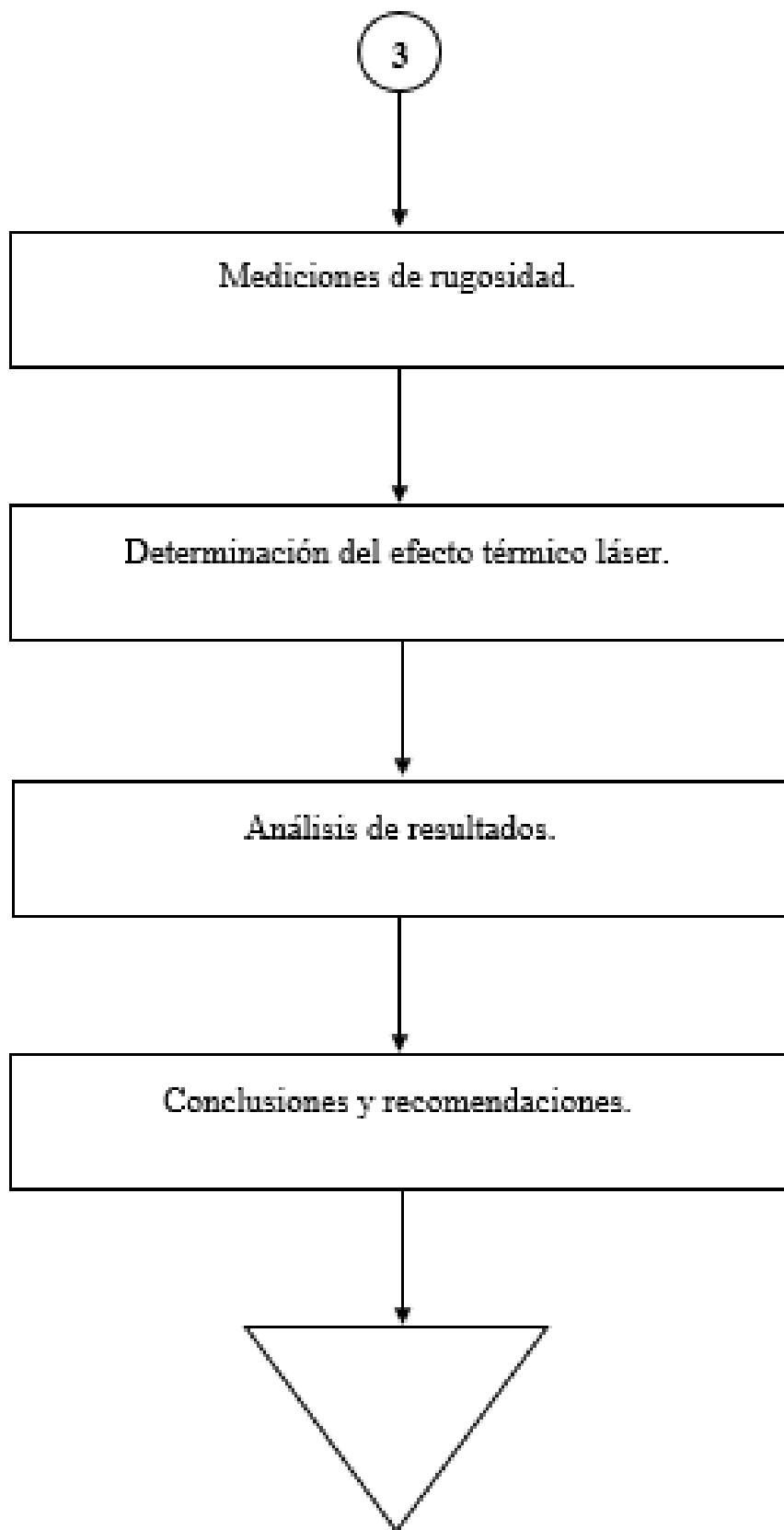
3.5 PLAN PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

3.5.1 Diagrama del proceso

A continuación, se presenta el diagrama donde se describe todo el proceso que se llevó a cabo para el trabajo experimental.







3.5.2 Procesamiento

Es necesaria la descripción de los procesos que se realizaron para llegar a los resultados.

3.5.2.1 Composición de los materiales

Compuesto tradicional

Su composición está dada por fibra de vidrio (FV) como material de refuerzo y resina poliéster (RP) como material matriz; la configuración de dicho material es de 70% de material matriz y 30% de material de refuerzo con 3 capas de esta, el espesor promedio del material ya curado es de 3,2mm como ya fue definido en apartados anteriores.

- **Peso de la resina poliéster**

$$Volumen\ total\ de\ la\ plancha\ base = 279,84\ cm^3$$

Resina poliéster al 70%

$$V_{R.\ poliéster} = 279,84cm^3 * 70\%$$

$$V_{R.\ poliéster} = 195,89cm^3$$

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

$$m_{R.\ poliéster} = 1,2g/cm^3 * 195,89cm^3$$

$$m_{R.\ poliéster} = 235,1\ g$$

- **Peso de la fibra de vidrio**

Fibra de vidrio al 30%

$$V_{F.\ vidrio} = 279,84cm^3 * 30\%$$

$$V_{F.\ vidrio} = 83,95cm^3$$

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

$$m_{F.\ vidrio} = 2,4g/cm^3 * 83,95cm^3$$

$$m_{F.\ vidrio} = 201\ g$$

Compuesto híbrido

Su composición está dada por fibra de vidrio (FV) y fibra natural (FN), en este caso fibra de cabuya como material de refuerzo y resina poliéster (RP) como material matriz; la configuración de dicho material es de 70% de material matriz y 30% de material de refuerzo con 3 capas de esta, en este caso 2 capas de fibra de vidrio y 1 de fibra de cabuya; el espesor promedio del material ya curado al igual que el compuesto tradicional es de 3,2mm como ya fue definido en apartados anteriores.

- **Peso de la fibra de vidrio**

Fibra de vidrio al 20%

$$V_{F. vidrio} = 279,84cm^3 * 20\%$$

$$V_{F. vidrio} = 55,97cm^3$$

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

$$m_{F. vidrio} = 2,4g/cm^3 * 55,97cm^3$$

$$m_{F. vidrio} = 134,32 g$$

- **Peso de la fibra de cabuya**

Fibra de cabuya al 10%

$$V_{F. cabuya} = 279,84cm^3 * 10\%$$

$$V_{F. cabuya} = 27,98cm^3$$

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

$$m_{F. cabuya} = 1,46g/cm^3 * 27,98cm^3$$

$$m_{F. cabuya} = 40,85 g$$

3.5.2.2 Tabulación de pesos totales de fibras y resina

Tabla 3-14. Pesos totales de fibras y resina. Fuente: Autor

Descripción	Pesos (g)		
	F. Vidrio	F. Cabuya	R. Poliéster
Compuesto Tradicional (F. Vidrio + R. Poliéster)	201		235,1
Compuesto Híbrido (F. Vidrio + F. Cabuya + R. Poliéster)	134,32	40,85	235,1
Total	335,32	40,85	470,2

La tabla 3-14 detalla los pesos totales tanto de la resina poliéster como de las diferentes fibras utilizadas; cabe destacar que para la realización de las dos planchas se necesitan aproximadamente 470g de resina poliéster, 335g de fibra de vidrio 375 y 40g de fibra de cabuya.

3.5.2.3 Obtención del molde base

Como molde base para la fabricación de las planchas de los diferentes compuestos tanto para el tradicional y el híbrido se utilizó una plancha de tol de 3mm de espesor.



Figura 3-6. Molde base. Fuente: Autor

3.5.2.4 Obtención de la fibra de cabuya

La fibra de cabuya fue obtenida en la parroquia “El Rosario” ubicado en Salasaca perteneciente al cantón Pelileo; en dicho lugar se encontró la cabuya ya desmembrada y peinada lista para su uso final.



Figura 3-7. Fibra de cabuya peinada. Fuente: Autor

3.5.2.5 Tejido de la fibra de cabuya

La fibra de cabuya fue tejida en la configuración de fibra larga para que sea posible la combinación con la fibra de vidrio.



Figura 3-8. Tejido de fibra de cabuya. Fuente: Autor

3.5.2.6 Fabricación de los compuestos: tradicional e híbrido

Los diferentes compuestos fueron fabricados de acuerdo con el proceso de trabajo realizado en fibra de vidrio, siguiendo las medidas y normas de seguridad en todo el proceso; los mismos que fueron fabricados en el laboratorio de la Carrera de Ingeniería Mecánica.



Figura 3-9. Materiales. Fuente: Autor



Figura 3-10. Equipos y herramientas. Fuente: Autor



Figura 3-11. Equipo de protección personal. Fuente: Autor

Cabe destacar que la estratificación con la que se realizaron las planchas de los compuestos fue normal, debido a la facilidad y rapidez con la que se lo realiza de esta forma.

3.5.2.7 Curación y desmontaje

Para la curación tanto del compuesto tradicional como el compuesto híbrido se esperó un tiempo promedio de 15 días para después proceder a su desmontaje.



Figura 3-12. Curación de los compuestos. Fuente: Autor



Figura 3-13. Compuestos desmontados. Fuente: Autor

3.5.2.8 Ensayos preliminares de corte láser

Se realizaron ensayos preliminares con diferentes parámetros de entrada con el fin de seleccionar las potencias y velocidades de corte con las cuales se obtuvieron mejores resultados para proceder con los ensayos reales. Dichos ensayos se los realizaron en MASTER GRAFIC: CNC LÁSER.

- **Compuesto Tradicional**

A continuación, se muestra la tabulación de los parámetros de entrada utilizados en los cortes preliminares por láser en el compuesto tradicional.

Tabla 3-15. Parámetros en cortes preliminares del compuesto tradicional. Fuente: Autor

COMPUESTO TRADICIONAL		
CÓDIGO	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)
1C	80	10
2C	85	7
3C	90	5
4C	95	6
5C	100	8
6C	50	6
7C	50	4
8C	40	5
9C	55	7

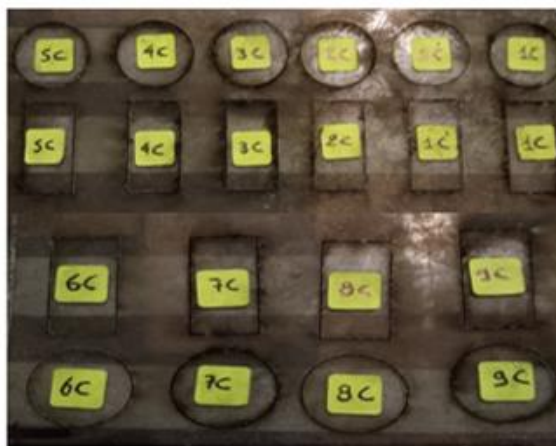


Figura 3-14. Cortes preliminares del compuesto tradicional. Fuente: Autor

- **Compuesto Híbrido**

A continuación, se muestra la tabulación de los parámetros de entrada utilizados en los cortes preliminares por láser en el compuesto híbrido.

Tabla 3-16. Parámetros en cortes preliminares del compuesto híbrido. Fuente: Autor

COMPUESTO HÍBRIDO		
CÓDIGO	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)
1H	100	7
2H	95	8
3H	90	10
4H	98	6
5H	93	5
6H	85	10
7H	85	5



Figura 3-15. Cortes preliminares del compuesto híbrido. Fuente: Autor

3.5.2.9 Selección de parámetros de entrada

Una vez realizados los cortes preliminares, se seleccionaron los parámetros como: Potencia y Velocidad que dieron mejores resultados visualmente tanto para el compuesto tradicional como para el compuesto híbrido.

- **Compuesto Tradicional**

Tabla 3-17. Parámetros seleccionados del compuesto tradicional. Fuente: Autor

COMPUESTO TRADICIONAL		
Nivel	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)
Bajo	50	6
Medio	80	8
Alto	100	10

- **Compuesto Híbrido**

Tabla 3-18. Parámetros seleccionados del compuesto híbrido. Fuente: Autor

COMPUESTO HÍBRIDO		
Nivel	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)
Bajo	85	5
Medio	90	7
Alto	100	10

3.5.2.10 Ensayos reales de corte láser

Una vez definidos los parámetros principales de entrada gracias a los cortes preliminares, se procedió a realizar los cortes reales de las probetas.

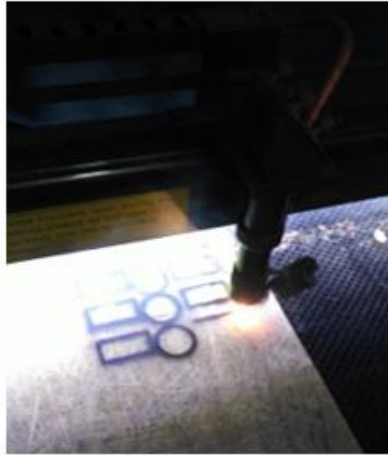


Figura 3-16. Proceso de corte láser. Fuente: Autor

- **Codificación para probetas**

La codificación para las probetas del compuesto tradicional y el compuesto híbrido se lo realizó de la siguiente forma:

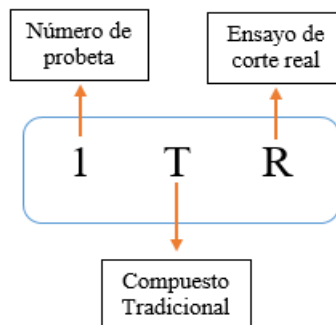


Figura 3-17. Codificación para el compuesto tradicional. Fuente: Autor

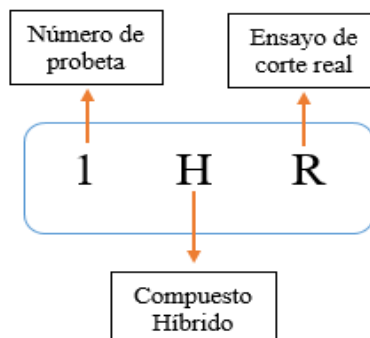


Figura 3-18. Codificación para el compuesto Híbrido. Fuente: Autor

- **Compuesto Tradicional**



Figura 3-19. Cortes láser reales de probetas del compuesto tradicional. Fuente: Autor

A continuación, se muestra la tabulación de los parámetros de entrada combinados entre ellos, con los cuales se realizaron los cortes láser reales de probetas para el compuesto tradicional.

Tabla 3-19. Parámetros combinados utilizados en los cortes láser reales del compuesto tradicional. Fuente: Autor

COMPUESTO TRADICIONAL						
CÓDIGO	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)	TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL LÁSER MEDIDO EN SEGUNDOS		NÚMERO DE RÉPLICAS	
			RECTANGULARES	CIRCULARES	RECTANGULARES	CIRCULARES
1TR	50	6	19,74	15,88	2	2
2TR	50	8	14,70	13,30	2	2
3TR	50	10	13,31	9,60	2	2
4TR	80	6	16,40	14,91	2	2
5TR	80	8	17,60	11,96	2	2
6TR	80	10	13,70	9,86	2	2
7TR	100	6	20,10	15,90	2	2
8TR	100	8	18,50	12,18	2	2
9TR	100	10	13,20	8,70	2	2
					18	18
					TOTAL =	36

- **Compuesto Híbrido**

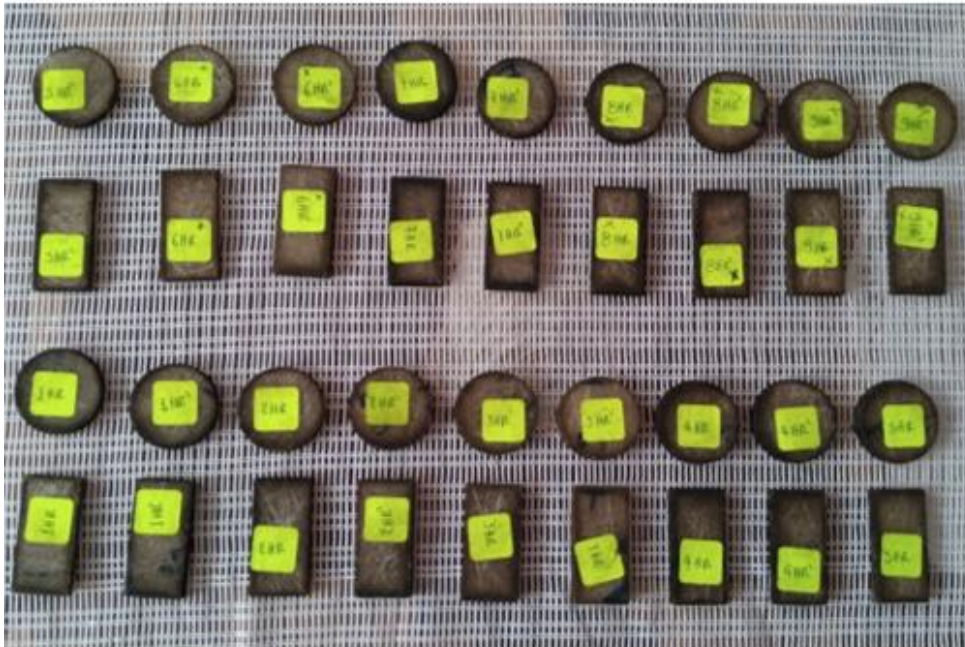


Figura 3-20. Cortes láser reales de probetas del compuesto híbrido. Fuente: Autor

A continuación, se muestra la tabulación de los parámetros de entrada combinados entre ellos, con los cuales se realizaron los cortes láser reales de probetas para el compuesto híbrido.

Tabla 3-20. Parámetros combinados utilizados en los cortes láser reales del compuesto híbrido. Fuente: Autor

COMPUESTO HÍBRIDO						
CÓDIGO	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/s)	TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL LÁSER MEDIDO EN SEGUNDOS		NÚMERO DE RÉPLICAS	
			RECTANGULARES	CIRCULARES	RECTANGULARES	CIRCULARES
1HR	85	5	21,90	17,96	2	2
2HR	85	7	20,33	13,73	2	2
3HR	85	10	14,42	9,61	2	2
4HR	90	5	23,91	18,96	2	2
5HR	90	7	17,26	13,54	2	2
6HR	90	10	11,50	9,69	2	2
7HR	100	5	23,78	19,21	2	2
8HR	100	7	17,49	13,82	2	2
9HR	100	10	12,02	9,78	2	2
					18	18
					TOTAL =	36

3.5.2.11 Fabricación de porta probeta

- Diseño de porta probetas.

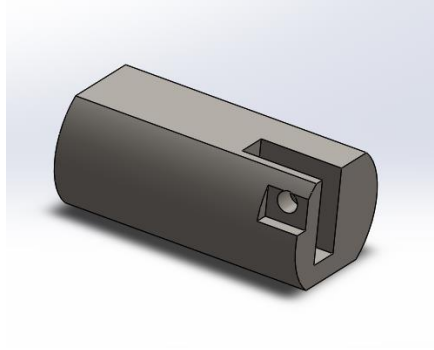


Figura 3-21. Diseño porta probetas. Fuente: Autor

Plano técnico de porta probetas en ANEXO D.

- Compra de eje de transmisión SAE 1018 de 2,5" x 150mm de longitud.



Figura 3-22. Eje SAE 1018 de 2,5". Fuente: Autor

- Porta probetas terminada y lista para su utilización.



Figura 3-23. Porta probeta terminada. Fuente: Autor

3.5.2.12 Rugosímetro

- Rugosímetro MITUTOYO SJ 210 con todas sus partes, disponible en el laboratorio de Ingeniería Mecánica.



Figura 3-24. Rugosímetro MITUTOYO SJ 210. Fuente: Autor

- Ensamble de todas las partes del rugosímetro en su correspondiente ubicación cada una.



Figura 3-25. Rugosímetro ensamblado. Fuente: Autor

3.5.2.13 Calibración de rugosímetro

- Ubicación de la base con la galga de calibración.



Figura 3-26. Galga de calibración. Fuente: Autor

- Montaje del rugosímetro sobre la base de la galga.



Figura 3-27. Ubicación para calibración. Fuente: Autor

- Calibrar hasta que coincidan los resultados de la galga.



Figura 3-28. Calibración correcta. Fuente: Autor

3.5.2.14 Medición de la rugosidad

- Ubicación de la probeta a medir y el palpador del rugosímetro sobre la porta probetas.



Figura 3-29. Ubicación de probeta y rugosímetro. Fuente: Autor

- Medición de la rugosidad en cada una de las probetas con la norma ISO 1997 seleccionado en el rugosímetro.



Figura 3-30. Medición de la rugosidad. Fuente: Autor

3.5.2.15 Efecto térmico láser

- Medición de temperaturas en la superficie mientras se está cortando, se utilizó un pirómetro CEM DT-8867H con un rango de medición máxima de 1650°C.



Figura 3-31. Medición de la temperatura superficial con el pirómetro. Fuente: Autor

- Medición de masas de las probetas de los compuestos tradicional e híbrido, con la balanza digital.



Figura 3-32. Medición de las masas de todas las probetas de los dos compuestos: tradicional e híbrido. Fuente: Autor

- Determinación de las densidades de los dos compuestos: tradicional e híbrido, mediante la ecuación 2-1.

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

- Cálculos de las temperaturas en las superficies de los compuestos: tradicional e híbrido, mediante la ecuación 2-3.

$$T(x, t) - T_i = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}}$$

- Cálculos de la distribución de temperaturas a diferentes espesores de cada probeta de los dos compuestos: tradicional e híbrido, con la ecuación 2-3.

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

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

Se presentan a continuación los diferentes resultados obtenidos de los estudios realizados como son: temperaturas medidas con el pirómetro, mediciones de la rugosidad, determinación de la densidad, cálculos de temperaturas superficiales, distribución de temperaturas a diferentes espesores. Cada uno de estos estudios fueron realizados tanto para el compuesto tradicional como para el compuesto híbrido.

4.1.1 Compuesto tradicional

4.1.1.1 Temperaturas medidas con el pirómetro

Se realizaron diferentes medidas en la superficie con un pirómetro mientras se realizaban los cortes de cada probeta, con el fin de identificar las temperaturas con cada combinación de parámetros realizados; dichas temperaturas fueron comprobadas mediante cálculos que se muestran más adelante.

Tabla 4-1. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas rectangulares de la réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional						
Probetas Rectangulares						
Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1TR	50	6	512,2	524,1	495,6	510,63
2TR	50	8	420,4	456,6	488,2	455,07
3TR	50	10	401,2	387,6	365,7	384,83
4TR	80	6	797,5	791,3	755,5	781,43
5TR	80	8	601,7	639,2	669,5	636,80
6TR	80	10	550,6	580,1	601,4	577,37
7TR	100	6	1190,3	1045,4	1111,1	1115,60
8TR	100	8	990,8	921,2	1049,9	987,30
9TR	100	10	829,6	748,9	722,1	766,87

Tabla 4-2. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas circulares de la réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional						
Probetas Circulares						
Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1TR	50	6	489,4	533,7	490,2	504,43
2TR	50	8	402,4	507,7	421,1	443,73
3TR	50	10	370,2	329,4	401,3	366,97
4TR	80	6	755,1	785,9	701,3	747,43
5TR	80	8	711,6	663,5	685,5	686,87
6TR	80	10	515,0	553,7	601,5	556,73
7TR	100	6	987,9	943,2	991,8	974,30
8TR	100	8	840,6	897,2	801,3	846,37
9TR	100	10	771,4	702,2	740,6	738,07

Tabla 4-3. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas rectangulares de la réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional						
Probetas Rectangulares						
Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1TR	50	6	501,2	550,5	520,3	524,00
2TR	50	8	430,1	426,4	498,3	451,60
3TR	50	10	419,2	365,5	385,4	390,03
4TR	80	6	737,4	711,1	775,7	741,40
5TR	80	8	611,2	669,5	689,9	656,87
6TR	80	10	540,6	578,1	611,3	576,67
7TR	100	6	1170,3	1015,5	1131,1	1105,63
8TR	100	8	975,7	931,3	1069,7	992,23
9TR	100	10	833,6	768,1	742,5	781,40

Tabla 4-4. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto tradicional, probetas circulares de la réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional						
Probetas Circulares						
Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1TR	50	6	478,3	544,6	496,5	506,47
2TR	50	8	442,4	457,7	451,1	450,40
3TR	50	10	390,2	349,4	411,3	383,63
4TR	80	6	745,6	765,8	731,6	747,67
5TR	80	8	721,8	683,6	674,4	693,27
6TR	80	10	516,6	543,8	611,5	557,30
7TR	100	6	977,8	933,6	997,7	969,70
8TR	100	8	849,4	867,9	811,3	842,87
9TR	100	10	761,1	712,7	745,6	739,80

4.1.1.2 Mediciones de la rugosidad

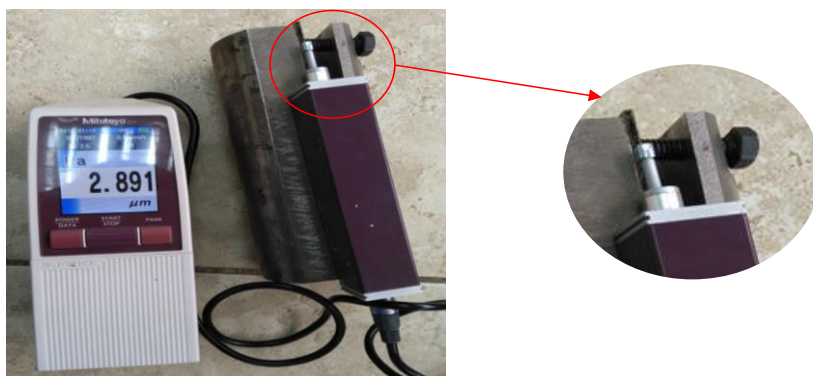
La tabulación de los resultados de la rugosidad se las realizó en un formato normalizado para este tipo de medición como se muestra a continuación.

Tabla 4-5. Resultados de la rugosidad superficial, compuesto tradicional. Fuente: Autor

 	
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECOLECCIÓN DE DATOS Y EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL COMPUESTO TRADICIONAL Matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio	
DATOS INFORMATIVOS	
Realizado por: Rony Rubén Rojas Moposita.	Supervisado por: Ing. Cristian Pérez, Mg.
Fecha: 11/12/2017	Lugar: Laboratorio de materiales
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL	
Matriz :	Resina Poliéster
Fracción Volumétrica:	70%
Refuerzo:	Fibra de vidrio
Fracción Volumétrica:	30%
Configuración de las fibras:	Tejido plano
Número de capas:	3
Dimensiones:	40x20x6 mm
PARÁMETROS DEL ENSAYO DE RUGOSIDAD	
Material:	Compuesto Tradicional (FV+RP)
Temperatura Ambiente:	20°C
Geometría:	1
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	
Acabado Superficial:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210
Norma Seleccionada:	ISO -1997

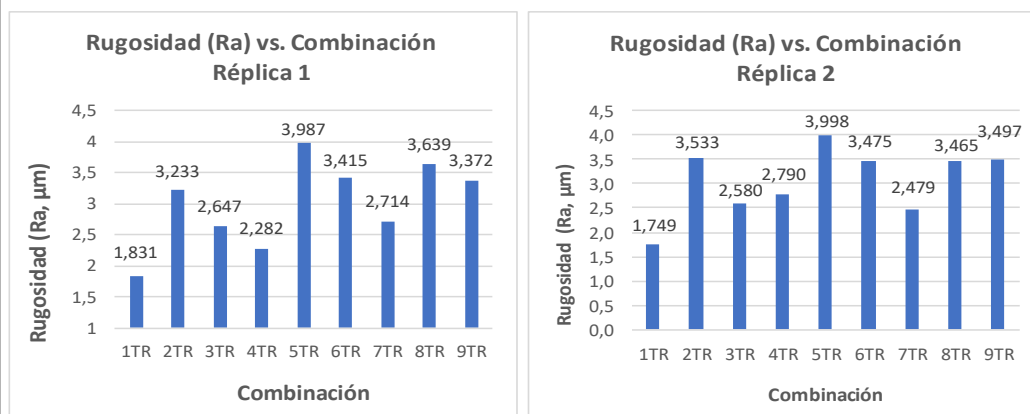
RESULTADOS DE RUGOSIDAD (μm)										
CÓDIGO		1TR	2TR	3TR	4TR	5TR	6TR	7TR	8TR	9TR
Réplica 1	Med. 1	1,880	3,468	2,712	2,225	3,957	3,346	2,891	3,508	3,075
	Med. 2	1,944	3,062	2,851	2,505	4,102	3,324	2,851	3,619	3,111
	Med. 3	1,669	3,168	2,378	2,116	3,901	3,575	2,399	3,790	3,931
Promedio 1		1,831	3,233	2,647	2,282	3,987	3,415	2,714	3,639	3,372
Desv. Estándar 1		0,144	0,211	0,243	0,201	0,104	0,139	0,273	0,142	0,484
Réplica 2	Med. 1	1,835	3,352	2,249	2,556	4,010	3,729	2,219	3,442	3,447
	Med. 2	1,604	3,833	2,885	2,901	3,985	3,050	2,292	3,086	3,066
	Med. 3	1,809	3,413	2,607	2,912	3,998	3,645	2,926	3,867	3,979
Promedio 2		1,749	3,533	2,580	2,790	3,998	3,475	2,479	3,465	3,497
Desv. Estándar 2		0,127	0,262	0,319	0,202	0,013	0,370	0,389	0,391	0,459

FOTOGRAFÍA DE MEDICIÓN



Medición de la primera réplica de la probeta 7TR

RUGOSIDAD VS. TIPO DE COMBINACIÓN



Observaciones:

La rugosidad superficial mas baja en la réplica 1 es de 1,831 μm ; pertenecientes a las probetas del código 1TR, las mismas que fueron cortadas a una potencia de 50W y velocidad de corte igual a 6mm/s.

La rugosidad superficial mas baja en la réplica 2 es de 1,749 μm ; pertenecientes a las probetas del código 1HR, las mismas que coinciden con los parámetros de la réplica 1 y que fueron cortadas a una potencia de 50W y velocidad de corte igual a 6mm/s.

Anexo E: Rugosímetro Mitutoyo SJ210

4.1.1.3 Densidad

- Determinación de masa

Tabla 4-6. Medición de masa promedio, compuesto tradicional. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional					
Medición de masa (g)					
Código	Probetas rectangulares		Probetas circulares		Promedio
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	
1TR	3,1	3,2	2,8	2,8	2,98
2TR	3,3	3,3	2,9	2,9	3,10
3TR	3,5	3,2	3,1	3,1	3,23
4TR	3,3	3,2	3,2	3,1	3,20
5TR	3,6	3,3	3,1	3,1	3,28
6TR	3,6	3,3	3,2	3,1	3,30
7TR	3,6	3,3	3,1	3,2	3,30
8TR	3,5	3,5	3,1	3,2	3,33
9TR	3,3	3,3	2,9	3,3	3,20
Promedio Total (g)					3,21
Promedio Total (kg)					0,00321

- Densidad

$$v = 2,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{0,00321 \text{ kg}}{0,0000024 \text{ m}^3} = 1331,87 \text{ kg/m}^3$$

- Tiempo de pulso láser

Para determinar el tiempo de pulso se tomó como ejemplo la velocidad de corte de 6 mm/s, el tiempo del primer corte de 20 s, la longitud de corte de la probeta rectangular que es igual a 120 mm y el diámetro de haz láser de 0,2 mm como se muestra en la figura 4-1 en la parte superior, en la parte inferior de la misma figura se muestra otro ejemplo para comprobar el resultado anterior; en este caso se tomaron los mismos datos con el único cambio del diámetro de haz láser que para este caso fue de 0,5 mm.

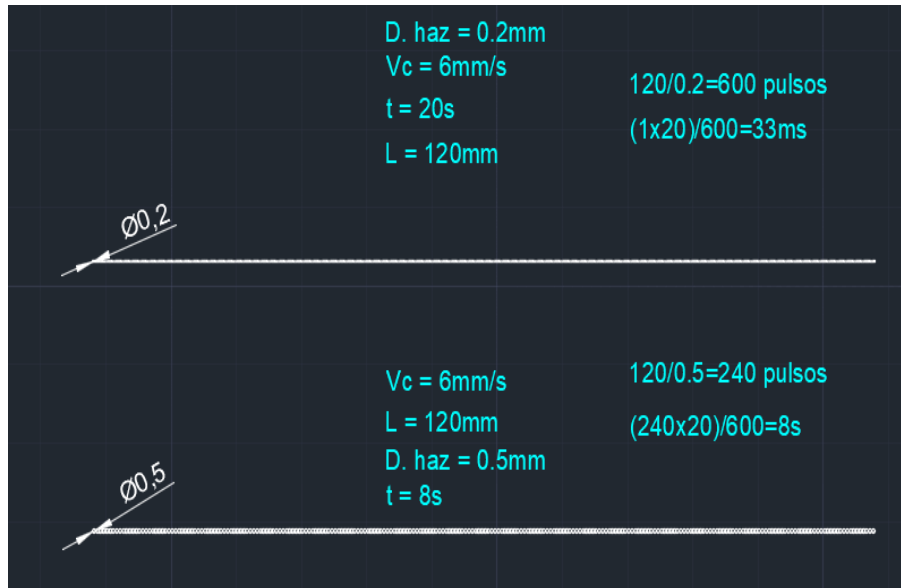


Figura 4-1. Justificación para el tiempo de pulso. Fuente: Autor

Al dividir la longitud total del corte para el diámetro del haz láser dio como resultado 600 pulsos, con el tiempo total de corte y el número de pulsos se aplicó una regla de tres para determinar el tiempo del primer pulso donde se obtuvieron 33 milisegundos (ms); en el segundo caso con el cambio del diámetro de haz láser de 0,5 mm se procedió a calcular el tiempo con un proceso similar al anterior para lo cual el resultado fue de 8 s, este resultado comprobó que el tiempo de pulso va a ser el mismo si están a la misma velocidad de corte, pero el tiempo va a aumentar o disminuir en función del diámetro del haz láser.

Con el resultado de los ejemplos anteriores se formuló una tabla en la cual se calcularon los tiempos de pulsos a diferentes velocidades de corte que se utilizaron en los ensayos. Los resultados son los mismos para los dos tipos de compuestos.

Tabla 4-7. Cálculo de diferentes tiempos de pulso láser. Fuente: Autor

Probetas rectangulares						
Vel. 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)
5	120	24,00	0,20	600	0,040	40,0
6	120	20,00	0,20	600	0,033	33,3
7	120	17,14	0,20	600	0,029	28,6
8	120	15,00	0,20	600	0,025	25,0
10	120	12,00	0,20	600	0,020	20,0
Probetas circulares						
Vel. 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)
5	94,25	18,85	0,20	471,25	0,040	40,0
6	94,25	15,71	0,20	471,25	0,033	33,3
7	94,25	13,46	0,20	471,25	0,029	28,6
8	94,25	11,78	0,20	471,25	0,025	25,0
10	94,25	9,43	0,20	471,25	0,020	20,0

4.1.1.4 Temperatura superficial calculada

Tabla 4-7. Propiedades y datos generales para los cálculos del compuesto tradicional.

Fuente: Autor

PROPIEDADES TÉRMICAS				DATOS INICIALES	
PROPIEDAD	F.V	R.P	C. Tradicional	FACTOR	VALOR
ρ (kg/m ³) =	2400	1200	1331,87	$A = Ar.$ exposición (m ²)	1,26E-05
λ (°C ⁻¹) =	5,4E-06	0,000050	0,000050	$x =$ Distancia superficial (m)	0
K (W/m°C) =	0,043	0,4	0,4	$T_i =$ Temp. inicial (°C)	22
C_p (J/kg°C) =	840	1350	1350	$\pi =$	3,141592654
				$\phi_e = \phi$ exposición (mm)	4
				$r_e = r.$ exposición (mm)	2
				$r = r.$ exposición (m)	0,002
				$\phi h = \phi$ haz láser (mm)	0,2
				$dr =$ Distancia de corte rectangular (mm)	120
				$dc =$ Distancia de corte circular (mm)	94,25

Tabla 4-8. Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto tradicional, probetas rectangulares. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional Probetas Rectangulares								
Código	P = Potencia (W)	Vc = Vel. Corte (mm/s)	tc = Tiempo total de corte (s)	tp = Tiempo de pulso (s)	e = Energía transferida (J)	es = Pulso de energía (J/m ²)	α = Difusividad térmica (m ² /s)	T(x,t) = Temperatura superficial (°C)
			$tc = \frac{dr}{Vc}$		$e = P * tp$	$es = \frac{e}{A}$	$\alpha = \frac{k}{\rho * Cp}$	$T(x,t) - Ti = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}}$
1TR	50	6	20,00	0,033	1,667	132629,119	2,22E-07	505,28
2TR	50	8	15,00	0,025	1,250	99471,839	2,22E-07	440,53
3TR	50	10	12,00	0,020	1,000	79577,472	2,22E-07	396,34
4TR	80	6	20,00	0,033	2,667	212206,591	2,22E-07	795,24
5TR	80	8	15,00	0,025	2,000	159154,943	2,22E-07	691,65
6TR	80	10	12,00	0,020	1,600	127323,954	2,22E-07	620,95
7TR	100	6	20,00	0,033	3,333	265258,238	2,22E-07	988,55
8TR	100	8	15,00	0,025	2,500	198943,679	2,22E-07	859,06
9TR	100	10	12,00	0,020	2,000	159154,943	2,22E-07	770,69

Tabla 4-9. Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto tradicional, probetas circulares. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional Probetas Circulares								
Código	P = Potencia (W)	Vc = Vel. Corte (mm/s)	tc = Tiempo total de corte (s)	tp = Tiempo de pulso (s)	e = Energía transferida (J)	es = Pulso de energía (J/m ²)	α = Difusividad térmica (m ² /s)	T(x,t) = Temperatura superficial (°C)
			$tc = \frac{dr}{Vc}$		$e = P * tp$	$es = \frac{e}{A}$	$\alpha = \frac{k}{\rho * Cp}$	$T(x,t) - Ti = \frac{e_s}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}}$
1TR	50	6	15,71	0,033	1,667	132629,119	2,22E-07	505,28
2TR	50	8	11,78	0,025	1,250	99471,839	2,22E-07	440,53
3TR	50	10	9,43	0,020	1,000	79577,472	2,22E-07	396,34
4TR	80	6	15,71	0,033	2,667	212206,591	2,22E-07	795,24
5TR	80	8	11,78	0,025	2,000	159154,943	2,22E-07	691,65
6TR	80	10	9,43	0,020	1,600	127323,954	2,22E-07	620,95
7TR	100	6	15,71	0,033	3,333	265258,238	2,22E-07	988,55
8TR	100	8	11,78	0,025	2,500	198943,679	2,22E-07	859,06
9TR	100	10	9,43	0,020	2,000	159154,943	2,22E-07	770,69

4.1.1.5 Tabulación y selección de temperaturas superficiales

Tabla 4-10. Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto tradicional, probetas rectangulares. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional			
Probetas Rectangulares			
Tabulación y Selección de Temperaturas Superficiales (°C)			
Código	Cálculo Analítico	Pirómetro	
		Réplica 1	Réplica 2
1TR	505,28	510,63	524,00
2TR	440,53	455,07	451,60
3TR	396,34	384,83	390,03
4TR	795,24	781,43	741,40
5TR	691,65	636,80	656,87
6TR	620,95	577,37	576,67
7TR	988,55	1115,60	1105,63
8TR	859,06	987,30	992,23
9TR	770,69	766,87	781,40

Tabla 4-11. Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto tradicional, probetas circulares. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional			
Probetas Circulares			
Tabulación y Selección de Temperaturas Superficiales (°C)			
Código	Cálculo Analítico	Pirómetro	
		Réplica 1	Réplica 2
1TR	505,28	504,43	506,47
2TR	440,53	443,73	450,40
3TR	396,34	366,97	383,63
4TR	795,24	747,43	747,67
5TR	691,65	686,87	693,27
6TR	620,95	556,73	557,30
7TR	988,55	974,30	969,70
8TR	859,06	846,37	842,87
9TR	770,69	738,07	739,80

Las temperaturas medidas con el pirómetro fueron seleccionadas para los cálculos que siguen más adelante; fueron seleccionados debido a la exactitud y poca diferencia entre las dos réplicas.

4.1.1.6 Distribución de temperaturas a diferentes espesores

Tabla 4-12. Espesores para cálculos de distribución de temperaturas en el compuesto tradicional. Fuente: Autor

Espesores		
Designación	Dimensión (mm)	Dimensión (m)
x1	0	0
x2	2	0,002
x3	3,2	0,0032

Tabla 4-13. Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas rectangulares, réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional Probetas Rectangulares Réplica 1					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4\alpha t}\right)$
1TR	50	6	510,63	333,72	176,61
2TR	50	8	455,07	298,27	159,02
3TR	50	10	384,83	253,47	136,80
4TR	80	6	781,43	506,47	262,29
5TR	80	8	636,80	414,21	216,52
6TR	80	10	577,37	376,29	197,72
7TR	100	6	1115,60	719,65	368,02
8TR	100	8	987,30	637,81	327,42
9TR	100	10	766,87	497,18	257,68

Tabla 4-14. Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas circulares, réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional					
Probetas Circulares					
Réplica 1					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4\alpha t}\right)$
1TR	50	6	504,43	329,76	174,64
2TR	50	8	443,73	291,04	155,44
3TR	50	10	366,97	242,07	131,15
4TR	80	6	747,43	484,78	251,53
5TR	80	8	686,87	446,15	232,37
6TR	80	10	556,73	363,13	191,19
7TR	100	6	974,30	629,51	323,31
8TR	100	8	846,37	547,90	282,83
9TR	100	10	738,07	478,81	248,57

Tabla 4-15. Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas rectangulares, réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional					
Probetas Rectangulares					
Réplica 2					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - Ti = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4at}\right)$	$T(x,t) - Ti = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4at}\right)$	$T(x,t) - Ti = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4at}\right)$
1TR	50	6	524,00	342,25	180,83
2TR	50	8	451,60	296,06	157,93
3TR	50	10	390,03	256,78	138,45
4TR	80	6	741,40	480,94	249,62
5TR	80	8	656,87	427,01	222,87
6TR	80	10	576,67	375,85	197,50
7TR	100	6	1105,63	713,30	364,87
8TR	100	8	992,23	640,95	328,98
9TR	100	10	781,40	506,45	262,28

Tabla 4-16. Distribución de temperaturas en el compuesto tradicional, probetas circulares, réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional					
Probetas Circulares					
Réplica 2					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4\alpha t}\right)$
1TR	50	6	506,47	331,06	175,29
2TR	50	8	450,40	295,29	157,55
3TR	50	10	383,63	252,70	136,42
4TR	80	6	747,67	484,93	251,60
5TR	80	8	693,27	450,23	234,39
6TR	80	10	557,30	363,49	191,37
7TR	100	6	969,70	626,58	321,86
8TR	100	8	842,87	545,67	281,72
9TR	100	10	739,80	479,92	249,11

4.1.2 Compuesto híbrido

4.1.2.1 Temperaturas medidas con el pirómetro

Tabla 4-17. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas rectangulares de la réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido						
Probetas Rectangulares						
Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1HR	85	5	822,7	895,4	852,0	856,70
2HR	85	7	743,6	765,4	804,5	771,17
3HR	85	10	686,5	706,4	612,1	668,33
4HR	90	5	950,0	1005,1	975,4	976,83
5HR	90	7	878,8	807,8	851,6	846,07
6HR	90	10	655,6	699,0	610,1	654,90
7HR	100	5	1100,8	1120,4	1056,2	1092,47
8HR	100	7	889,5	801,3	857,9	849,57
9HR	100	10	796,9	725,9	772,7	765,17

Tabla 4-18. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas circulares de la réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido						
Probetas Circulares						
Réplica 1						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1HR	85	5	801,6	856,2	898,4	852,07
2HR	85	7	701,3	775,4	743,5	740,07
3HR	85	10	627,8	672,6	654,8	651,73
4HR	90	5	956,5	998,8	955,4	970,23
5HR	90	7	802,5	858,9	898,1	853,17
6HR	90	10	645,4	601,4	612,2	619,67
7HR	100	5	1008,8	993,2	1100,4	1034,13
8HR	100	7	889,9	847,8	875,2	870,97
9HR	100	10	746,2	803,6	801,5	783,77

Tabla 4-19. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas rectangulares de la réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido						
Probetas Rectangulares						
Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1HR	85	5	832,6	885,3	862,1	860,00
2HR	85	7	752,7	756,3	813,5	774,17
3HR	85	10	672,6	721,1	622,2	671,97
4HR	90	5	942,3	1025,5	964,3	977,37
5HR	90	7	887,8	817,6	849,7	851,70
6HR	90	10	664,7	691,8	619,1	658,53
7HR	100	5	1105,1	1129,9	1026,3	1087,10
8HR	100	7	899,2	811,2	849,9	853,43
9HR	100	10	785,8	731,7	769,5	762,33

Tabla 4-20. Medición de temperaturas con el pirómetro del compuesto híbrido, probetas circulares de la réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido						
Probetas Circulares						
Réplica 2						
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Mediciones de temperatura superficial °C			Temperatura superficial promedio (°C)
			1era	2da	3era	
1HR	85	5	809,9	844,3	889,9	848,03
2HR	85	7	711,5	755,2	733,6	733,43
3HR	85	10	633,6	681,9	649,7	655,07
4HR	90	5	961,4	989,9	943,2	964,83
5HR	90	7	809,1	837,6	887,3	844,67
6HR	90	10	638,6	612,5	608,5	619,87
7HR	100	5	1012,2	987,5	1098,7	1032,80
8HR	100	7	876,7	837,6	865,8	860,03
9HR	100	10	754,6	815,4	809,2	793,07

4.1.2.2 Mediciones de la rugosidad

Tabla 4-21. Resultados de la rugosidad superficial, compuesto híbrido. Fuente: Autor



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



**RECOLECCIÓN DE DATOS Y EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL
COMPUESTO HÍBRIDO**

Matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio y cabuya

DATOS INFORMATIVOS

Realizado por: Rony Rubén Rojas Moposita.	Supervisado por: Ing. Cristian Pérez, Mg.
Fecha: 12/12/2017	Lugar: Laboratorio de materiales

ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL

Matriz :	Resina Poliéster
Fracción Volumétrica:	70%
Refuerzo:	Fibra de vidrio
	Fibra de cabuya
Fracción Volumétrica:	20%
	10%
Configuración de las fibras:	Tejido plano
Número de capas:	3
Dimensiones:	40x20x6 mm

PARÁMETROS DEL ENSAYO DE RUGOSIDAD

Material:	Compuesto Híbrido (FV+FN+RP)
Temperatura Ambiente:	20°C
Geometría:	1

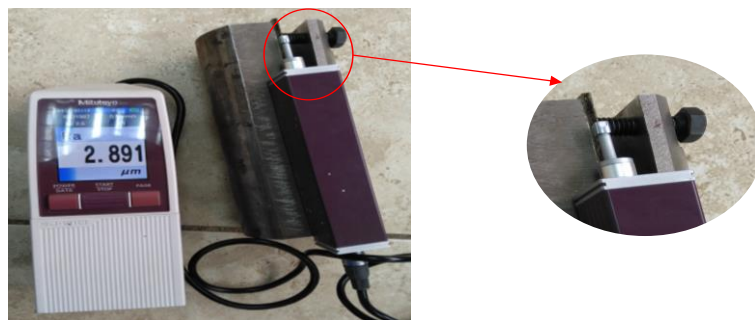
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

Acabado Superficial:	Rugosímetro Mitutoyo SJ210
Norma Seleccionada:	ISO -1997

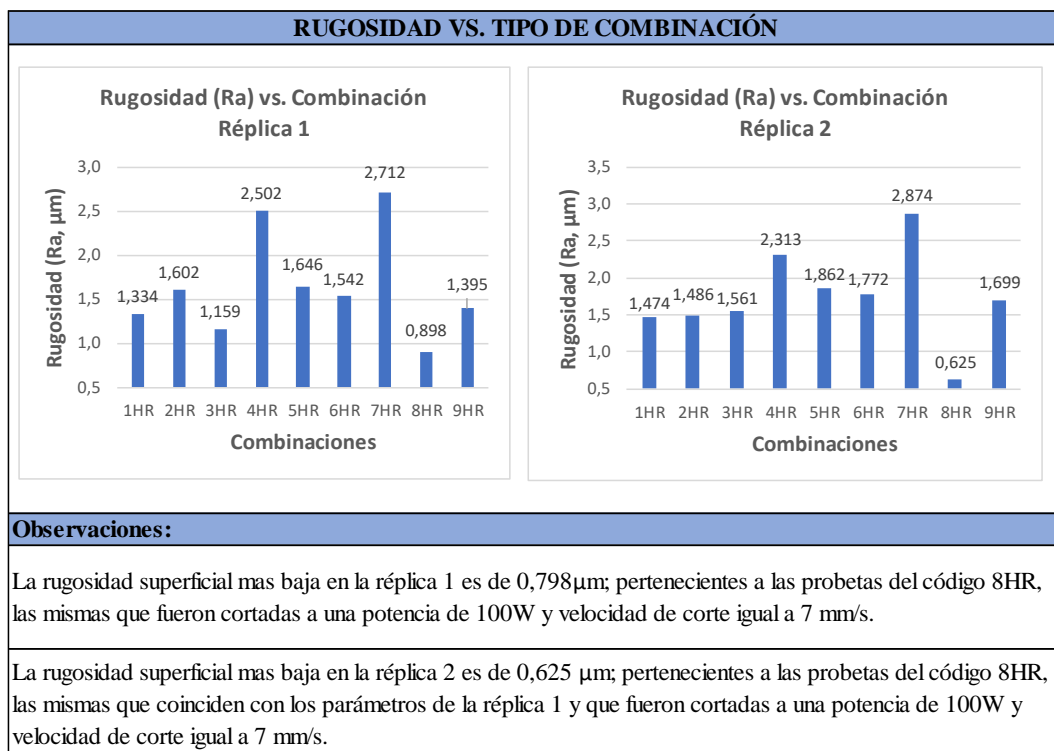
RESULTADOS DE RUGOSIDAD (µm)

PROBETAS		1HR	2HR	3HR	4HR	5HR	6HR	7HR	8HR	9HR
Réplica 1	Med. 1	1,100	1,149	1,117	2,080	1,930	1,822	3,425	0,923	1,205
	Med. 2	1,370	1,788	1,031	2,566	1,218	1,031	3,098	0,968	1,277
	Med. 3	1,533	1,870	1,628	2,861	1,791	1,772	3,411	0,503	1,703
Promedio 1		1,334	1,602	1,259	2,502	1,646	1,542	3,311	0,798	1,395
Desv. Estándar 1		0,219	0,395	0,323	0,394	0,377	0,443	0,185	0,256	0,269
Réplica 2	Med. 1	1,566	1,930	1,747	2,071	1,649	1,749	3,140	0,593	1,950
	Med. 2	1,200	1,431	1,623	2,013	1,364	1,953	3,767	0,615	1,537
	Med. 3	1,655	1,097	1,313	2,856	1,625	1,213	3,192	0,668	1,611
Promedio 2		1,474	1,486	1,561	2,313	1,546	1,638	3,366	0,625	1,699
Desv. Estándar 2		0,241	0,419	0,224	0,471	0,158	0,382	0,348	0,039	0,220

FOTOGRAFÍA DE MEDICIÓN



Medición de la primera réplica de la probeta 7TR



4.1.2.3 Densidad

- Determinación de masa

Tabla 4-22. Medición de masa promedio, compuesto tradicional. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido					
Medición de masa (g)					
Código	Probetas rectangulares		Probetas circulares		Promedio
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 1	Réplica 2	
1HR	3,4	3,5	2,9	3,2	3,25
2HR	3,4	3,7	3	3,2	3,33
3HR	3,5	4,1	3	3,3	3,48
4HR	3,3	3,3	3,3	3	3,23
5HR	3,3	3,7	3,1	3,3	3,35
6HR	3,5	3,5	3,2	3	3,30
7HR	3,6	4	3	3	3,40
8HR	3,6	4	3,2	4	3,70
9HR	3,7	3,9	3	3,2	3,45
Promedio Total (g)					3,39
Promedio Total (kg)					0,00339

- Densidad

$$v = 2,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{0,00339 \text{ kg}}{0,0000024 \text{ m}^3} = 1404,46 \text{ kg/m}^3$$

4.1.2.4 Temperatura superficial calculada

Tabla 4-23. Propiedades y datos generales para los cálculos del compuesto híbrido.

Fuente: Autor

PROPIEDADES TÉRMICAS				
PROPIEDAD	F.V	R.P	F.N	C. Híbrido
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} =$	2400	1200	1460	1404,46
$\lambda \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)} =$	0,0000054	0,000050	0,0000027	5,0E-05
$K \text{ (W/m}^\circ\text{C)} =$	0,043	0,4	0,0215	0,4
$C_p \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} =$	840	1350	420	1350

DATOS INICIALES	
FACTOR	VALOR
$A = \text{Ar. exposición (m}^2\text{)}$	1,26E-05
$x = \text{Distancia superficial (m)}$	0
$T_i = \text{Temp. inicial (}^\circ\text{C)}$	22
$\pi =$	3,141592654
$\phi_e = \phi \text{ exposición (mm)}$	4
$r_e = r. \text{ exposición (mm)}$	2
$r_e = r. \text{ exposición (m)}$	0,002
$\phi_h = \phi \text{ haz láser (mm)}$	0,2
$d_r = \text{Distancia de corte rectangular (mm)}$	120
$d_c = \text{Distancia de corte circular (mm)}$	94,25

Tabla 4-24. Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto híbrido, probetas rectangulares. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido Probetas Rectangulares								
Código	P = Potencia (W)	Vc = Vel. Corte (mm/s)	tc = Tiempo total de corte (s)	tp = Tiempo de pulso (s)	e = Energía transferida (J)	es = Pulso de energía (J/m ²)	α = Difusividad térmica (m ² /s)	T(x,t) = Temperatura superficial (°C)
			$tc = \frac{dr}{Vc}$		$e = P * tp$	$es = \frac{e}{A}$	$\alpha = \frac{k}{\rho * Cp}$	$T(x,t) - Ti = \frac{es}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}}$
1HR	85	5	24,00	0,040	3,400	270563,403	0,00000021097	898,42
2HR	85	7	17,14	0,029	2,429	193259,574	0,00000021097	762,71
3HR	85	10	12,00	0,020	1,700	135281,702	0,00000021097	641,72
4HR	90	5	24,00	0,040	3,600	286478,898	0,00000021097	949,98
5HR	90	7	17,14	0,029	2,571	204627,784	0,00000021097	806,28
6HR	90	10	12,00	0,020	1,800	143239,449	0,00000021097	678,18
7HR	100	5	24,00	0,040	4,000	318309,886	0,00000021097	1053,08
8HR	100	7	17,14	0,029	2,857	227364,204	0,00000021097	893,43
9HR	100	10	12,00	0,020	2,000	159154,943	0,00000021097	751,09

Tabla 4-25. Cálculos necesarios para determinar la temperatura superficial, compuesto híbrido, probetas circulares. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido Probetas Circulares								
Código	P = Potencia (W)	Vc = Vel. Corte (mm/s)	tc = Tiempo total de corte (s)	tp = Tiempo de pulso (s)	e = Energía transferida (J)	es = Pulso de energía (J/m ²)	α = Difusividad térmica (m ² /s)	T(x,t) = Temperatura superficial (°C)
			$tc = \frac{dr}{Vc}$		$e = P * tp$	$es = \frac{e}{A}$	$\alpha = \frac{k}{\rho * Cp}$	$T(x,t) - Ti = \frac{es}{k \sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}}$
1HR	85	5	18,85	0,040	3,400	270563,403	0,00000021097	898,42
2HR	85	7	13,46	0,029	2,429	193259,574	0,00000021097	762,71
3HR	85	10	9,43	0,020	1,700	135281,702	0,00000021097	641,72
4HR	90	5	18,85	0,040	3,600	286478,898	0,00000021097	949,98
5HR	90	7	13,46	0,029	2,571	204627,784	0,00000021097	806,28
6HR	90	10	9,43	0,020	1,800	143239,449	0,00000021097	678,18
7HR	100	5	18,85	0,040	4,000	318309,886	0,00000021097	1053,08
8HR	100	7	13,46	0,029	2,857	227364,204	0,00000021097	893,43
9HR	100	10	9,43	0,020	2,000	159154,943	0,00000021097	751,09

4.1.2.5 Tabulación y selección de temperaturas superficiales

Tabla 4-26. Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto híbrido, probetas rectangulares. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido			
Probetas Rectangulares			
Tabulación y Selección de Temperaturas Superficiales (°C)			
Código	Cálculo Analítico	Pirómetro	
		Réplica 1	Réplica 2
1HR	898,42	856,70	860,00
2HR	762,71	771,17	774,17
3HR	641,72	668,33	671,97
4HR	949,98	976,83	977,37
5HR	806,28	846,07	851,70
6HR	678,18	654,90	658,53
7HR	1053,08	1092,47	1087,10
8HR	893,43	849,57	853,43
9HR	751,09	765,17	762,33

Tabla 4-27. Comparación de temperaturas medidas con las calculadas, compuesto híbrido, probetas circulares. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido			
Probetas Circulares			
Tabulación y Selección de Temperaturas Superficiales (°C)			
Código	Cálculo Analítico	Pirómetro	
		Réplica 1	Réplica 2
1HR	898,42	852,07	848,03
2HR	762,71	740,07	733,43
3HR	641,72	651,73	655,07
4HR	949,98	970,23	964,83
5HR	806,28	853,17	844,67
6HR	678,18	619,67	619,87
7HR	1053,08	1034,13	1032,80
8HR	893,43	870,97	860,03
9HR	751,09	783,77	793,07

Las temperaturas medidas con el pirómetro fueron seleccionadas para los cálculos que siguen más adelante; fueron seleccionados debido a la exactitud y poca diferencia entre las dos réplicas.

4.1.2.6 Distribución de temperaturas a diferentes espesores

Tabla 4-28. Espesores para cálculos de distribución de temperaturas en el compuesto híbrido. Fuente: Autor

Espesores		
Designación	Dimensión (mm)	Dimensión (m)
x1	0	0
x2	2	0,002
x3	3,2	0,0032

Tabla 4-29. Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas rectangulares, réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido Probetas Rectangulares Réplica 1					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4at}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4at}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4at}\right)$
1HR	85	5	856,70	400,82	132,46
2HR	85	7	771,17	362,00	121,14
3HR	85	10	668,33	315,33	107,53
4HR	90	5	976,83	455,34	148,36
5HR	90	7	846,07	396,00	131,05
6HR	90	10	654,90	309,24	105,75
7HR	100	5	1092,47	507,82	163,66
8HR	100	7	849,57	397,58	131,52
9HR	100	10	765,17	359,28	120,35

Tabla 4-30. Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas circulares, réplica 1. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido					
Probetas Circulares					
Réplica 1					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4\alpha t}\right)$
1HR	85	5	852,07	408,70	134,76
2HR	85	7	740,07	357,87	119,94
3HR	85	10	651,73	317,78	108,25
4HR	90	5	970,23	462,33	150,40
5HR	90	7	853,17	409,20	134,90
6HR	90	10	619,67	303,23	104,00
7HR	100	5	1034,13	491,33	158,85
8HR	100	7	870,97	417,28	137,26
9HR	100	10	783,77	377,71	125,72

Tabla 4-31. Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas rectangulares, réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido Probetas Rectangulares Réplica 2					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4\alpha t}\right)$
1HR	85	5	860,00	402,32	132,90
2HR	85	7	774,17	363,36	121,54
3HR	85	10	671,97	316,98	108,01
4HR	90	5	977,37	455,59	148,43
5HR	90	7	851,70	398,55	131,80
6HR	90	10	658,53	310,89	106,24
7HR	100	5	1087,10	505,39	162,95
8HR	100	7	853,43	399,34	132,03
9HR	100	10	762,33	357,99	119,97

Tabla 4-32. Distribución de temperaturas en el compuesto híbrido, probetas circulares, réplica 2. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido Probetas Circulares Réplica 2					
Código	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Temperaturas a diferentes espesores (°C)		
			x1	x2	x3
			$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x1^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x2^2}{4\alpha t}\right)$	$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k\sqrt{\frac{\pi t}{\alpha}}} \cdot \exp\left(-\frac{x3^2}{4\alpha t}\right)$
1HR	85	5	848,03	406,87	134,22
2HR	85	7	733,43	354,86	119,06
3HR	85	10	655,07	319,30	108,69
4HR	90	5	964,83	459,88	149,68
5HR	90	7	844,67	405,34	133,78
6HR	90	10	619,87	303,32	104,03
7HR	100	5	1032,80	490,73	158,68
8HR	100	7	860,03	412,32	135,81
9HR	100	10	793,07	381,93	126,95

4.1.3 Temperaturas críticas

A continuación, se muestran las temperaturas críticas generadas en la superficie debido a que es la zona donde se detectó mayor cantidad de material quemado en el proceso del corte láser.

- Compuesto tradicional

Tabla 4-33. Temperaturas críticas del compuesto tradicional, probetas rectangulares.

Fuente: Autor

Compuesto Tradicional		
Probetas Rectangulares		
Temperaturas Críticas (°C)		
Código	Réplica 1	Réplica 2
1TR	510,63	524,00
2TR	455,07	451,60
3TR	384,83	390,03
4TR	781,43	741,40
5TR	636,80	656,87
6TR	577,37	576,67
7TR	1115,60	1105,63
8TR	987,30	992,23
9TR	766,87	781,40

Tabla 4-34. Temperaturas críticas del compuesto tradicional, probetas circulares.

Fuente: Autor

Compuesto Tradicional		
Probetas Circulares		
Temperaturas Críticas (°C)		
Código	Réplica 1	Réplica 2
1TR	504,43	506,47
2TR	443,73	450,40
3TR	366,97	383,63
4TR	747,43	747,67
5TR	686,87	693,27
6TR	556,73	557,30
7TR	974,30	969,70
8TR	846,37	842,87
9TR	738,07	739,80

- Compuesto híbrido

Tabla 4-35. Temperaturas críticas del compuesto híbrido, probetas rectangulares.

Fuente: Autor

Compuesto Híbrido		
Probetas Rectangulares		
Temperaturas Críticas (°C)		
Código	Réplica 1	Réplica 2
1HR	856,70	860,00
2HR	771,17	774,17
3HR	668,33	671,97
4HR	976,83	977,37
5HR	846,07	851,70
6HR	654,90	658,53
7HR	1092,47	1087,10
8HR	849,57	853,43
9HR	765,17	762,33

Tabla 4-36. Temperaturas críticas del compuesto híbrido, probetas circulares. Fuente:

Autor

Compuesto Híbrido		
Probetas Circulares		
Temperaturas Críticas (°C)		
Código	Réplica 1	Réplica 2
1HR	852,07	848,03
2HR	740,07	733,43
3HR	651,73	655,07
4HR	970,23	964,83
5HR	853,17	844,67
6HR	619,67	619,87
7HR	1034,13	1032,80
8HR	870,97	860,03
9HR	783,77	793,07

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.2.1 Análisis de rugosidad (Ra) del compuesto tradicional formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio

Se realizó una prueba de normalidad de los datos obtenidos de la rugosidad superficial (Ra) del compuesto tradicional superficial para verificar que tengan una distribución normal; una vez realizada la prueba de normalidad se procedió a realizar el análisis del diseño factorial para finalmente analizar los resultados obtenidos.

4.2.1.1 Prueba de normalidad de los datos de rugosidad (Ra)

- **Hipótesis:**

- H_0 = Hipótesis nula
- H_A = Hipótesis alternativa

H_0 = Los datos de rugosidad (Ra) del compuesto tradicional tienen distribución normal.

H_A = Los datos de rugosidad (Ra) del compuesto tradicional no tienen distribución normal.

Número de muestras: 36

Nivel de significancia: 0,05

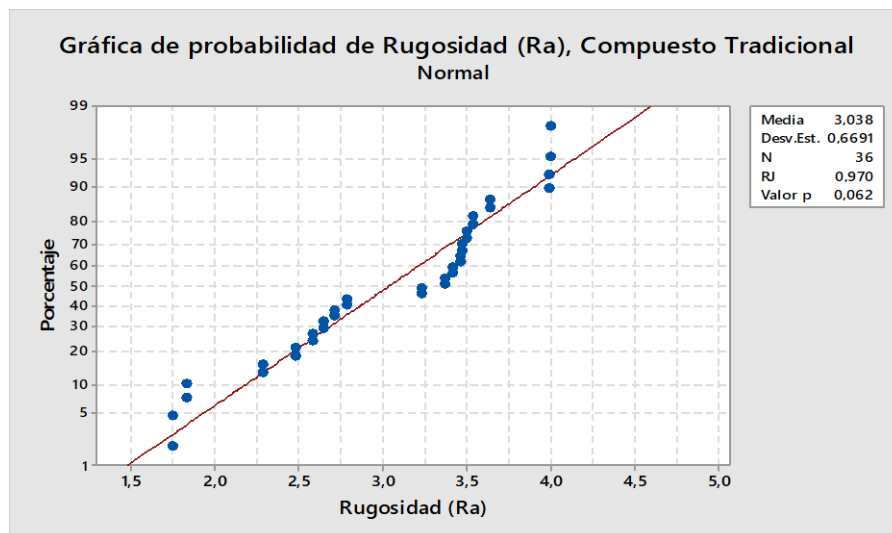


Figura 4-1. Probabilidad normal de la rugosidad (Ra), compuesto tradicional.

Fuente: Software Minitab® 18.1

- **Estadístico de prueba:**

Ryan - Joiner (RJ) = 0,970

Valor - p = 0,062

Decisión = No se rechaza la hipótesis nula

Conclusión = La prueba de normalidad es mayor a la significancia del 5%, por lo que se concluye que las muestras de rugosidad tienen distribución normal.

4.2.1.2 Análisis del diseño factorial de la rugosidad (Ra) del compuesto tradicional

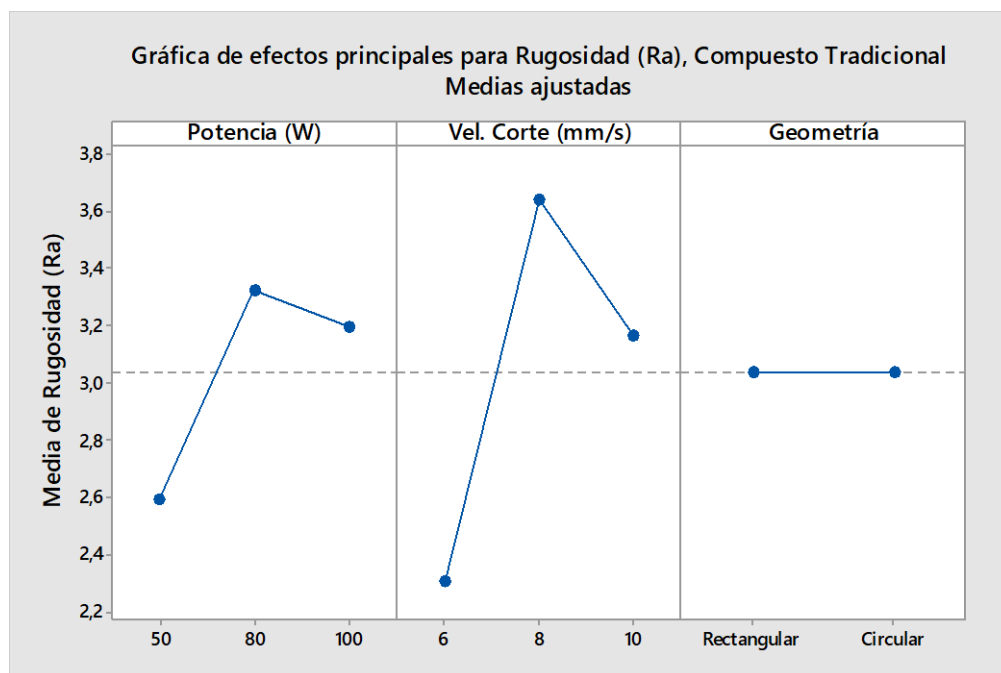


Figura 4-2. Efectos principales de la rugosidad (Ra), compuesto tradicional.
Fuente: Software Minitab® 18.1

En la figura 4-2 se puede notar que los factores de estudio que tienen gran significancia para la obtención de la rugosidad (Ra) en el compuesto tradicional son la potencia y velocidad de corte; por otra parte, se puede descartar la geometría del corte porque no presenta una significancia mayor debido a que los resultados obtenidos fueron muy similares entre uno y otro.

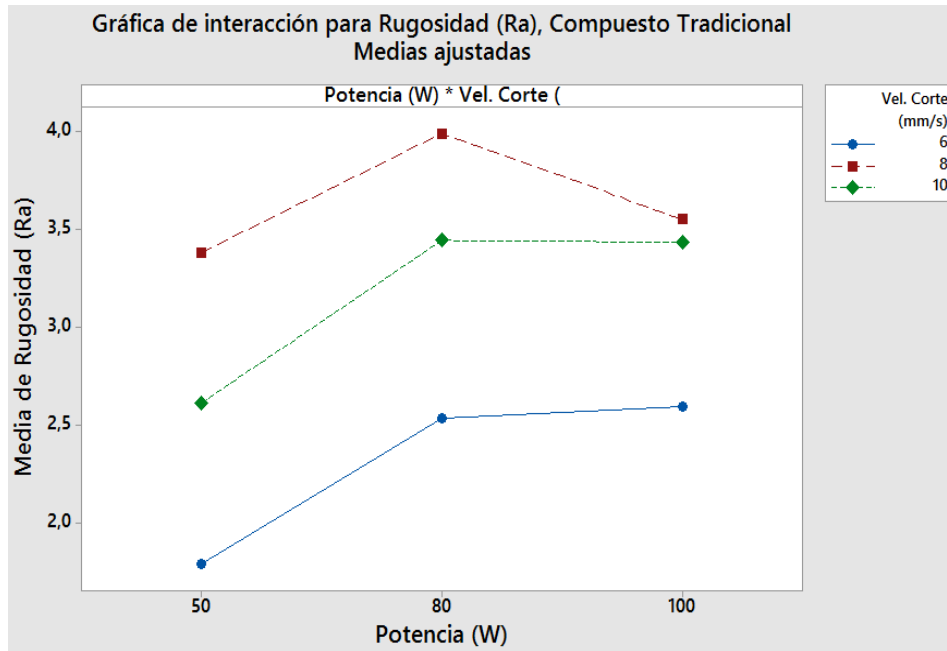


Figura 4-3. Interacción para la rugosidad (Ra), compuesto tradicional.
Fuente: Software Minitab® 18.1

Partiendo de los factores con gran significancia obtenidos de la figura 4-2 para definir la rugosidad (Ra) en el compuesto tradicional, se procede a la interpretación de la figura 4-3 que está basada en datos reales.

- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 50W y una velocidad de corte (Vc) de 6mm/s se obtiene una rugosidad media de $1,79\mu\text{m}$; esta es la rugosidad más baja.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 80W y una velocidad de corte (Vc) de 8mm/s se obtiene una rugosidad media de $3,99\mu\text{m}$; esta es la rugosidad más alta.

4.2.2 Análisis de rugosidad (Ra) del compuesto híbrido formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio y cabuya

Se realizó una prueba de normalidad de los datos obtenidos de la rugosidad superficial (Ra) del compuesto híbrido para verificar que tengan una distribución normal; una vez realizada la prueba de normalidad se procedió a realizar el análisis del diseño factorial para finalmente analizar los resultados obtenidos.

4.2.2.1 Prueba de normalidad de los datos de rugosidad (Ra)

- **Hipótesis:**

- H_0 = Hipótesis nula
- H_A = Hipótesis alternativa

H_0 = Los datos de rugosidad (Ra) del compuesto híbrido tienen distribución normal.

H_A = Los datos de rugosidad (Ra) del compuesto híbrido no tienen distribución normal.

Número de muestras: 36

Nivel de significancia: 0,05

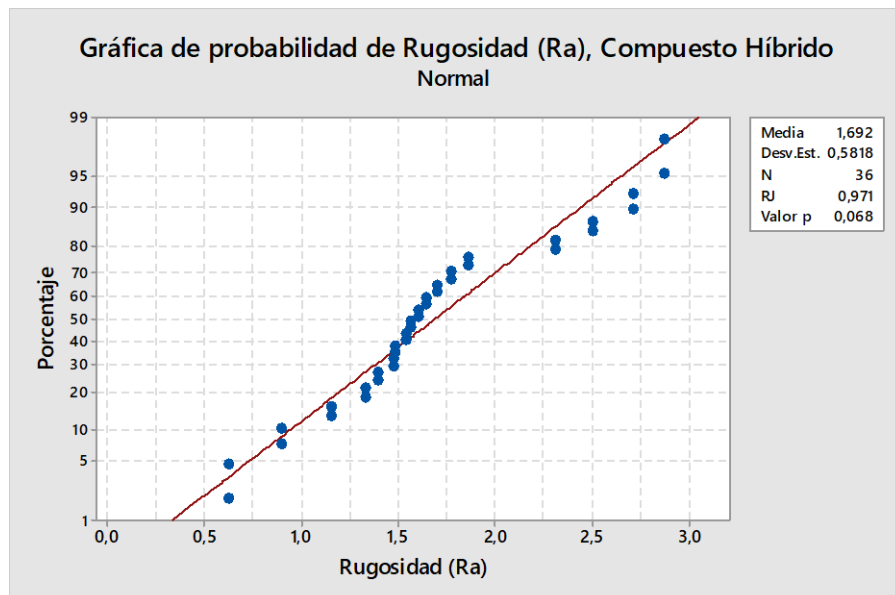


Figura 4-4. Probabilidad normal de la rugosidad (Ra), compuesto híbrido.

Fuente: Software Minitab® 18.1

- **Estadístico de prueba:**

Ryan - Joiner (RJ) = 0,971

Valor - p = 0,068

Decisión = No se rechaza la hipótesis nula

Conclusión = La prueba de normalidad es mayor a la significancia del 5%, por lo que se concluye que las muestras de rugosidad tienen distribución normal.

4.2.2.2 Análisis del diseño factorial de la rugosidad (Ra) del compuesto híbrido

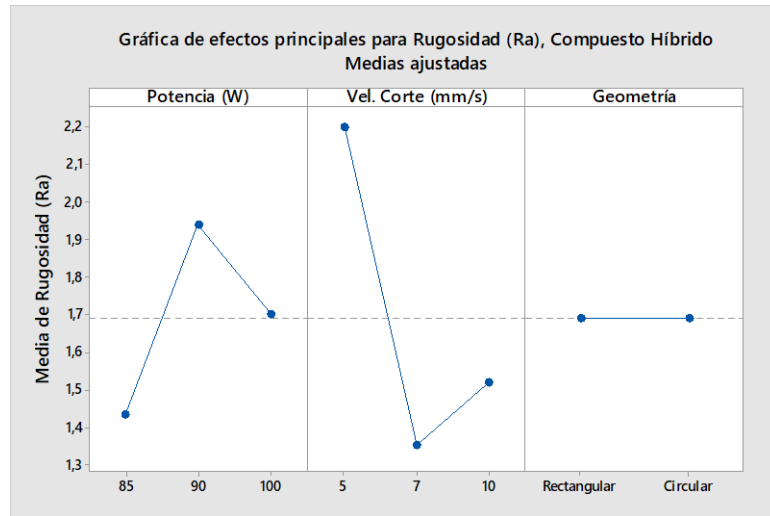


Figura 4-5. Efectos principales de la rugosidad (Ra), compuesto híbrido.
Fuente: Software Minitab® 18.1

En la figura 4-5 se muestran los factores que tienen gran significancia para la obtención de la rugosidad (Ra) en el compuesto híbrido como son la potencia y velocidad de corte; por otra parte, se puede descartar la geometría porque no presenta una significancia mayor debido a que los resultados obtenidos fueron muy similares entre ellos.

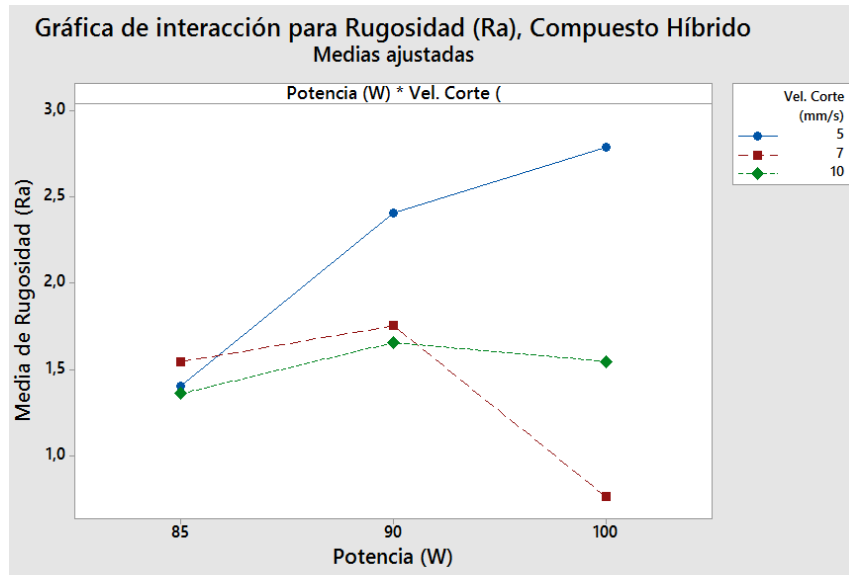


Figura 4-6. Interacción para la rugosidad (Ra), compuesto híbrido.
Fuente: Software Minitab® 18.1

Partiendo de los factores con gran significancia obtenidos de la figura 4-5 para definir la rugosidad (R_a) en el compuesto híbrido, se procede a la interpretación de la figura 4-6 que está basada en datos reales.

- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 100W y una velocidad de corte (V_c) de 7mm/s se obtiene una rugosidad media de $0,76\mu\text{m}$.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 100W y una velocidad de corte (V_c) de 5mm/s se obtiene una rugosidad media de $2,79\mu\text{m}$.

4.2.3 Análisis de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio

Se realizó una prueba de normalidad de los datos obtenidos de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional para verificar que tengan una distribución normal; una vez realizada la prueba de normalidad se procedió a realizar el análisis del diseño factorial para finalmente analizar los resultados obtenidos.

4.2.3.1 Prueba de normalidad de los datos de la temperatura crítica de corte (T)

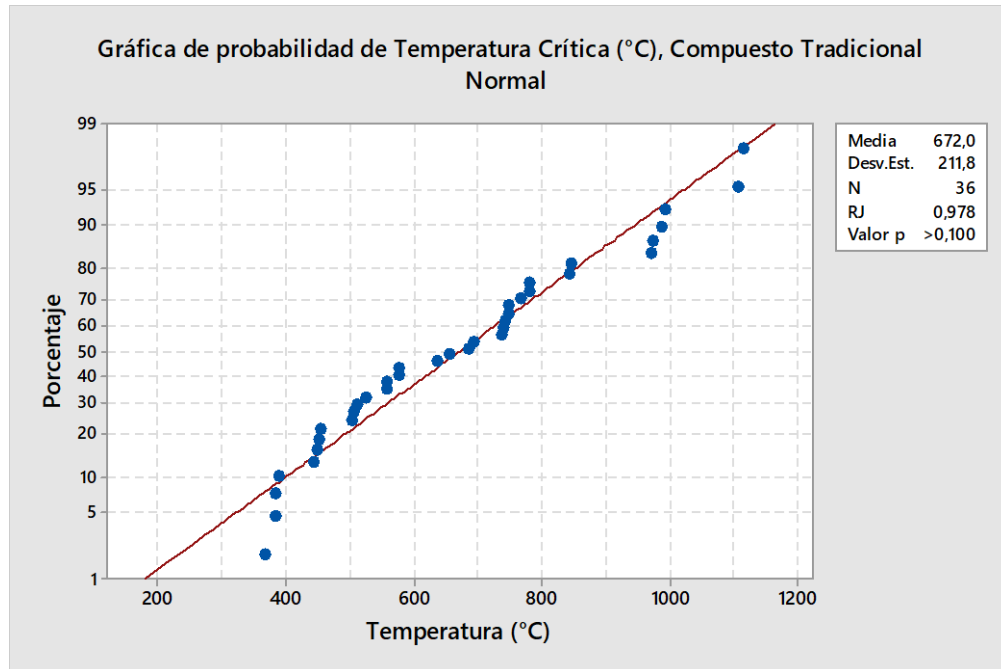
- **Hipótesis:**
 - H_0 = Hipótesis nula
 - H_A = Hipótesis alternativa

H_0 = Los datos de temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional tienen distribución normal

H_A = Los datos de temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional no tienen distribución normal

Número de muestras: 36

Nivel de significancia: 0,05



*Figura 4-7. Probabilidad normal de la temperatura crítica (T), compuesto tradicional.
Fuente: Software Minitab® 18.1*

- **Estadístico de prueba:**

Ryan - Joiner (RJ) = 0,978

Valor - p > 0,100

Decisión = No se rechaza la hipótesis nula

Conclusión = La prueba de normalidad es mayor a la significancia del 5%, por lo que se concluye que las muestras de rugosidad tienen distribución normal.

4.2.3.2 Análisis del diseño factorial de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional

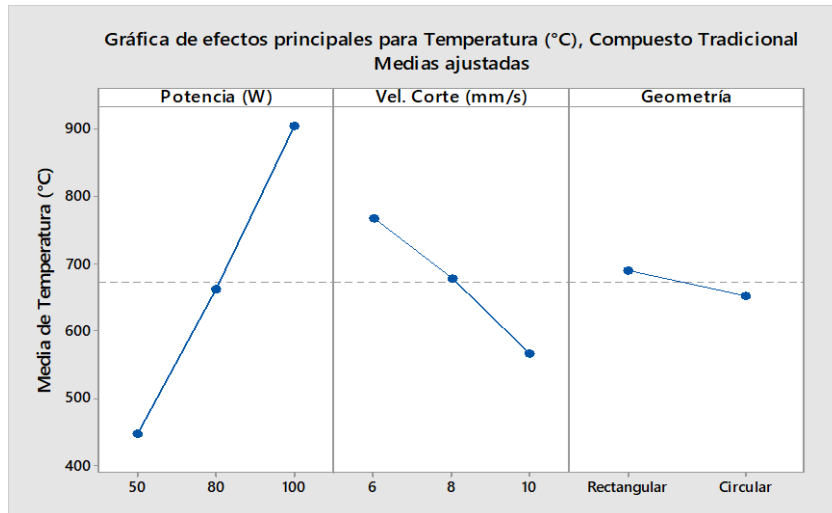


Figura 4-8. Efectos principales de la temperatura crítica (T), compuesto tradicional.
Fuente: Software Minitab® 18.1

En la figura 4-8 se muestran los efectos principales que tienen gran significancia para la obtención de la temperatura crítica de corte (T) en el compuesto tradicional como son la potencia, velocidad de corte y la geometría; en este último a diferencia de la rugosidad en la cual no fue significativa la geometría, para la determinación de la temperatura nos muestra la figura que si es significativa ya que al cortar una área menor la temperatura también va a ser menor porque se va a exponer menos tiempo al haz láser.

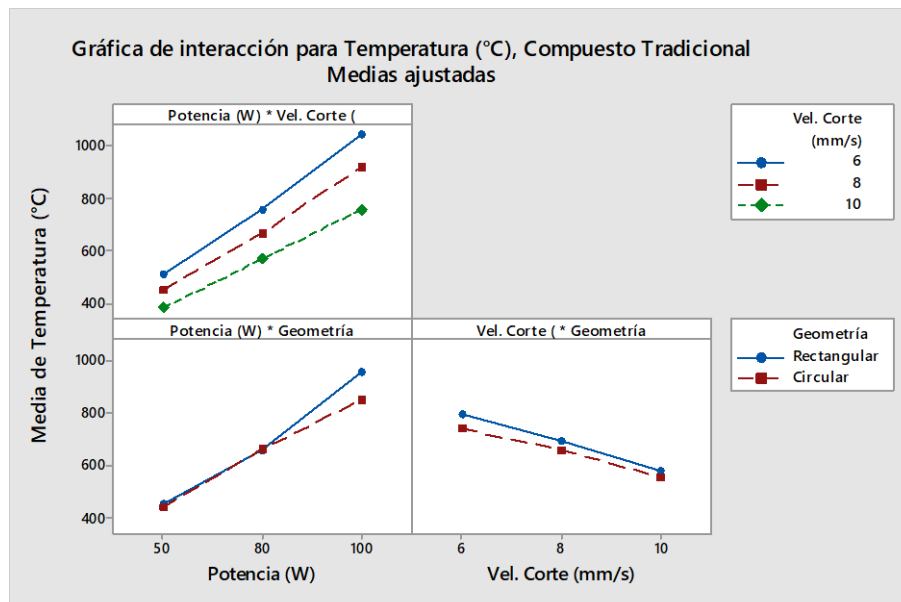


Figura 4-9. Interacción para la temperatura crítica (T), compuesto tradicional.
Fuente: Software Minitab® 18.1

Para la determinación de la temperatura crítica (T) se toman en cuenta todos factores como se definieron en la figura 4-8; a continuación, se muestran las tendencias de interacción para el compuesto tradicional.

- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 50W y velocidad de corte (Vc) de 10mm/s se tiene una temperatura crítica media (T) de 381,3°C.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 100W y velocidad de corte (Vc) de 6mm/s se tiene una temperatura crítica media (T) de 1041,3°C.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 50W y en la geometría circular se tiene una temperatura crítica media (T) de 442°C.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 100W y en la geometría rectangular se tiene una temperatura crítica media (T) de 958,2°C.
- Si se realiza el corte láser con una velocidad de corte (Vc) de 10mm/s y en la geometría circular se tiene una temperatura crítica media (T) de 557,1°C.
- Si se realiza el corte láser con una velocidad de corte (Vc) de 6mm/s y en la geometría rectangular se tiene una temperatura crítica media (T) de 796,4°C.

4.2.4 Análisis de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto híbrido formado por matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio y cabuya

Se realizó una prueba de normalidad de los datos obtenidos de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto híbrido para verificar que tengan una distribución normal; una vez realizada la prueba de normalidad se procedió a realizar el análisis del diseño factorial para finalmente analizar los resultados obtenidos.

4.2.4.1 Prueba de normalidad de los datos de la temperatura crítica de corte (T)

- **Hipótesis:**
 - H_0 = Hipótesis nula
 - H_A = Hipótesis alternativa

H_0 = Los datos de temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional tienen distribución normal

H_A = Los datos de temperatura crítica de corte (T) del compuesto tradicional no tienen distribución normal

Número de muestras: 36

Nivel de significancia: 0,05

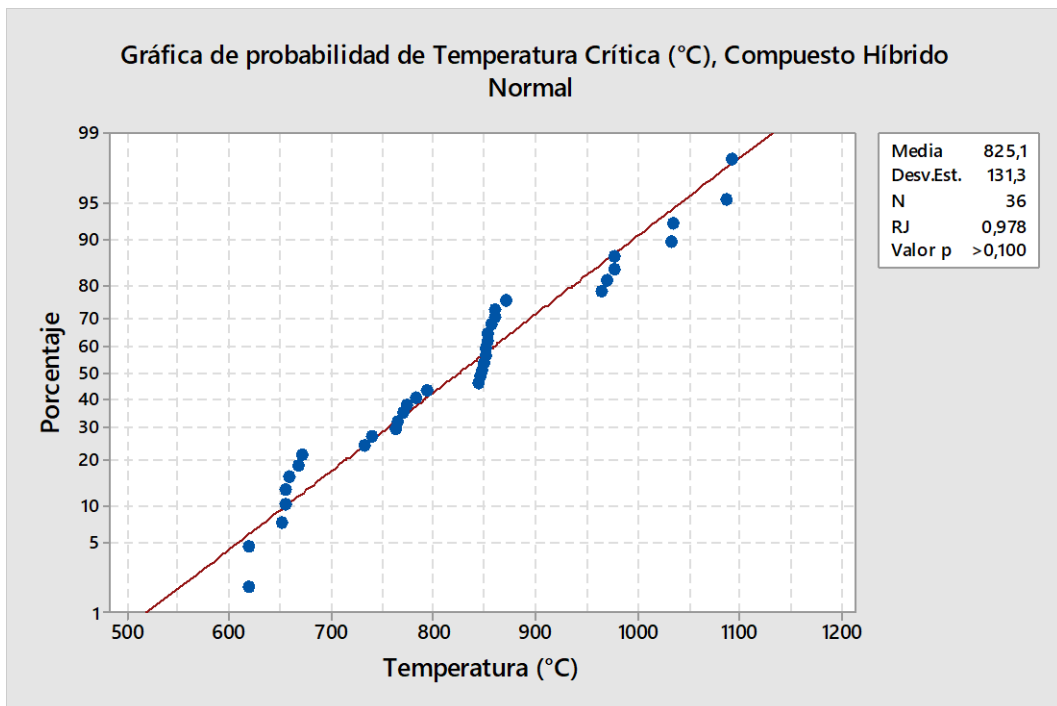


Figura 4-10. Probabilidad normal de la temperatura crítica (T), compuesto híbrido.

Fuente: Software Minitab® 18.1

• **Estadístico de prueba:**

Ryan - Joiner (RJ) = 0,978

Valor - p > 0,100

Decisión = No se rechaza la hipótesis nula

Conclusión = La prueba de normalidad es mayor a la significancia del 5%, por lo que se concluye que las muestras de rugosidad tienen distribución normal.

4.2.4.2 Análisis del diseño factorial de la temperatura crítica de corte (T) del compuesto híbrido

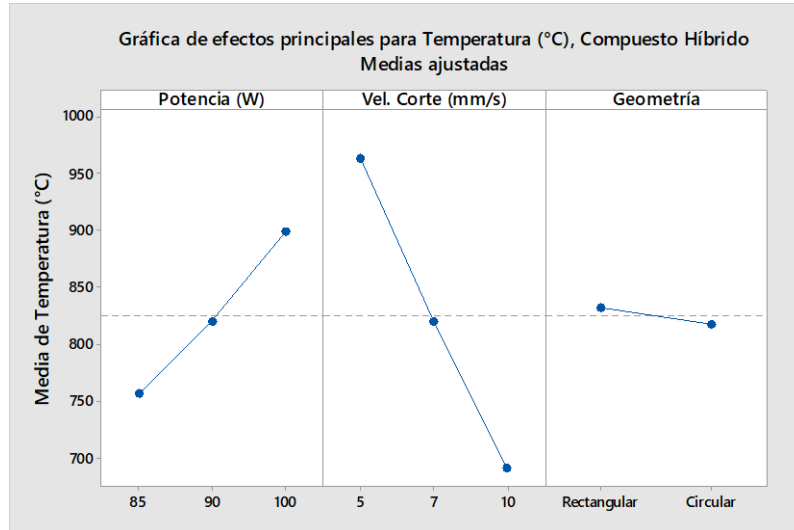


Figura 4-11. Efectos principales de la temperatura crítica (T), compuesto híbrido.
Fuente: Software Minitab® 18.1

En la figura 4-11 se muestran los efectos principales que tienen gran significancia para la obtención de la temperatura crítica de corte (T) en el compuesto híbrido como son la potencia, velocidad de corte y la geometría.

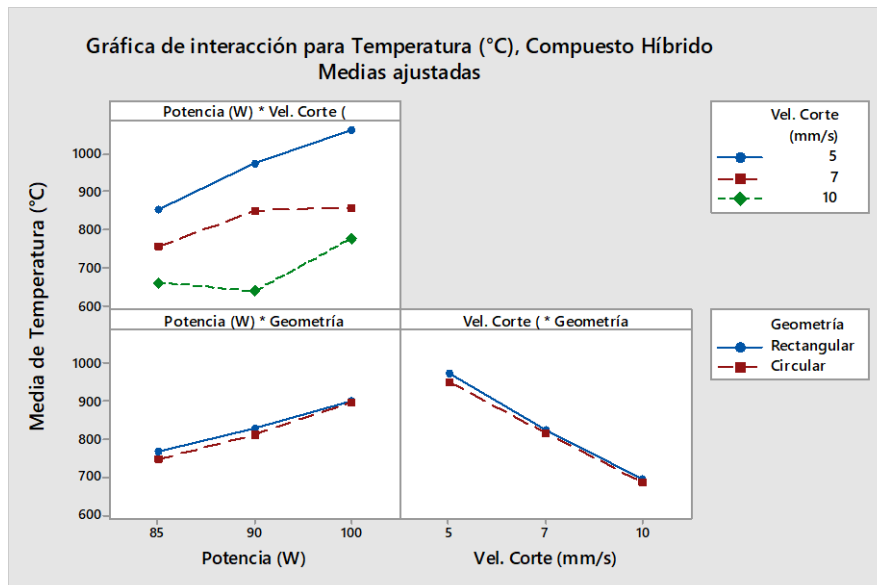


Figura 4-12. Interacción para la temperatura crítica (T), compuesto híbrido.
Fuente: Software Minitab® 18.1

Para la determinación de la temperatura crítica (T) se toman en cuenta todos factores como se definieron en la figura 4-11; a continuación, se muestran las tendencias de interacción para el compuesto híbrido.

- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 90W y velocidad de corte (Vc) de 10mm/s se tiene una temperatura crítica media (T) de 638,2°C.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 100W y velocidad de corte (Vc) de 5mm/s se tiene una temperatura crítica media (T) de 1061,6°C.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 85W y en la geometría circular se tiene una temperatura crítica media (T) de 746,7°C.
- Si se realiza el corte láser con una potencia (P) de 100W y en la geometría rectangular se tiene una temperatura crítica media (T) de 901,6 °C.
- Si se realiza el corte láser con una velocidad de corte (Vc) de 10mm/s y en la geometría circular se tiene una temperatura crítica media (T) de 687,2°C.
- Si se realiza el corte láser con una velocidad de corte (Vc) de 5mm/s y en la geometría rectangular se tiene una temperatura crítica media (T) de 975,1°C.

4.2.5 Interpretación y selección de resultados

Después de haber analizado el diseño factorial de los compuestos tradicional e híbrido con sus respectivos factores, se procedió a seleccionar las mejores combinaciones.

4.2.5.1 Rugosidad superficial (Ra) óptima

Tabla 4-37. Factores de corte para una rugosidad óptima del compuesto tradicional.

Fuente: Autor

Rugosidad superficial media (Ra, μm)								
Compuesto Tradicional								
Compuesto	Potencia (W)			Vel. Corte (mm/s)			Geometría	
	50	80	100	6	8	10	Rectangular	Circular
Tradicional	2,596	3,324	3,194	2,307	3,642	3,164	–	–

Los parámetros óptimos para realizar el corte láser que brinden una buena rugosidad superficial (Ra) en el compuesto tradicional son:

Potencia = 50 W

Vel. Corte = 6 mm/s

Tabla 4-38. Factores de corte para una rugosidad óptima del compuesto híbrido. Fuente: Autor

Rugosidad superficial media (Ra, μm)								
Compuesto Híbrido								
Compuesto	Potencia (W)			Vel. Corte (mm/s)			Geometría	
	85	90	100	5	7	10	Rectangular	Circular
Híbrido	1,436	1,940	1,701	2,202	1,353	1,521	–	–

Los parámetros óptimos para realizar el corte láser que brinden una buena rugosidad superficial (Ra) en el compuesto híbrido son:

Potencia = 85 W

Vel. Corte = 7 mm/s

4.2.5.2 Temperatura crítica (T) óptima

Tabla 4-39. Factores de corte para una temperatura óptima del compuesto tradicional. Fuente: Autor

Temperatura crítica de corte (T, $^{\circ}\text{C}$)								
Compuesto Tradicional								
Compuesto	Potencia (W)			Vel. Corte (mm/s)			Geometría	
	50	80	100	6	8	10	Rectangular	Circular
Tradicional	447,65	663,32	905,01	769,06	678,61	568,31	690,87	653,11

Los parámetros para realizar el corte láser que brinden una óptima temperatura (T) en el compuesto tradicional y evitar que el material se queme en exceso son:

Potencia = 50 W

Vel. Corte = 10 mm/s

*** Geometría = circular**

- Se puede cortar cualquier geometría ya que la temperatura crítica no tiene una diferencia significativa entre una y otra.

Tabla 4-40. Factores de corte para una temperatura óptima del compuesto híbrido.

Fuente: Autor

Temperatura crítica de corte (T, °C)								
Compuesto Híbrido								
Compuesto	Potencia (W)			Vel. Corte (mm/s)			Geometría	
	85	90	100	5	7	10	Rectangular	Circular
Híbrido	756,89	819,82	898,74	962,71	820,70	692,03	832,10	818,20

Los parámetros para realizar el corte láser que brinden una óptima temperatura (T) en el compuesto híbrido y evitar que se queme en exceso son:

Potencia = 85 W **Vel. Corte** = 10 mm/s * **Geometría** = circular

- Se puede cortar cualquier geometría ya que la temperatura crítica no tiene una diferencia significante entre una y otra.

4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

A continuación, se procede a la verificación de la hipótesis general planteada: “La variación de los parámetros en el proceso de corte láser por CO₂ para el compuesto tradicional y el compuesto híbrido influirá en la calidad del corte”. Se realizó un análisis de varianza ANOVA con la ayuda del software Minitab 18; para lo cual se plantearon hipótesis específicas para la evaluación estadística de cada factor en función al valor – p.

Para considerar la relevancia de cada uno de los factores y poder rechazar la hipótesis nula, el valor – p debe ser menor a 0,05.

4.3.1 ANOVA y verificación de hipótesis con respecto a la rugosidad superficial (Ra)

4.3.1.1 Compuesto tradicional

- **Hipótesis**

H_0 = La rugosidad superficial (Ra) es *igual* al cortar con los mismos parámetros de corte.

H_A = La rugosidad superficial (Ra) es *diferente* al cortar con los mismos parámetros de corte.

Nivel de significancia (α): 0,05

Tabla 4-41. Verificación de hipótesis con respecto a la rugosidad del compuesto tradicional. Fuente: Autor

Compuesto tradicional			
Verificación de la hipótesis con respecto a la rugosidad			
Parámetros de corte	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Geometría
Valor - p	0,000	0,000	1,000

Conclusión: Los parámetros como la potencia y velocidad de corte debido a su valor de significancia menor al 5%, si influyen en la rugosidad superficial (Ra); por otro lado, la geometría del corte no influye significativamente en la rugosidad superficial (Ra) final del corte láser por CO₂ en el compuesto tradicional.

4.3.1.2 Compuesto híbrido

- **Hipótesis**

H_0 = La rugosidad superficial (Ra) es *igual* al cortar con los mismos parámetros de corte.

H_A = La rugosidad superficial (Ra) es *diferente* al cortar con los mismos parámetros de corte.

Nivel de significancia (α): 0,05

Tabla 4-42. Verificación de la hipótesis con respecto a la rugosidad del compuesto híbrido. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido			
Verificación de la hipótesis con respecto a la rugosidad			
Parámetros de corte	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Geometría
Valor - p	0,025	0,000	1,000

Conclusión: Los parámetros como la potencia y velocidad de corte debido a su valor de significancia menor al 5%, si influyen en la rugosidad superficial (Ra); por otro lado, la geometría del corte no influye significativamente en la rugosidad superficial (Ra) final del corte láser por CO₂ en el compuesto híbrido.

4.3.2 ANOVA y verificación de hipótesis con respecto a la temperatura crítica (T) de corte.

4.3.2.1 Compuesto tradicional

- **Hipótesis**

H₀ = La temperatura crítica (T) es *igual* al cortar con los mismos parámetros de corte.

H_A = La temperatura crítica (T) es *diferente* al cortar con los mismos parámetros de corte.

Nivel de significancia (α): 0,05

Tabla 4-43. Verificación de la hipótesis con respecto a la temperatura crítica del compuesto tradicional. Fuente: Autor

Compuesto Tradicional			
Verificación de la hipótesis con respecto a la temperatura crítica			
Parámetros de corte	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Geometría
Valor - p	0,000	0,000	0,015

Conclusión: Los parámetros como la potencia, velocidad de corte y geometría debido a su valor de significancia menor al 5%, si influyen en el aumento de la temperatura crítica (T) final del corte láser por CO₂ en el compuesto tradicional.

4.3.2.2 Compuesto híbrido

- **Hipótesis**

H₀ = La temperatura crítica (T) es *igual* al cortar con los mismos parámetros de corte.

H_A = La temperatura crítica (T) es *diferente* al cortar con los mismos parámetros de corte.

Nivel de significancia (α): 0,05

Tabla 4-44. Verificación de hipótesis con respecto a la temperatura crítica del compuesto híbrido. Fuente: Autor

Compuesto Híbrido			
Verificación de la hipótesis con respecto a la temperatura crítica			
Parámetros de corte	Potencia (W)	Vel. Corte (mm/s)	Geometría
Valor - p	0,000	0,000	0,267

Conclusión: Los parámetros como la potencia y velocidad de corte debido a su valor de significancia menor al 5%, si influyen en el aumento de la temperatura crítica (T); por otro lado, la geometría del corte no influye significativamente en el aumento de la temperatura crítica (T) final del corte láser por CO₂ en el compuesto híbrido.

Conclusión general: La combinación de los parámetros del proceso como la potencia y velocidad de corte en los distintos compuestos influyen de gran manera en la calidad superficial para lo cual se obtuvieron las combinaciones adecuadas para cada material; por otra parte, la geometría del corte no influye en la calidad

final para lo cual las combinaciones resultantes son útiles para cualquier tipo de geometría hasta un espesor máximo de 3,2mm.

Se ha demostrado la variabilidad que tienen los diferentes parámetros del corte láser CO₂: potencia, velocidad de corte y geometría; la significancia que tienen mediante un análisis estadístico ANOVA y la influencia de cada parámetro con respecto a la calidad de corte: rugosidad superficial (Ra) y temperatura crítica (T), queda demostrada la hipótesis general.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

- El método experimental (DOE) utilizado fue la factorial 2^3 el cual dio como resultado un número de muestras igual a 36 con diferentes combinaciones para cada compuesto, en total fueron 72 muestras utilizadas en el presente trabajo experimental.
- Las combinaciones de los parámetros fueron desde 50W hasta 100W en la potencia y las velocidades de corte de 5 mm/s a 10 mm/s seleccionados indistintamente para cada compuesto con dos tipos de geometrías que fueron rectangular y circular.
- 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 le quemé al material en lo más mínimo, se lo consigue con una potencia de 50W y velocidad de corte de 10mm/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 le quemé al material en lo más mínimo, se lo consigue con una potencia de 85W y velocidad de corte de 10mm/s.
- La geometría del corte presenta poca variación en los resultados de la calidad entre uno y otro, por lo que los resultados obtenidos sirven para cualquier tipo de geometría.

- La temperatura superficial está relacionada directamente con la potencia; a mayor potencia de corte, mayor será la temperatura generada en la superficie y por ende la zona quemada de material será también mayor, lo que afecta directamente en la calidad del corte.
- Los resultados obtenidos sirven tanto para materiales compuestos como para híbridos de distintas combinaciones que tengan un espesor máximo de 3,2 mm, ya que para cortar espesores mayores será necesaria una máquina con potencias mayores a 100W, lo que es muy escaso en la actualidad.
- Todos los tipos de combinaciones cumplieron con el rango de rugosidad según la norma ISO 1302 para corte láser por CO₂ debido a la tecnología y precisión con la que cuentan estos tipos de máquinas.
- La velocidad en este proceso de corte es fundamental para lograr un acabado aceptable, ya que mientras más rápida sea la velocidad, menor será el tiempo de exposición a la energía y por ende se quemará menos el material.

5.2 RECOMENDACIONES

- Al realizar cortes láser por CO₂ es necesario mantener la puerta de la mesa de trabajo cerrada mientras se realiza el corte, ya que el humo generado puede resultar tóxico debido a la composición del material.
- Se recomienda no mirar directamente al haz láser mientras se realiza el corte, ya que el haz generado es muy fuerte y puede molestar o dañar la vista.
- Se sugiere no cortar este tipo de materiales con potencias mayores a los 100W, debido a que el material quemado es en exceso lo cual perjudica a la calidad de corte de gran manera.
- Al momento de trabajar con materiales compuestos e híbridos, resulta mejor trabajar con un moldeo al vacío debido a que se logra mejor compactación y se disminuyen las probabilidades de irregularidades internas, con esto se aseguran aún mejores resultados en el corte.
- Es necesario calcular los parámetros térmicos reales de los nuevos materiales si se desean realizar los cálculos de pulso de energía, para obtener resultados más exactos y reales.
- Realizar cortes con máquinas que tengan un diámetro de haz láser menor o igual a 0,5 mm para asegurar una mayor exactitud en la geometría del corte.
- Antes de seleccionar el corte mediante el proceso de láser por CO₂, vale la pena comparar dicho proceso con otros existentes para determinar diferentes beneficios en comparación con los demás procesos; esto último queda a consideración del usuario que desea el corte.

BIBLIOGRAFÍA.

[1] Cristóbal Lohr Rodríguez, Mejoramiento de la calidad del borde cortado en PMMA por láser de CO₂, Chile: Santiago de Chile, 2011.

[2] A. Ramírez, J. Pascua, J. Laserna, M.V. Moya, J. Zapatero, T. Fernández, Efecto de las condiciones de corte de un láser de Nd:YAG sobre la estructura y microcomposición de la superficie de aceros inoxidable, España: Málaga, 2013.

[3] A. Lamikiz, Corte por láser de materiales avanzados, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, España: Bilbao, 2006.

[4] William F. Smith, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, Cuarta edición, México: D.F. McGRAW-HILL, 2006.

[5] James F. Shackelford, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, Sexta Edición, España: Madrid. Pearson Educación S.A, 2005.

[6] William D. Callister. J, Introducción a la ciencia e Ingeniería de los Materiales, México: DF. Editorial Reverté S.A, 2009.

[7] Sergio Alejandro Morales Ortuño, Fibra de vidrio: pruebas y aplicaciones, Instituto Politécnico Nacional, Mexico: D.F, 2008.

[8] Adam Knits, Fibras naturales: Tejidos antiguos, geotextiles modernos, 2009. [En línea]. Available: <http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/> . [Último acceso: 25 Julio 2017].

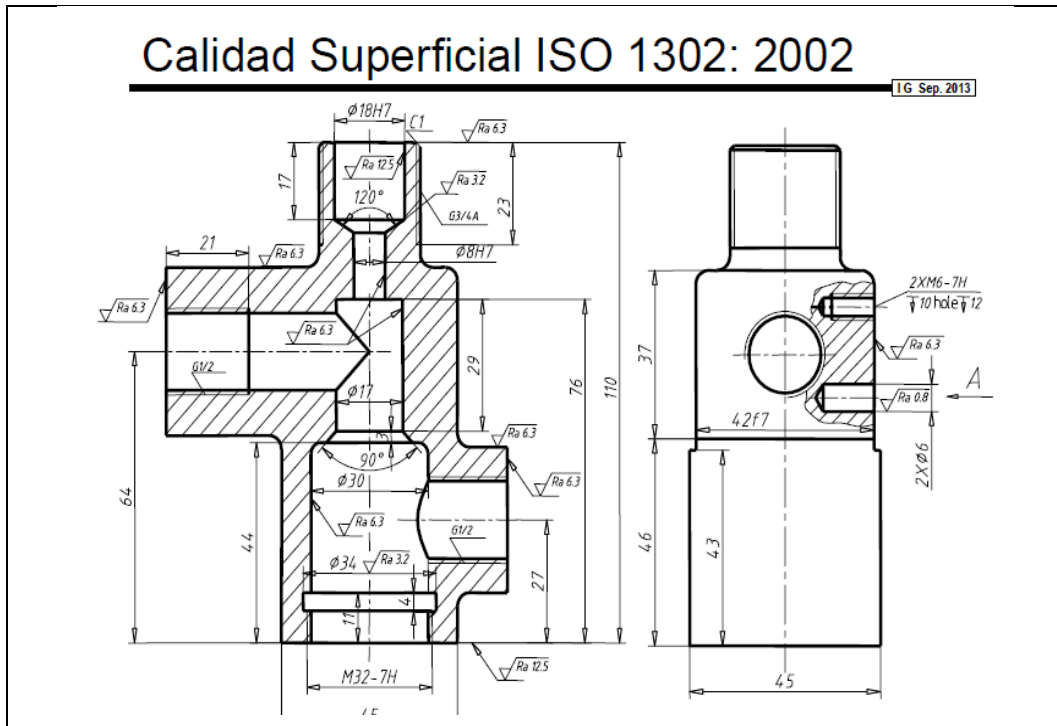
[9] Alexander Gil, Resinas de poliéster: Guía de manejo, 2012. [En línea]. Available:<http://www.eafit.edu.co/servicios/centrodelaLaboratorios/infraestructura/laboratorios/Documents/Guia%20de%20manejo%20de%20resinas.pdf> . [Último acceso: 25 Julio 2017].

- [10] Laura Montero García, Estudio del mecanizado de materiales compuestos, Universidad Carlos III de Madrid, España: Julio de 2010. [En línea]. Available: https://orff.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10773/PFC_Laura_Montero_Garcia.pdf;jsessionid=7DCFC9D15BAF3F588A51E46B7B3E0E30?sequence=1. [Último acceso: 26 Julio 2017].
- [11] Powell John. CO₂ Laser Cutting, Segunda Edición, Berlin, Heidelberg. New York: Springer-Verlag. 1998.
- [12] Chryssolouris, G. Laser Machining: Theory and Practice. New York: Speinger-Verlag. 1991.
- [13] Steen, W.M. Laser Material Processing, Tercera Edición. London: Springer-Verlag Limited. 2003.
- [14] Ion, J.C. Laser Processing of Engineering Materials. Linacre House, Jordan Hill, Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann. 2005.
- [15] Kannatey Asibn. Principles of Laser Materials Processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [16] Hitz, Ewing, Hecht. Introduction to láser Technology, IEEE Press Inc. Tercera Edición. USA, 2001.
- [17] Carlos Hernández García, Benjamín Alonso Fernández, El láser: la luz de nuestro tiempo. Global Ediciones Anthema. España, 2011
- [18] Ing. Juan Gilberto Paredes Salinas. Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz Poliéster Reforzada con Fibra de Vidrio y Cabuya como Material Alternativo y su incidencia en las propiedades mecánicas en Guardachoques para Buses. Maestría en Diseño Mecánico. Ambato – Ecuador, 2012.

- [19] Humberto Gutiérrez Pulido, Román de la Vara Salazar. Análisis y diseño de experimentos. Segunda edición, McGRAW-HILL: México. 2008.
- [20] S. Shirley. Corte por láser de materiales poliméricos: una investigación experimental. Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, Facultad de Ingeniería, Universidad de Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malasia. 2009.
- [21] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Especificación geométrica de productos (GPS): Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos ISO 1302. Madrid – España, 2002.
- [22] Universidad del País Vasco. Metrología Dimensional: Metrología del Acabado Superficial. Escuela de Ingeniería de Bilbao, Dpto. Ingeniería Mecánica. España.
- [23] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa. Cuarta edición, McGRAW-HILL: México. 2011.
- [24] Software estadístico Minitab[®] 18.1.

ANEXOS

ANEXO A: Presentación de la calidad superficial norma ISO 1302: 2002.



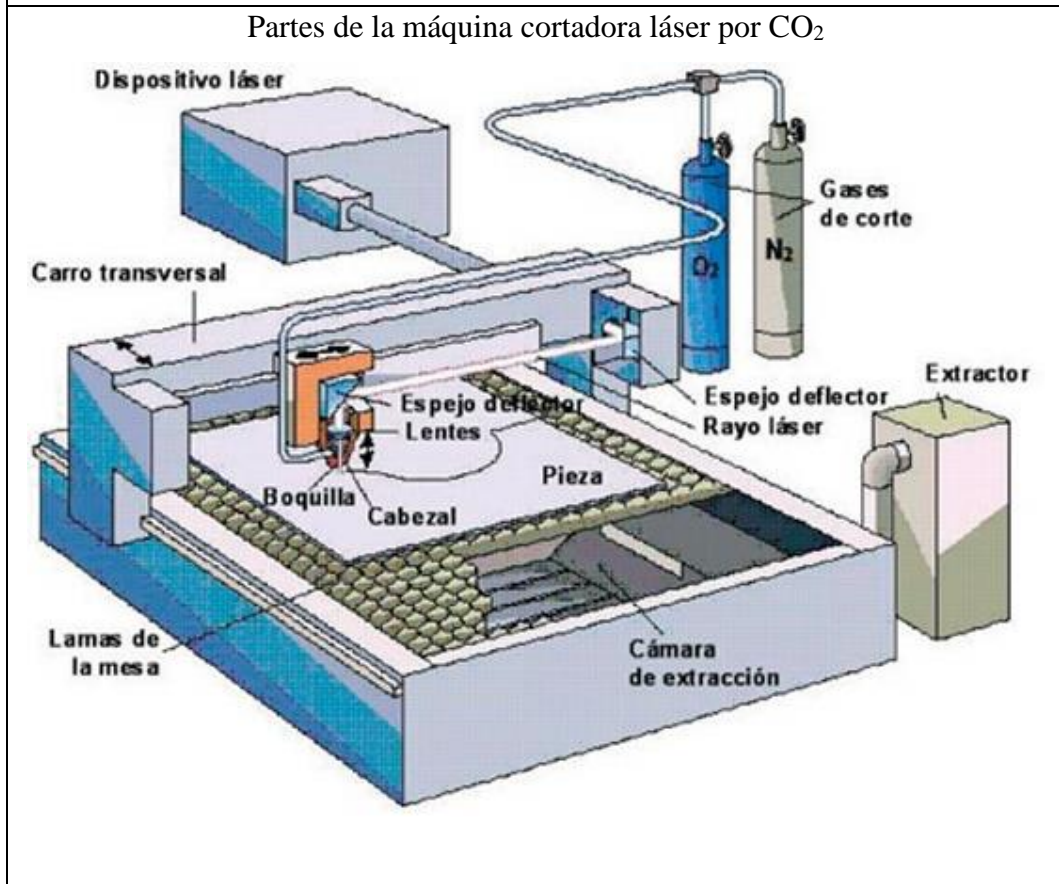
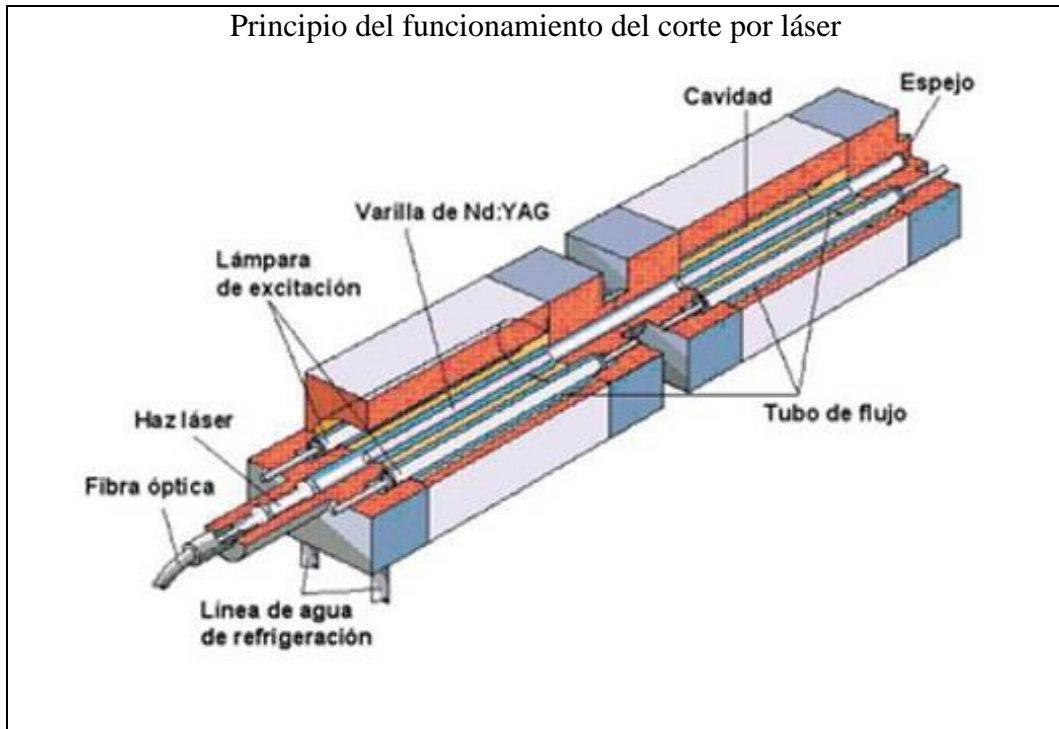
Calidad Superficial-Proceso de fabricac.

16 Sep. 2013

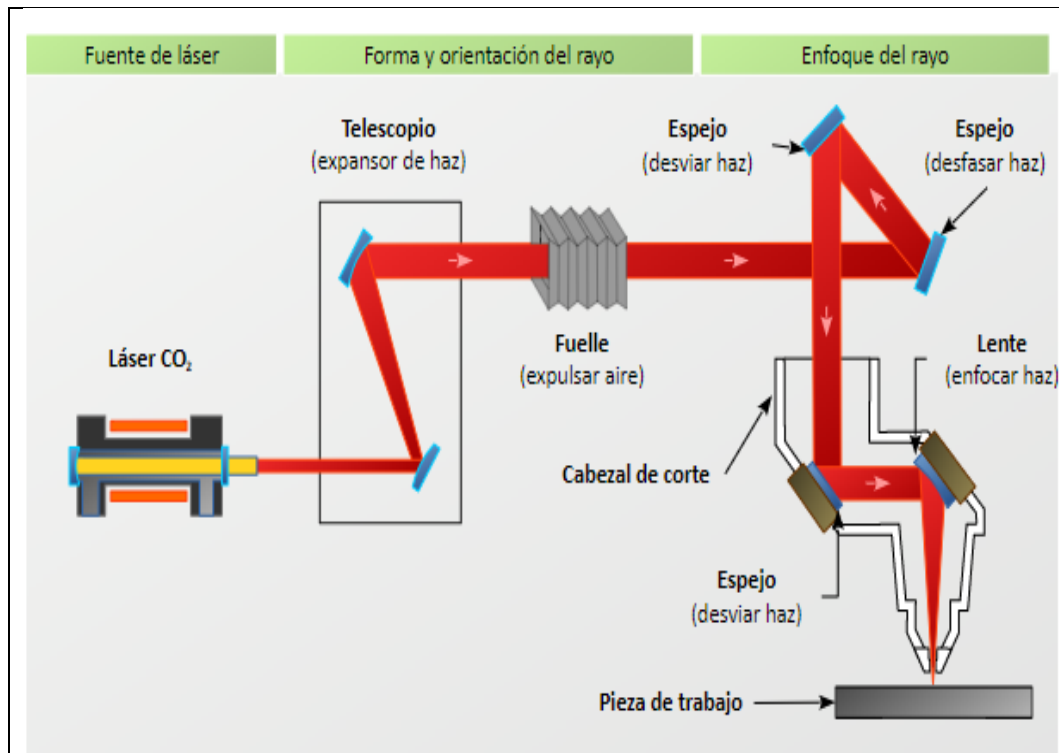
Rugosidad promedio en micrómetros – Ra μm

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													

ANEXO B: Partes de la cortadora láser CO₂ NICE CUT NC – C1290.

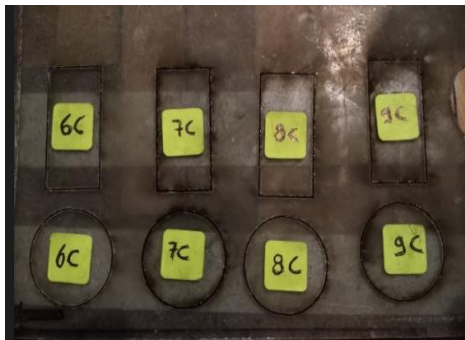
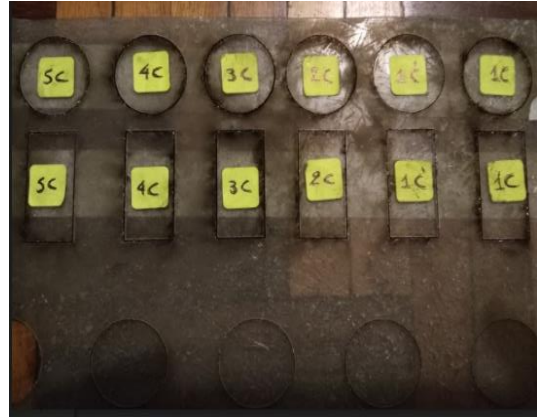
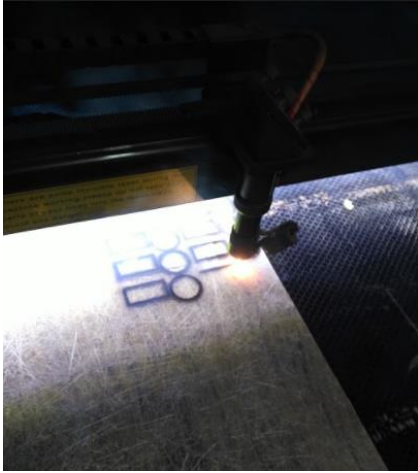


ANEXO C: Funcionamiento de la máquina cortadora láser CO₂.



- Es necesaria una fuente de alto voltaje ya que el láser se genera con 20000 a 25000 volts y una corriente de 15 a 35 amperios dependiendo de la potencia de la máquina.
- El láser es generado por la excitación del gas CO₂ mediante unos electrodos ubicados en los extremos dentro del tubo de cristal.
- Existe un tubo intermedio por donde circula agua para refrigerar y mantener una temperatura idónea en la máquina, ya que una diferencia de temperatura alta podría romper el tubo de cristal.
- El láser generado en el tubo es conducido mediante espejos hasta el cabezal de corte para finalmente proyectarse sobre la pieza de corte mediante la boquilla de corte.
- Los parámetros manipulables para la realización del corte en este tipo de máquina son únicamente la potencia (W) y velocidad de corte (mm/s) dependiendo del material a cortar.

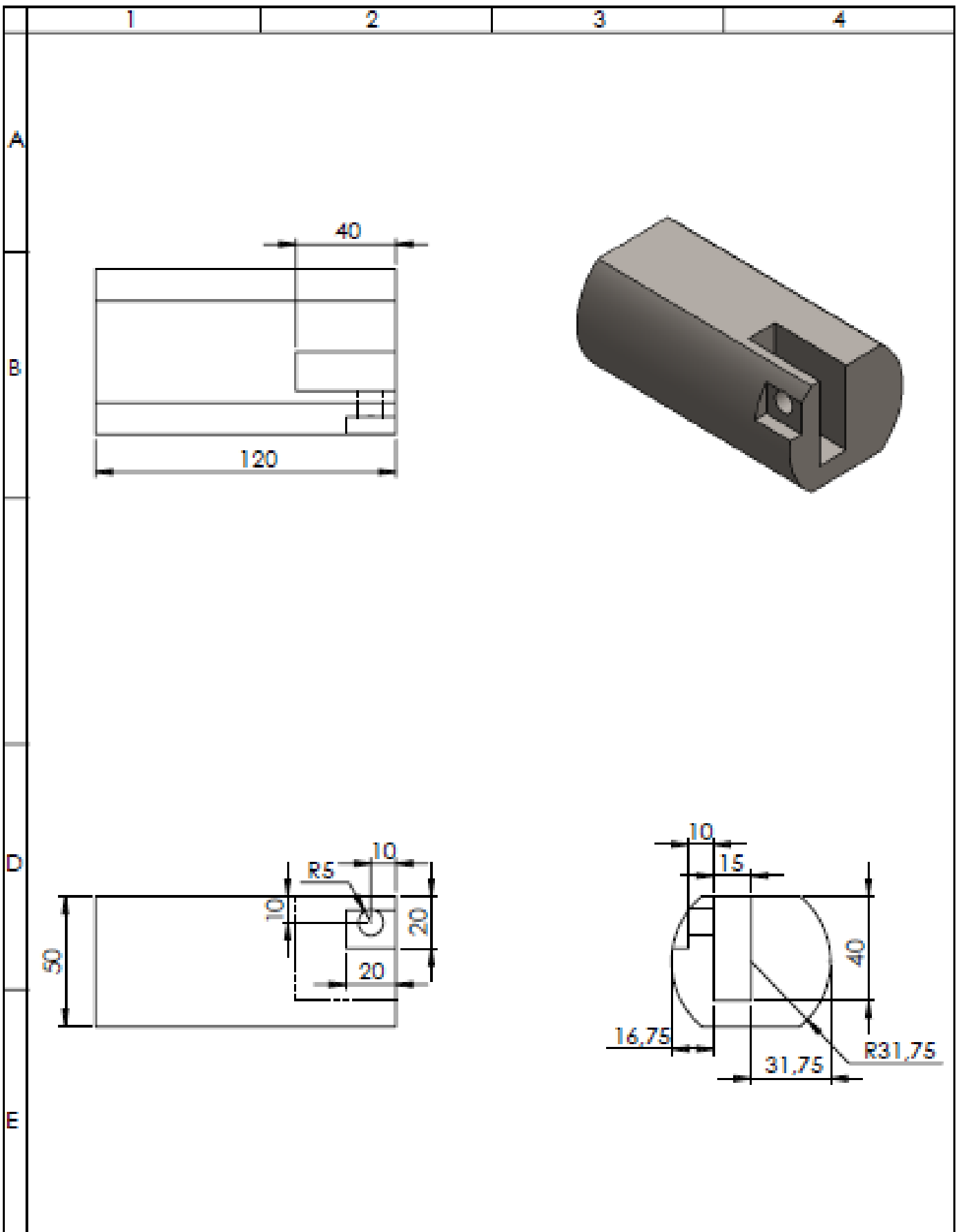
ANEXO D: Cortes láser por CO₂ preliminares.



ANEXO E: Cortes láser por CO₂ reales.

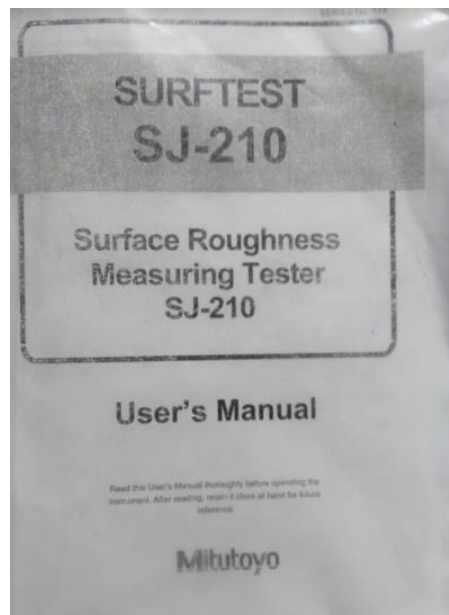


ANEXO F: Plano del portaprobeta.



				Tolerancias	Peso	MATERIAL:	
				± 0.5	2440.09g	Acero SAE 1018	
					FECHA	NOMBRE	ESTADO:
				Diseño	27/11/2017	Rayo Ruiz	
				Revisó	27/11/2017	Ing. César Pérez	
				Aprobó	28/11/2017	Ing. César Pérez	ESCALA:
				U.T.A.			
				INGENIERÍA MECÁNICA			Nº DE DISEÑO
						01 de 01	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Justificación	

ANEXO G: Rugosímetro Mitutoyo SJ 210 con su manual.



ANEXO H: Pirómetro CEM DT – 8867H con su manual.



ANEXO I: Medición de temperaturas con el pirómetro.



ANEXO J: Factura y licencia de software estadístico Minitab® 18.1

Dirección de facturación

Rony Rojas
[Redacted]
Ambato 180203
Ecuador

Ítems (Todos los precios están en Dólares estadounidenses)

[Vea los detalles para recuperar los artículos de su pedido.](#)

	Cantidad	Precio unitario	Importe
1. Minitab 18 (Multilanguage) (06-Month Rental) - Descargar	1	\$29.99	\$29.99
		Subtotal:	\$29.99
		Impuestos:	--
		Total:	\$29.99

