



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

TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

“EVALUACIÓN DEL ACERO ESTRUCTURAL REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO UNIDIRECCIONAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE TRES PUNTOS, DESCRITO EN LA NORMATIVA ASTM E290-22 PARA DETERMINAR EL INCREMENTO DE RESISTENCIA”.

AUTOR: Willian Hernan Pullopaxi Aimacaña

TUTOR: Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, MSc., Mg.

AMBATO – ECUADOR

Septiembre - 2023

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor de Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“EVALUACIÓN DEL ACERO ESTRUCTURAL REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO UNIDIRECCIONAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE TRES PUNTOS, DESCRITO EN LA NORMATIVA ASTM E290-22 PARA DETERMINAR EL INCREMENTO DE RESISTENCIA”**, elaborado por el señor Willian Hernan Pullopaxi Aimacaña, portador de cédula de ciudadanía: C.I. 0550483721, estudiante de la Carrera de Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el trabajo experimental es original del autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, septiembre 2023

.....

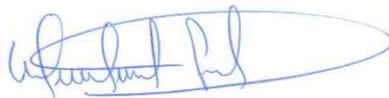
Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, MSc., Mg.

TUTOR

AUTORÍA DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Willian Hernan Pullopaxi Aimacaña, portador de cédula de ciudadanía: C.I. 0550483721, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental, con el tema: **“EVALUACIÓN DEL ACERO ESTRUCTURAL REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO UNIDIRECCIONAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE TRES PUNTOS, DESCRITO EN LA NORMATIVA ASTM E290-22 PARA DETERMINAR EL INCREMENTO DE RESISTENCIA”**, así como también los gráficos, conclusiones y recomendaciones son mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias citadas en el mismo.

Ambato, septiembre 2023



.....
Willian Hernan Pullopaxi Aimacaña

C.I. 0550483721

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

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

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mi derecho de autor.

Ambato, septiembre 2023



.....
Willian Hernan Pullopaxi Aimacaña

C.I. 0550483721

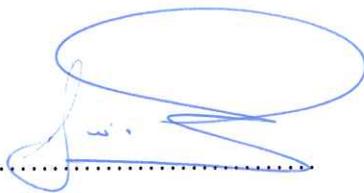
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

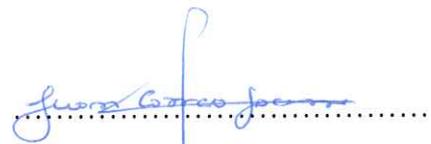
Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo experimental, realizado por el estudiante Willian Hernan Pullopaxi Aimacaña, de la Carrera de Mecánica bajo el tema: **“EVALUACIÓN DEL ACERO ESTRUCTURAL REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO UNIDIRECCIONAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO A FLEXIÓN DE TRES PUNTOS, DESCRITO EN LA NORMATIVA ASTM E290-22 PARA DETERMINAR EL INCREMENTO DE RESISTENCIA”**.

Ambato, septiembre 2023

Para constancia firman:



.....
Ing. Juan Gilberto Paredes Salinas, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR



.....
Ing. Juan Francisco Correa Jácome, Ph.D.
MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi hermanito Dav Ild que ahora se encuentra en el bello firmamento siendo la estrella que más brilla en mis noches de tempestad junto a los angelitos que tuvieron que partir que me guían desde el cielo y no me dejan caer, de igual manera quiero agradecer a mi tutor Ing. Francisco Peña MSc., por darme la oportunidad de demostrar mis capacidades para desarrollar este trabajo ya que sin su apoyo nada de esto sería posible.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerme por creer en mí,

Quiero agradecerme por hacer todo este arduo trabajo,

Quiero agradecerme por no tener días libres,

Quiero agradecerme por nunca renunciar,

Quiero agradecerme por ser siempre un dador y tratar de dar más de lo que recibo,

Quiero agradecerme por intentar hacer más bien que mal,

Quiero agradecerme por ser yo en todo momento.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xviii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO I.....	1
1 Tema.....	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1 Justificación	3
1.1.2 Fundamentación teórica	5
1.1.3 Reforzamiento de estructuras.....	5
1.1.4 Materiales compuestos.....	7
1.1.5 Fibras.....	9
1.1.6 Fibra de carbono	10
1.1.7 Fibra de carbono unidireccional.....	12
1.1.8 Conformación de fibra de carbono	12
1.1.9 Constante elástica.....	13

1.1.10	Matrices.....	15
1.1.11	Uniones	16
1.1.12	Adhesivos.....	18
1.1.13	Preparación de superficie	23
1.1.14	Rugosidad superficial.....	26
1.1.15	Método de elementos finitos.....	29
1.1.16	Herramientas para la validación de hipótesis.....	34
1.2	Objetivos	35
1.2.1	Objetivo general.....	35
1.2.2	Objetivos específicos	35
1.3	Planteamiento de la hipótesis	35
1.3.1	Variable independiente	35
1.3.2	Variable dependiente	35
CAPÍTULO II		36
2	Materiales.....	36
2.1.1	Propiedades de los materiales	40
2.2	Método	42
2.2.1	Tipo de investigación.....	42
2.2.2	Población y muestra.....	43
2.2.3	Operacionalización de variables	44
2.2.4	Recolección de información	44
2.2.5	Proceso para el ensayo	46
2.2.6	Dimensionamiento de probetas.....	48
2.2.7	Determinación de la presión	52
2.2.8	Identificación de probetas	54
2.2.9	Preparación de probetas	57
2.2.10	Proceso de simulación en elementos finitos	69
CAPÍTULO III		71
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
3.1	Análisis y discusión de los resultados.....	71

3.1.1	Resultados del ensayo a compresión de la resina SIKADUR-30	71
3.1.2	Recolección de la rugosidad de las probetas con reforzamiento	74
3.1.3	Resultados de ensayo a flexión de tres puntos	89
3.1.4	Resultados del ensayo a flexión del acero reforzado	101
3.2	Análisis de resultados	107
3.2.1	Comparación de deflexiones	118
3.3	Verificación de la hipótesis	122
CAPÍTULO IV		126
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
4.1	Conclusiones	126
4.2	Recomendaciones	128
BIBLIOGRAFÍA		129
ANEXOS		132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Técnicas convencionales: a) Refuerzo de miembros b) Adición de miembros c) Postensado d) Aisladores de base	6
Figura 1.2	Técnicas no convencionales: a) Encamisado en acero b) Encamisado materiales compuestos FRP	6
Figura 1.3	Esquema de un material compuesto	7
Figura 1.4	Esquema de clasificación de materiales compuestos	9
Figura 1.5	Clasificación de fibras	10
Figura 1.6	Fibra de carbono	10
Figura 1.7	Direcciones de orientación de tejido de fibra de carbono	12
Figura 1.8	Platina conformada por capas individuales de fibra de carbono	13
Figura 1.9	Tipos de uniones	16
Figura 1.10	Representación de: a) Remaches b) Tornillos y c) Pasadores	16
Figura 1.11	Unión soldada	17
Figura 1.12	Configuraciones típicas de unión adhesiva	18
Figura 1.13	Esquema de unión híbrida remache – adhesivo	18
Figura 1.14	Esquema de unión adhesiva	19
Figura 1.15	Distribución de tensiones en: a) Soldadura b) Uniones mecánicas c) Uniones Adhesivas	20
Figura 1.16	(a) Interfaz plana ideal entre el refuerzo y la matriz. (b) Una irregularidad más probable interfaz entre fibra y matriz	21
Figura 1.17	Tipos de separaciones	21
Figura 1.18	Resina epóxica	23
Figura 1.19	Esquema de preparación superficial para aplicar adhesivo	23
Figura 1.20	Limpieza por maquina neumática - Granallado convencional	24

Figura 1.21	Acabado generado por sandblasting	24
Figura 1.22	Proceso de preparación de superficie por cepillo abrasivo	26
Figura 1.23	Representación de la rugosidad media	26
Figura 1.24	Obtención de mediciones de un perfil.	28
Figura 1.25	Esquema de instrumento de medición de superficie	29
Figura 1.26	Diagrama que describe el procedimiento de un modelado con uno experimental	30
Figura 1.27	Esquema arbitrario de un problema general	31
Figura 1.28	Elemento lineal con dos nodos	31
Figura 1.29	Elemento dimensional de tres o mas nodos	32
Figura 1.30	Elemento tipo Shell	32
Figura 1.31	Elemento tridimensional	33
Figura 1.32	Fases del análisis por elementos finitos	33
Figura 2.1	Diagrama de recolección de información.	45
Figura 2.2	Dimensionamiento del molde para la resina.	48
Figura 2.3	Configuración para el tipo de ensayo a flexión de tres puntos	48
Figura 2.4	Configuración para las probetas de acero reforzado de 790 mm.	49
Figura 2.5	Configuración para las probetas de acero de 790 mm.	49
Figura 2.6	Configuración para las probetas de acero reforzado de 640 mm.	50
Figura 2.7	Configuración para las probetas de acero de 640 mm.	50
Figura 2.8	Configuración para las probetas de acero reforzado de 490 mm.	51
Figura 2.9	Configuración para las probetas de acero de 490 mm.	51
Figura 2.10	Diagrama de flujo de elaboración de probetas.	57
Figura 3.1	Distribución normal de fuerza en probetas de resina	108

Figura 3.2	Distribución normal de esfuerzo máximo de compresión en probetas de resina	108
Figura 3.3	Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 de 490 mm	110
Figura 3.4	Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 de 640 mm	110
Figura 3.5	Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 de 790 mm	111
Figura 3.6	Distribución normal del esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 de 490 mm.....	111
Figura 3.7	Distribución normal del esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 de 640 mm.....	112
Figura 3.8	Distribución normal del esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 de 790 mm.....	112
Figura 3.9	Distribución normal de rugosidad promedio en probetas de acero A36 reforzadas de 490 mm.	114
Figura 3.10	Distribución normal de rugosidad promedio en probetas de acero A36 reforzadas de 640 mm.	114
Figura 3.11	Distribución normal de rugosidad promedio en probetas de acero A36 reforzadas de 790 mm.....	115
Figura 3.12	Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 reforzadas de 490 mm.....	115
Figura 3.13	Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 reforzadas de 640 mm.....	116
Figura 3.14	Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 reforzadas de 790 mm.....	116
Figura 3.15	Distribución normal de esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 reforzadas de 490 mm.	117
Figura 3.16	Distribución normal de esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 reforzadas de 640 mm.	117

Figura 3.17 Distribución normal de esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 reforzadas de 790 mm.	118
Figura 3.18 Diagrama de comparación de ensayo en probetas de acero sin reforzamiento de 490, 640 y 790 mm.	121
Figura 3.19 Diagrama de comparación de ensayos en probetas de acero con reforzamiento de 490, 640 y 790 mm.	121
Figura 3.20 Representación del diagrama caja y bigotes con los esfuerzos máximos en las probetas sin refuerzo.....	125
Figura 3.21 Representación del diagrama caja y bigotes con los esfuerzos máximos en las probetas con refuerzo.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Propiedades de diferentes tipos de fibras de carbono	11
Tabla 1.2	Simetría de materiales en tres dimensiones	14
Tabla 1.3	Fallos producidos en uniones adhesivas	22
Tabla 1.4	Tipos de abrasivos utilizados en las operaciones de sandblasting	25
Tabla 1.5	Clase de rugosidades según DIN/ISO 1302	27
Tabla 2.1	Equipos.	36
Tabla 2.2	Herramientas	37
Tabla 2.3	Consumibles.	39
Tabla 2.4	Propiedades del acero ASTM A-36	40
Tabla 2.5	Propiedades mecánicas de la resina epóxica	41
Tabla 2.6	Resistencia a compresión según EN 196	41
Tabla 2.7	Propiedades mecánicas de la fibra de carbono	42
Tabla 2.8	Especificación del número de probetas.	43
Tabla 2.9	Variable independiente.	44
Tabla 2.10	Identificación de probetas.	56
Tabla 2.11	Procedimiento de preparación en probetas de resina.	58
Tabla 2.12	Proceso de conformado de probetas CRF y SRF	62
Tabla 2.13	Procedimiento de réplica de ensayo experimental	69
Tabla 3.1	Reporte de ensayos a compresión	72
Tabla 3.2	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_490_01	74
Tabla 3.3	Reporte de rugosidad superficial CRF_490_02	75
Tabla 3.4	Reporte de rugosidad superficial CRF_490_03	76
Tabla 3.5	Reporte de rugosidad superficial CRF_490_04	77

Tabla 3.6	Reporte de rugosidad superficial CRF_490_05	78
Tabla 3.7	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_01	79
Tabla 3.8	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_02	80
Tabla 3.9	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_03	81
Tabla 3.10	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_04	82
Tabla 3.11	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_05	83
Tabla 3.12	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_01	84
Tabla 3.13	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_02	85
Tabla 3.14	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_03	86
Tabla 3.15	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_04	87
Tabla 3.16	Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_05	88
Tabla 3.17	Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_490.....	89
Tabla 3.18	Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_490	91
Tabla 3.19	Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_640.....	93
Tabla 3.20	Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_640	95
Tabla 3.21	Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_790.....	97
Tabla 3.22	Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_790	99
Tabla 3.23	Deflexión del acero A-36.....	101
Tabla 3.24	Deflexión del acero reforzado.....	102
Tabla 3.25	Deflexión del acero A-36.....	103
Tabla 3.26	Deflexión del acero reforzado.....	104
Tabla 3.27	Deflexión del acero A-36.....	105
Tabla 3.28	Deflexión del acero reforzado.....	106
Tabla 3.29	Resumen de datos en probetas de resina.....	107
Tabla 3.30	Resumen de datos en probetas no reforzadas.....	109

Tabla 3.31	Resumen de datos en probetas de acero reforzado.....	113
Tabla 3.32	Comparación de los resultados obtenidos en probetas sin reforzamiento	119
Tabla 3.33	Comparación de los resultados obtenidos en probetas con reforzamiento	120
Tabla 3.34	Cálculo del valor de t de los esfuerzos máximos de flexión.	122
Tabla 3.35	Cálculo del valor de t de los esfuerzos máximos de flexión.	124
Tabla 3.35	Cálculo del valor de t de los esfuerzos máximos de flexión.	124

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Resistencia: Capacidad de un material o estructura para soportar fuerzas sin romperse o deformarse permanentemente.

Probeta: Muestra de material utilizado para realizar pruebas y obtener datos representativos de las propiedades del material.

Reforzado(a): Probeta que ha sido fortalecida o modificada mediante el uso de algún material adicional para mejorar sus propiedades mecánicas.

No reforzado(a): Probeta sin ninguna modificación o añadido de material adicional, utilizado como referencia para comparar con las probetas reforzadas.

Adhesivo estructural: Sustancia que se utiliza para unir la lámina de refuerzo al sustrato (material de la probeta). Debe tener propiedades mecánicas y adherencia adecuada para garantizar una unión fuerte y duradera.

Platina unidireccional: Material reforzador compuesto por fibras que se extienden en una sola dirección, lo que proporciona una alta resistencia en esa dirección específica

AASTHO: Asociación Americana de Funcionarios de Transporte por Carretera.

FEM: Método de elementos finitos.

FEA: Análisis de elementos finitos.

CFRP: Polímero reforzado con fibra de carbono.

FHWA: Administración Federal de Carreteras.

NBI: Inventario nacional de puentes.

CF: Fibra de carbono.

GADs: Gobiernos autónomos descentralizados.

BWS: Soldadura a tope especiales.

LSS: Resistencia al cizallamiento por solape.

RESUMEN EJECUTIVO

La necesidad de un método para rehabilitar un miembro estructural ha incrementado significativamente debido al aumento de magnitudes en carga viva. El método de reacondicionamiento que utiliza placa de acero no es una solución viable debido al peso añadido, dificultad de fijación y problemas de soldadura, además de ser propensas a corrosión y fatiga.

Investigaciones previas, determinaron que existe una relación directamente proporcional entre la rugosidad y la resistencia adhesiva, además desarrollaron métodos alternativos de limpieza superficial, para mejorar uniones adhesivas, debido a ello se procedió a evaluar cómo influye el área de contacto en función a la resistencia a flexión, obteniendo resultados al aplicar el ensayo a flexión de tres puntos descrito en la normativa ASTM E290-22, además se analizó las propiedades compresivas del adhesivo por medio de un grupo de probetas dimensionadas según la normativa ASTM D695, no obstante se implementó un modelo matemático para establecer diferencias entre ensayos.

Con la presente investigación se comparó los resultados obtenidos del comportamiento del acero estructural ASTM A-36 reforzado con fibra de carbono unidireccional adheridas mediante un adhesivo tixotrópico de alta resistencia, en un formato de tres dimensiones, en dos grupos de probetas, la cual una de ellas no contó con reforzamiento, evidenciando el aumento duplicado de resistencia, el grupo que mejor resultados presentó por no tener falla por desprendimiento, fue el de mayor área de contacto con un valor promedio de 10.646 micrómetros y un esfuerzo máximo a flexión de 893.05 MPa.

Palabra clave: Acero reforzado, área de contacto, resistencia a flexión, tixotrópico, adhesivo.

ABSTRACT

The need for a method to rehabilitate a structural member has increased significantly due to the increase in magnitudes in live load. The reconditioning method using steel plate is not a viable solution due to the added weight, difficulty of fixing and welding problems, as well as being prone to corrosion and fatigue.

Previous research, determined that there is a directly proportional relationship between roughness and adhesive strength, also developed alternative methods of surface cleaning, to improve adhesive bonds, because of this we proceeded to evaluate how the contact area influences depending on the flexural strength, obtaining results when applying the three-point bending test described in the ASTM E290-22 standard, In addition, the compressive properties of the adhesive were analyzed by means of a group of specimens dimensioned according to the ASTM D695 standard, however a mathematical model was implemented to establish differences between tests.

With the present investigation we compared the results obtained from the behavior of structural steel ASTM A-36 reinforced with unidirectional carbon fiber adhered by a high strength thixotropic adhesive, in a three-dimensional format, in two groups of specimens, which one of them did not have reinforcement, evidencing the doubled increase in resistance, the group that presented the best results for not having failure due to detachment, was the one with the largest contact area with an average value of 10,646 micrometers and a maximum flexural effort of 893.05 MPa.

Keyword: Reinforced steel, contact area, flexural strength, thixotropic, adhesive.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1 Tema

“Evaluación del acero estructural reforzado con fibra de carbono unidireccional mediante el método de ensayo a flexión de tres puntos, descrito en la normativa ASTM E290-22 para determinar el incremento de resistencia”.

1.1 Antecedentes Investigativos

Tradicionalmente, con materiales y técnicas convencionales se han realizado la rehabilitación y el refuerzo de las estructuras de acero existentes. En este sentido, son bien conocidas la unión de placas de acero externas, el recorte y reemplazo de placas o la adición de soportes. Estas placas suelen ser voluminosas, pesadas, difíciles de arreglar y propensas a la corrosión y la fatiga. Sin embargo, los nuevos materiales emergentes de polímero reforzado con fibra (FRP) han ganado una amplia aceptación como alternativas en estas aplicaciones debido a sus propiedades superiores y facilidad de uso [1].

Ali Awaludin y Dewi Sari en su estudio realizado con el tema “**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIRED STEEL BEAM USING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER**” menciona que, para obtener una predicción precisa, el modelo de elementos finitos debe ser capaz de simular adecuadamente la tensión y las deformaciones interfaciales desarrolladas entre la lámina de (CFRP) y las estructuras reparadas. En su investigación, presenta un estudio sobre el análisis de elementos finitos (FEA) tanto experimental y como no lineal de acuerdo con la configuración de la prueba de flexión en cuatro puntos donde se cargaron monótonamente hasta la falla, en el cual además del aumento de la capacidad de carga, también se discutió la falla por desprendimiento.

En cuanto, la propuesta de análisis de elementos finitos desarrollado con software hace hincapié para lograr predecir la singularidad de la tensión en la viga de acero reforzada con (CFRP) donde mediante las especificaciones técnicas del material se pueden registrar resultados como desplazamientos del haz en cada punto de la carga, la magnitud de la carga aplicada y la medición de la deformación [2].

Francisco Peña y José Luis Yunapanta, en su trabajo **“PROPUESTA DE REFORZAMIENTO DE VIGAS DE ALMA LLENA DE PUENTES METÁLICOS CON FIBRA DE CARBONO Y RESINA EPÓXICA”** propone una metodología experimental con la cual trata de producir el comportamiento de una viga reforzada por medio de un modelo matemático utilizando elementos finitos a través de software ANSYS/ WORKBENCH – STATIC STRUCTURAL, concluyendo que las variables para producir el ensayo experimental por medio del análisis de elementos finitos son adecuadas, debido a que en la comparación de resultados no hay diferencias significativas. Sin embargo, en las pruebas experimentales el reforzamiento se desprendió a causa de ello sugieren determinar la rugosidad más adecuada para una mejor adherencia [3].

Como se indica en [4] los mejores resultados de unión adhesiva entre el acero y resina de una junta traslapada simple con fibra de carbono unidireccional fue mediante el tratamiento superficial sandblasting con un promedio de 10.79 μm , frente a otros tipos de limpieza no obstante, recomiendan investigar procesos alternativos debido a su desfavorable ejecución en campo por temas de reciclaje y costo, adicionalmente, como se demuestra en [5] el tratamiento de limpieza superficial por disco de cerdas de acero ofrece un acabado superficial promedio de 10,552 μm , generando un perfil de anclaje óptimo, además, recomienda utilizar este método de tratamiento superficial para comprobar el mejoramiento de la resistencia en elementos como vigas que son sometidas a cargas cíclicas aplicadas.

1.1.1 Justificación

En los últimos 35 años, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) y la Asociación Estadounidense de funcionarios Estatales de Autopistas y Transporte (AASHTO) desarrolló programas para calificar dando como resultado que más de un tercio de los puentes de carreteras en los Estados Unidos se consideran deficientes [6]. Según el último Inventario Nacional de Puentes (NBI), los considera como puentes de carretera obsoletos pero funcionales habiendo en este país más de 610.000 [7]. Por tal efecto, se someten a evaluaciones sísmicas según criterios de agencia [8].

A nivel de Latinoamérica el comportamiento que han demostrado las estructuras ante acciones sísmicas fuertes, como en Santiago de Cuba mediante investigaciones se evaluó la vulnerabilidad estructural de los puentes de carretera, demostrando que el 64.0% de los puentes ubicados en la red vial posee vulnerabilidad entre moderada y alta [9]. Considerando la extensión e hidrografía que presenta la región amazónica Ecuatoriana a finales del año 2018, el Instituto para el Ecodesarrollo Regional Amazónico realizó un total de 32 procesos, de los cuales 13 son reparaciones de puentes demostrando la ausencia de mantenimiento por parte de los GADs presentando un riesgo latente, en función a ello se monitorea para asegurar acciones de contingencia como el reemplazo de elementos deteriorados [10].

La necesidad de un método para rehabilitar un miembro estructural de acero existente, como el caso de una viga que está sujeta a carga de flexión, ha aumentado significativamente debido al aumento en las magnitudes de carga viva. El método de reacondicionamiento convencional que utiliza placa de acero no es una solución viable debido al peso añadido, la dificultad de fijación y problemas de soldadura [11]. En comparación con la técnica tradicional mediante la unión de placas de acero, la aplicación de compuestos de (CFRP) evita el procedimiento de soldadura y la aparición de tensiones residuales y, por lo tanto, es beneficiosa para la resistencia a la fatiga de las estructuras de acero. [12]. Por esta razón, es más deseable debido a que no requiere equipos pesados y se lo realiza mientras la estructura está en uso [2].

Actualmente, los elementos contruidos de acero de ala ancha (BWS) a medida se utilizan con frecuencia cuando el tamaño de sección de acero adecuado no está disponible en la lista de secciones de ala ancha estándar, pero esto se considera la razón principal del aumento del costo en la construcción, por lo tanto, es necesario reducir el costo de fabricación de estos miembros para lograr la competitividad de los precios en el mercado en términos de precio por capacidad de carga [13]. Siendo el costo de rehabilitación y reparación en la mayoría de casos mucho menor que el costo que tomará reemplazarlo, reduciendo así los periodos de interrupción del servicio, teniendo en cuenta los recursos limitados disponibles para mitigar problemas asociados con el acero [6].

El desarrollo actual de los materiales compuestos se basa en la necesidad de obtener materiales con mejores propiedades que combinen una buena resistencia y tenacidad, [14]. Esto es posible al utilizar las ventajas únicas de diferentes constituyentes de manera complementaria suprimiendo las limitaciones individuales de cada una de ellas, introduciéndose en una amplia variedad de sectores industriales como materiales estructurales [15]. El uso más popular está en la rehabilitación de estructuras metálicas debido a su resistencia a la degradación ambiental y adaptabilidad a todo tipo de forma [16].

Una alternativa a la reparación estructural es el uso de adhesivos epoxi para unir refuerzos externos a elementos críticos [17]. En el caso de estructuras compuestas de gran tamaño a medida que se aumenta la sección adhesiva de espesor del adhesivo disminuye la resistencia al corte de solape (LSS) [18]. Las juntas compuestas unidas con adhesivo presenta una alta resistencia a la tracción, una alta plasticidad antes de la fractura, además de la capacidad de soportar fuerzas de impacto [19]. Estas propiedades mecánicas del área de unión dependen del diseño estructural, debido a esto se pretende establecer un modelo de elementos finitos basado en un modelo de daño progresivo además del modelo de zona cohesiva [20]. Esto facilitará la recopilación de datos durante el proceso proporcionando un modelo predictivo fundamental para lograr sistemas de monitoreo [21].

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo demostrar los resultados del comportamiento del acero reforzado sometido a flexión y la distribución de la deformación a lo largo de la longitud de la placa de acero adherida con fibra de carbono unidireccional y resina epoxi, para replicar el ensayo por medio de un modelo de elementos finitos, por ello afirmare que este estudio contribuirá con información técnica práctica para elaboración de futuros trabajos.

1.1.2 Fundamentación teórica

1.1.3 Reforzamiento de estructuras

La estructura de un puente puede vibrar bajo la acción de cargas dinámicas tales como vehículos en movimiento, multitudes, viento y terremotos. La vibración de la estructura del puente es un contenido importante del análisis de la estructura del puente. Bajo la acción de la carga dinámica del vehículo y, en raras ocasiones, la carga dinámica de la multitud, el viento y el movimiento del suelo del terremoto, la vibración de la estructura del puente aumentará la fuerza interna calculada de acuerdo con la fuerza estática y puede provocar daños por fatiga de estructura local o formar la deformación por vibración y la aceleración que afectará la comodidad y la seguridad del vehículo en la estructura del puente, e incluso dañará completamente el puente [22].

- **Técnicas convencionales**

En general las técnicas convencionales son las técnicas más utilizadas para rehabilitación de puentes, estas requieren maquinaria pesada además de un largo periodo de interrupción del servicio y son costosas. En la mayoría de los casos, no eliminan por completo la posibilidad de que el problema vuelva a ocurrir. Estos reforzamientos generalmente son (ver Figura 1.1): refuerzo de miembros, adición de miembros, postensado y aisladores de base [6].

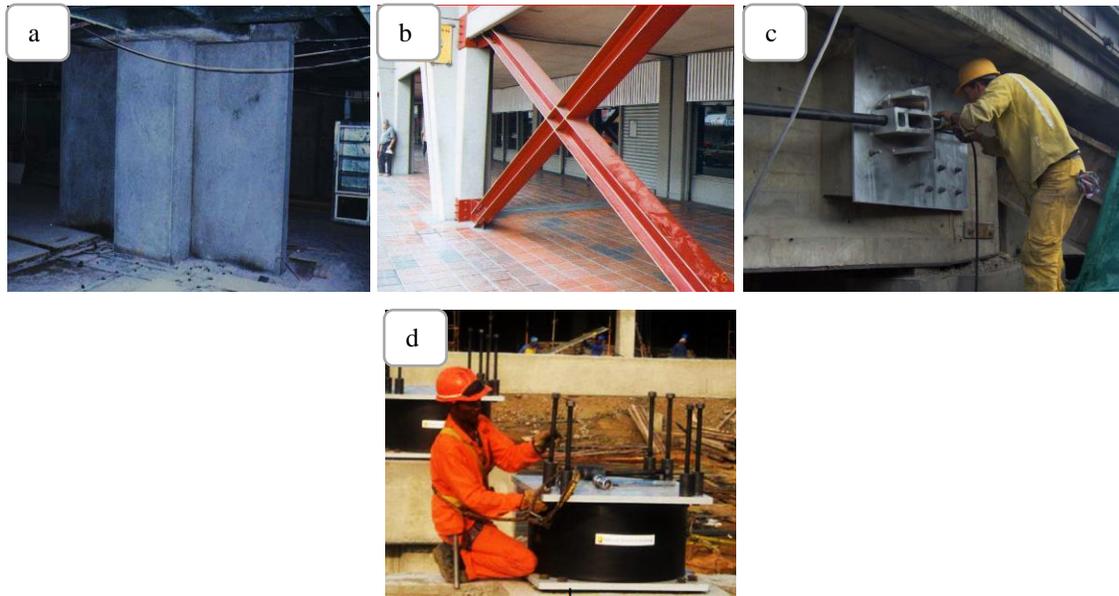


Figura 1.1 Técnicas convencionales: a) Refuerzo de miembros. b) Adición de miembros. c) Postensado. d) Aisladores de base [23].

- **Técnicas no convencionales**

Técnicas como el encamisado es un tipo de reforzamiento poco atractivo ya que afecta la apariencia arquitectónica de la construcción y por lo general son de concreto o acero, estos se forran para evitar que sus refuerzos sean observados, sin embargo, técnicas nuevas utilizan fibras de carbono como parches que se adhieren a las vigas por medio de epóxicos FRP (ver Figura 1.2) y ayudan de gran manera a la resistencia final de la viga [24].



Figura 1.2 Técnicas no convencionales: a) Encasamiento en acero. b) Encasamiento materiales compuestos FRP [23].

1.1.4 Materiales compuestos

Un compuesto es un material multifásico fabricado artificialmente, a diferencia de uno que se produce o se forma de forma natural. Además, las fases constituyentes deben ser químicamente diferentes y estar separadas por una interfaz distinta. Así, la mayoría de las aleaciones metálicas y muchas cerámicas no se ajustan a esta definición porque sus fases múltiples se forman como consecuencia de fenómenos naturales [25].

Los materiales compuestos se utilizan ampliamente para diversas aplicaciones de refuerzo, mejora o reacondicionamiento de estructuras civiles de hormigón o acero existentes [17]. En la Figura 1.3. Se utiliza la regla de la mezcla, esto se hace en función de los refuerzos y la resina utilizados, y de la relación entre la dos. Para ello, se requiere especificar el contenido de fibra y la matriz. Además de las diferentes direcciones principales. Las reglas de mezcla se basan en una buena adherencia entre la fibra y matriz, y de la ausencia de daños e inclusiones [26].

Normalmente satisfacen tres criterios antes de que lo llamemos un material compuesto en primer lugar, ambos constituyentes deben estar presentes en cantidades razonables. En segundo lugar, las fases deben tener claramente diferentes propiedades, de modo que las propiedades del compuesto son notablemente diferentes de las propiedades de los constituyentes. Por último, un compuesto sintético generalmente se produce mezclando y combinando deliberadamente el constituyente por diversos medios.

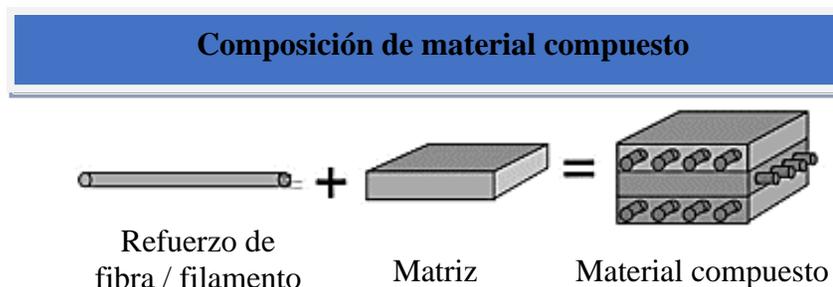


Figura 1.3 Esquema de un material compuesto [27].

1.1.4.1 Características de los materiales compuestos

Los materiales compuestos formado por dos o más constituyentes químicamente distintos en una escala macro, que tiene una interfaz distinta que los separa y con propiedades que no pueden ser obtenidas por ningún constituyente trabajando individualmente, sus características principales son [28]:

- ✓ Color
- ✓ Peso ligero
- ✓ Translucencia
- ✓ Resistencia al fuego
- ✓ Flexibilidad de diseño
- ✓ Propiedades eléctricas
- ✓ Economía manufacturera
- ✓ Baja conductividad térmica
- ✓ Alta relación resistencia/peso
- ✓ Resistencia química y a la intemperie

1.1.4.2 Clasificación de los materiales compuestos

La clasificación de ciertos materiales como compuestos a menudo se basa en casos en los que se producen cambios significativos en las propiedades como resultado de la combinación de constituyentes, y estos cambios de propiedad generalmente serán más obvios cuando una de las fases está en forma plaquetaria o fibrosa, cuando la fracción de volumen es mayor que el 10% y cuando la propiedad de un constituyente es mucho mayor en ocasiones (≥ 5 veces) que la otra [29].

Un esquema sencillo para la clasificación de los materiales compuestos se muestra en la Figura 1.4, que consta de tres divisiones principales: compuestos reforzados con partículas, reforzados con fibras y estructurales [25].

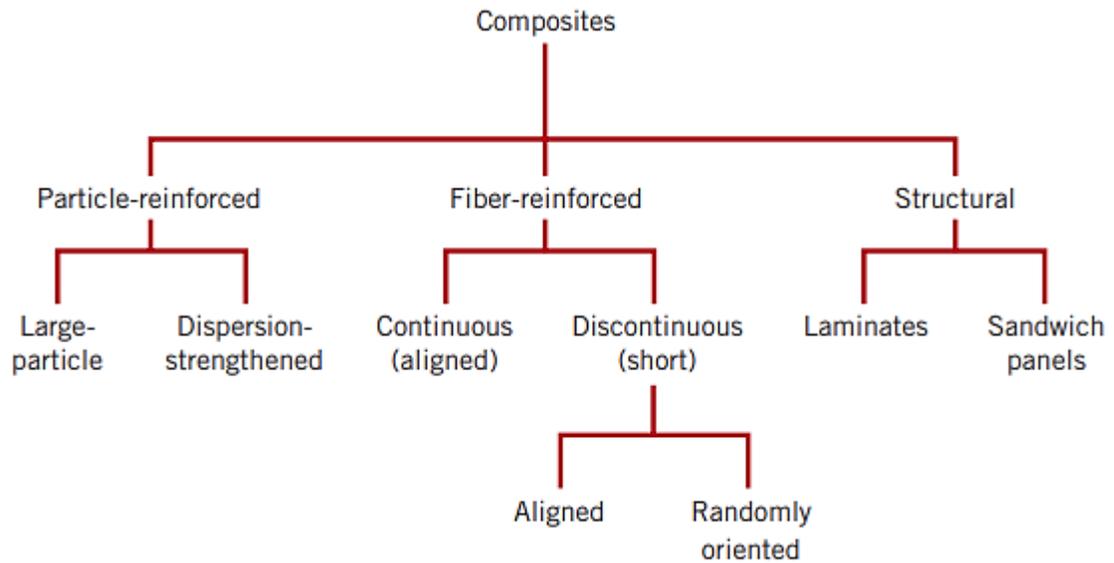


Figura 1.4 Esquema de clasificación de materiales compuestos [25].

1.1.5 Fibras

Una gran mayoría de los materiales son más fuertes y rígidos en forma fibrosa que como material a granel. Una alta relación de aspecto de la fibra (relación longitud-diámetro) permite una transferencia muy efectiva de la carga a través de materiales de matriz a las fibras, aprovechando así sus excelentes propiedades [29].

1.1.5.1 Tipos de fibra

Las fibras se clasifican por su origen químico, dividiéndose en dos grupos o familias: fibras naturales y fibras manufacturadas. Las fibras manufacturadas también se conocen como fibras artificiales o sintéticas [30].

Por lo tanto, las fibras son materiales de refuerzo muy efectivos y atractivo, además, se pueden clasificar en los grupos que se indican en la Figura 1.5.

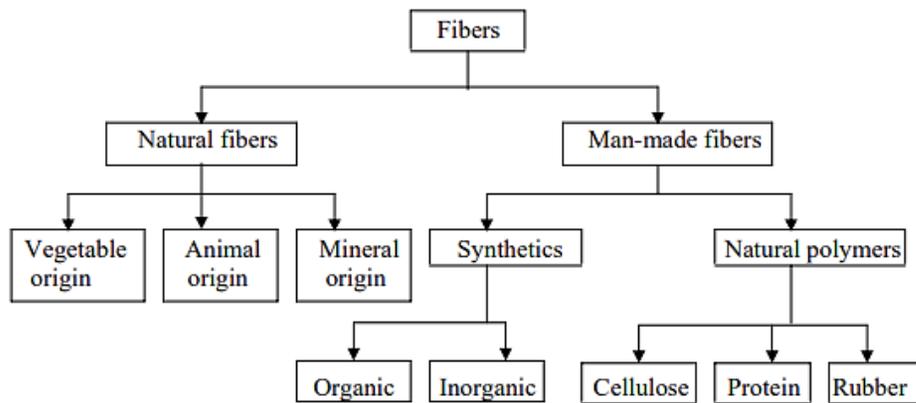


Figura 1.5 Clasificación de fibras [31].

1.1.6 Fibra de carbono

La fibra de carbono es un material de origen inorgánico que consta de fibras extremadamente finas de aproximadamente 0,005-0,010 mm de diámetro y consta de Átomos de carbono. Estos están unidos en cristales microscópicos que están más o menos alineados paralelos a el eje longitudinal de la fibra. La alineación de los cristales hace que la fibra sea muy fuerte para su tamaño. Varias fibras de carbono son torcidos juntos para formar un hilo, que puede usarse solo o entretejerse en una tela. Además, tiene muchos diferentes patrones de tejido y se pueden combinar con una resina plástica y madera o moldearse para formar materiales compuestos como polímero reforzado con fibra de carbono [32].



Figura 1.6 Fibra de carbono [33].

Aunque la regulación de las características de la interfaz fibra/matriz sigue siendo una dificultad crítica, los cambios en la estructura (CF) han mejorado enormemente las propiedades mecánicas de los compuestos poliméricos de alto rendimiento [27].

Según [34] identificó 3 tipos de diferentes fibras de carbono a partir de temperaturas de tratamiento, además, sus características se muestran en la Tabla 1.1:

- La fibra de carbono de alta resistencia (**HR**):
Carbonizado a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a la tracción, siendo esta la más fuerte.
- La fibra de carbono de alto modulo (**HM**):
Es la que mayor temperatura requiere en el tratamiento siendo esta la más rígida.
- El tipo de fibra de carbono (**III**):
Tiene menor rigidez lo que la hace más económica que las anteriores.

Tabla 1.1 Propiedades de diferentes tipos de fibras de carbono [34].

Designación	Unidad	Alta resistencia (HR)	Alto Módulo (HM)	III
Diámetro de hilo	μm	8	7	7 – 8
Densidad	(kg/m ³)	1740-1760	1860 – 1870	1820
Módulo de elasticidad	(GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción	(GPa)	2.6 – 5	2.1 – 2.7	3.1
Elongación a rotura	(%)	2	0.7	1.1
Módulo específico	-	130	210	160
Coefficiente de expansión térmica	(10 ⁻⁶ /°C)	2.56	2.56	2.56

1.1.7 Fibra de carbono unidireccional

Los compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP) se caracterizan debido a su alta resistencia específica y módulo, son deseables en aplicaciones donde la reducción de peso tiene un impacto significativo en el rendimiento y la economía de combustible. Los (CFRP) se producen típicamente en una configuración laminada, con capas delgadas (~ 100 μm) de fibra de carbono construidas hasta el espesor deseado y unidas con un polímero. Si bien la libertad de cambiar la orientación de la fibra en cada capa permite propiedades en el plano personalizables, la diferencia se basa en que la relación de la fuerza será en una sola dirección [35].

1.1.8 Conformación de fibra de carbono

Las fibras también se pueden agrupar en hebras retorcidas para formar un hilo. Las hebras sin torcer pueden combinarse en una mecha. Se pueden hacer dos clases de conformación [26]:

- **Tejido de fibra de carbono**

En la fabricación de una tela, los haces de fibra están tejidos. El rizado, la estructura superficial y la capacidad de drapeado están determinados por el patrón de tejido de urdimbre y trama. El rizado en este contexto se define como la "curvatura" de una fibra en una tela tejida que está determinada por el patrón de tejido. En la Figura 1.7 se muestran varios patrones de tejido [26].

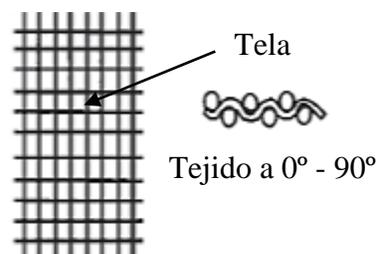


Figura 1.7 Direcciones de orientación de tejido de fibra de carbono [26].

- **Laminado de fibra de carbono**

Los compuestos de fibra continua son materiales laminados o platinas que están conformadas por capas individuales (ver Figura 1.8), las capas o el laminado están orientados en direcciones que mejoran la resistencia en la dirección de la carga primaria. Los laminados unidireccionales (0°) son extremadamente fuertes y rígido en la dirección (0°); sin embargo, también son muy débiles en la dirección (90°) porque la carga debe ser soportada por la matriz polimérica mucho más débil. Las cargas de tensión y compresión longitudinales son transportadas por las fibras, mientras que la matriz distribuye la cargas entre las fibras en tensión y estabiliza y evita que las fibras se pandeen en compresión. La matriz también es el soporte de carga principal para el corte interlaminar (es decir, cortante entre las capas) y tensión transversal (90°) [36].

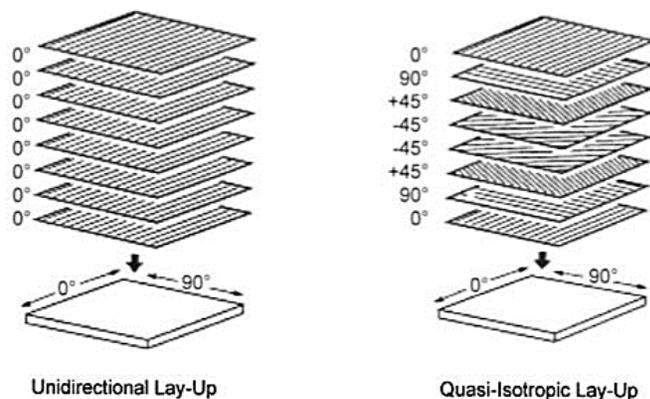


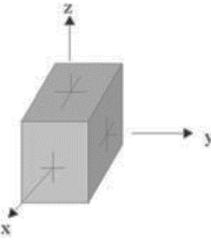
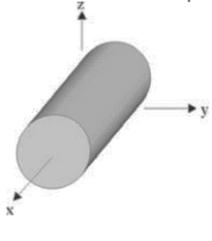
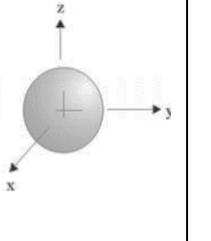
Figura 1.8 Platina conformada por capas individuales de fibra de carbono [36].

1.1.9 Constante elástica

Los composites unidireccionales con altos contenidos de fibra son considerados transversalmente isótropos esto debido a que un material es denominado así cuando uno de sus planos principales es un plano de isotropía, en consecuencia existe un plano en el cual las propiedades mecánicas son las mismas en todas las direcciones del plano [37].

Si el material tiene planos de simetría, es decir, aquellos donde los puntos homólogos al plano tienen las mismas características, algunos de los coeficientes se anulan [37]. En la Tabla 1.2 se muestran los casos para determinar las constantes independientes según los ejes coordenados.

Tabla 1.2 Simetría de materiales en tres dimensiones [34].

Constantes independientes	Ortótropo 	Transversalmente isótropo 	Isótropo 
Módulo de elasticidad	E_x, E_y, E_z	$E_x, E_y = E_z$	$E_x = E_y = E_z$
Coefficiente de Poisson	ν_x, ν_y, ν_z	$\nu_x, \nu_y = \nu_z$	$\nu_x = \nu_y = \nu_z$
Módulo cortante	G_x, G_y, G_z	$G_x, G_y = G_z$	$G_x = G_y = G_z$

Las siguientes fórmulas se utilizan para realizar los cálculos correspondientes a las simetrías mencionadas, tomadas de la referencia [3].

Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 1:

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (1)$$

Donde:

V_f = Fracción volumétrica de la fibra.

E_f = Módulo de elasticidad de la fibra.

E_m = Módulo de elasticidad de la matriz.

Módulo de elasticidad del compuesto en la dirección 2:

$$E_2 = \frac{E_m}{(1 - \nu_m^2)(1 + 0.85\nu_f^2)} \frac{E_m V_f}{(1 - \nu_f)^{1.25} + \frac{E_f}{1 - \nu_m^2}} \quad (2)$$

Donde:

v_m = Coeficiente de Poisson de la fibra de la matriz.

v_f = Coeficiente de Poisson de la fibra.

Módulo cortante menor:

$$G_{12} = \frac{G_m(1 + 0.6v_f^{0.5})}{(1 - V_f)^{1.25} + \frac{V_f}{(1 - v_m^2)}} \quad (3)$$

Donde:

G_m = Módulo cortante de la matriz.

Coeficiente de Poisson mayor:

$$v_{12} = V_f v_f + (1 - V_f) v_m \quad (4)$$

Coeficiente de Poisson menor:

$$v_{21} = v_{12} \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

Módulo cortante menor:

$$G_{21} = \frac{E_2}{2(1 + v_{21})} \quad (6)$$

1.1.10 Matrices

Los polímeros utilizados como materiales de matriz se denominan comúnmente resinas. La resina matriz generalmente representa del 30 al 40 %, en volumen, de un material compuesto. Además de mantener la forma de la estructura compuesta, alinear los refuerzos y actuar como medio de transferencia de esfuerzos. La matriz protege las

fibras de la abrasión y la corrosión, y lo que es más importante, la limitación de un material compuesto bien puede ser una función de las propiedades de la matriz [38].

1.1.11 Uniones

Básicamente, para la unión de dos piezas individuales para conformar un solo elemento existen varios tipos de uniones comúnmente empleados como los que se muestran en la Figura 1.9 [39].



Figura 1.9 Tipos de uniones [39].

1.1.11.1 Uniones mecánicas

Las características principales de una unión mecánica es el uso de sistemas discretos auxiliares para mantener unidas las piezas del ensamblaje, estos elementos de conexión pueden ser normalmente remaches, tornillos, pasadores o grapas (ver Figura 1.10) [40].

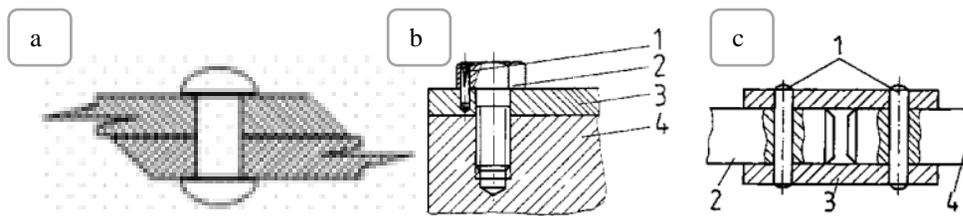


Figura 1.10 Representación de: a) Remaches b) Tornillos y c) Pasadores [41].

1.1.11.2 Uniones soldadura

En práctica, la soldadura (ver Figura 1.11) se puede definir como un procedimiento que permite unir partes en una sola pieza, asegurando así la continuidad entre ellas mediante calentamiento y/o presión con o sin empleo de un material de aporte cuyas características físicas son comparables al procedimiento específico utilizado. La soldadura se considera terminada cuando se asegura la penetración de los granulos entre las piezas, ya sea directamente o a través de un material de aportación [39].

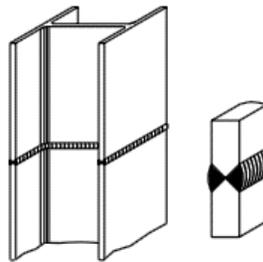


Figura 1.11 Unión soldada [42].

1.1.11.3 Uniones adhesivas

La Figura 1.12 muestra una serie de configuraciones típicas de unión adhesiva. suelen caracterizarse por una alta concentración de esfuerzos en la capa adhesiva. Esto se debe a la deformación axial no uniforme de los sujetadores bajo esfuerzos cortantes y la excentricidad de la dirección de la carga bajo esfuerzos de pelado.

La reacción a los esfuerzos de pelado suele ser mucho más frágil que la respuesta al cortante, lo que reduce los esfuerzos siendo de esta manera lo más deseable para un buen comportamiento de la unión [40].

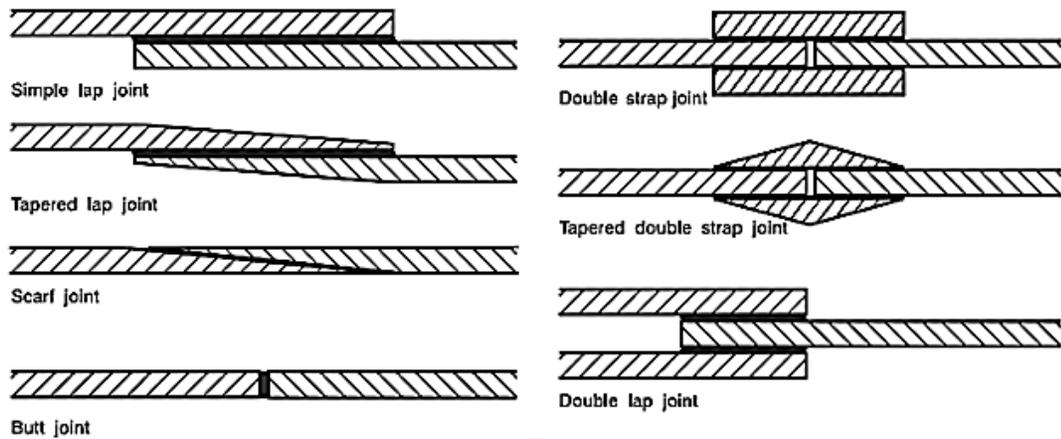


Figura 1.12 Configuraciones típicas de unión adhesiva [43].

1.1.11.4 Uniones híbrida

Una unión híbrida es una combinación de una técnica convencional de unión (uniones mecánicas, soldaduras) con unión adhesiva (ver Figura 1.13). La finalidad de este método es aprovechar tanto las técnicas de unión, mayor rigidez de las estructuras, mayor superficie de transferencia de esfuerzos, sellado anticorrosión, entre otros, evitando sus inconvenientes, sensibilidad a esfuerzos de pelado, problemas de envejecimiento, resistencia al calor limitada, necesidad de un utillaje caro durante el proceso de curado del adhesivo, entre otros [39].

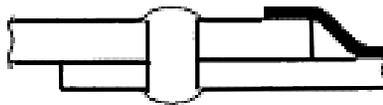


Figura 1.13 Esquema de unión híbrida remache – adhesivo [44].

1.1.12 Adhesivos

Un adhesivo se define como un aglomerante no metálico, este actuar por adhesión y cohesión, (ver Figura 1.14) esta es una sustancia capaz de unir materiales mediante la

unión entre superficies, de manera que debe adherirse a la superficie debido a la adhesión y naturalmente la cohesión debe mantener el adhesivo unido [45].

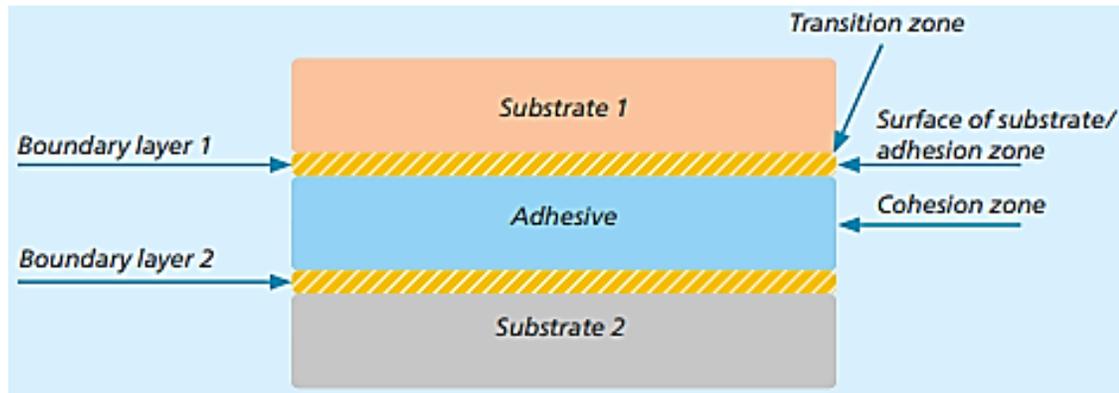


Figura 1.14 Esquema de unión adhesiva [45].

1.1.12.1 Tipos de adhesivos

Se utilizan como adhesivos una gran variedad de materiales, incluyendo compuestos poliméricos naturales (almidones, dextrinas, proteínas y caucho natural), inorgánicos (siliconas) y polímeros sintéticos materiales (termoplásticos, termoestables, elastómeros). Las formas de adhesivos incluyen pastas, líquidos, películas, y espumas [46]. En consecuencia, según [47] existen muchos tipos de adhesivos y se pueden clasificar en:

Adhesivos estructurales: por lo general, estos son epóxicos y acrílicos.

Adhesivo semiestructural/ no estructural: estos son, comúnmente usados donde la falla sería menos crítica y aplicaciones con fines estéticos de terminado.

Adhesivos de contacto: el adhesivo se aplica a ambas superficies luego se espera que el solvente se evapore para posteriormente los dos adherentes se pongan en contacto.

Adhesivos sensibles a presión: estos son elastómeros de módulo muy bajo siendo deformables con facilidad con presiones pequeñas, pero con enlaces relativamente durables, mediante una fusión en caliente que humedece la superficie enfriándose y formando un polímero sólido.

Adhesivos anaeróbicos: generalmente estos se curan dentro de espacios pequeños privados de oxígeno, por medio de exposición de agentes o mediante un catalizador, usado en aplicaciones de ingeniería mecánica para fijar pernos y cojinetes.

1.1.12.2 Distribución de tensiones

En servicio, las uniones pueden estar sujetas a diversos grados de estrés mecánico por carga de tracción y flexión (ver Figura 1.15). Estas deben diseñarse para soportar estas tensiones [48].

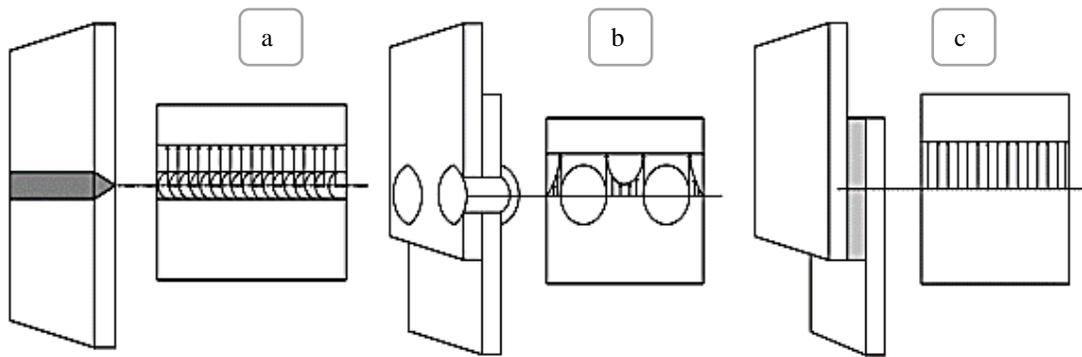


Figura 1.15 Distribución de tensiones en: a) Soldadura b) Uniones mecánicas c) Uniones Adhesivas [39].

1.1.12.3 Efecto de la rugosidad superficial

Diversos mecanismos pueden favorecer o dificultar la adhesión entre componentes, un concepto clave a este respecto es el de humectabilidad, que nos habla de la capacidad de un fluido para extenderse sobre una superficie sólida plana. Además, describe el grado

de contacto interno, si bien se asume implícitamente que el sustrato es perfectamente liso, sin embargo, esto dista mucho de ser cierto en la práctica (ver Figura 1.16). Debido a que la interfaz entre la fibra y la matriz debe ser bastante rugosa en lugar de una interfaz plana ideal [49].

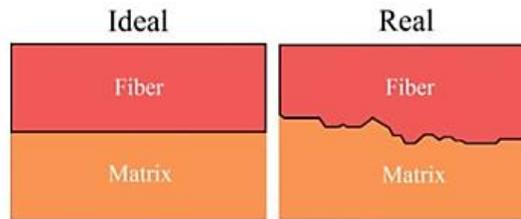


Figura 1.16 (a) Interfaz plana ideal entre el refuerzo y la matriz. (b) Una irregularidad más probable interfaz entre fibra y matriz [49].

1.1.12.4 Separación de uniones adhesivas

Al diseñar una unión adhesiva, el objetivo es que la distribución de tensiones de tracción, compresión, flexión, torsión y cizallamiento sea lo más uniforme posible. Por lo tanto, es necesario comprender bien cómo se distribuyen los esfuerzos en la unión sometida a esfuerzos y dependiendo como actúen estas fuerzas (ver Figura 1.17) se puede plantear una solución adecuada [39].

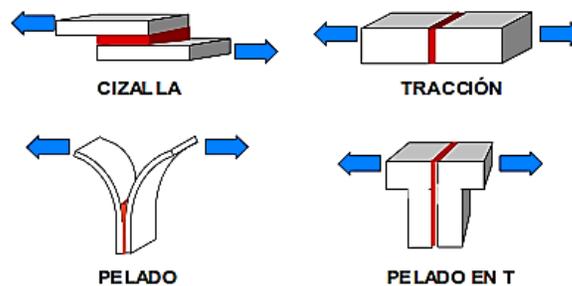


Figura 1.17 Tipos de separaciones [46].

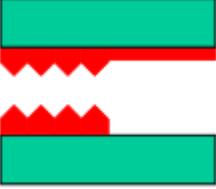
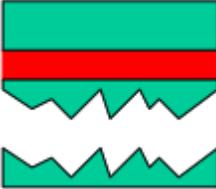
1.1.12.5 Fallo en uniones adhesivas

Al diseñar una unión adhesiva se procura que la rotura no caiga en una zona adhesiva es decir que el desprendimiento no se produzca en la interfase sustrato-adhesivo, puesto

que la rotura adhesiva no es predecible, dado que la magnitud de fuerza de adhesión depende de factores rara vez controlables [46].

Por el contrario, al conocer las características mecánicas del adhesivo se puede predecir las cargas de rotura en modo cohesivo bajo diferentes tipos de esfuerzos, adicionalmente, se puede evaluar la adhesión de dos sustratos mediante un ensayo de rotura, de modo que puedan ocurrir distintos tipos posibles de fallos mostrados en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Fallos producidos en uniones adhesivas [46].

Fallo adhesivo	Fallo cohesivo	Fallo intermedio	Fallo del sustrato
			
<p>Se produce cuando se separa la interfase sustrato-adhesivo.</p>	<p>Ocurre cuando se produce la ruptura del adhesivo.</p>	<p>Ocurre cuando se produce una combinación de los fallos anteriormente mencionados.</p>	<p>Cuando se rompe el sustrato antes que la unión adhesiva o que la interfase sustrato-adhesivo.</p>

1.1.12.6 Resina epoxi

Es uno de los principales materiales de matriz termoestable. Un epoxi es un polímero que contiene un grupo epóxido en su estructura química; véase la Figura 1.18, es un líquido orgánico de bajo peso molecular. Con frecuencia, se utilizan diversos aditivos para modificar sus características, además, se utilizan diluyentes para reducir la viscosidad. Los agentes flexibilizantes se utilizan para que el epoxi sea flexible. Otros agentes se utilizan para proteger contra la radiación ultravioleta. Los agentes de curado son compuestos orgánicos amino o ácidos, y la reticulación se obtiene introduciendo sustancias químicas que reaccionan entre sí en cadenas adyacentes [49].



Figura 1.18 Resina epóxica [50].

Las resinas epoxi son más caras que los poliésteres, pero tienen mejor resistencia a la humedad, menor contracción durante el curado (alrededor del 3 %), mayor temperatura máxima de uso y buena adhesión a las fibras de vidrio. Existen muchas fórmulas patentadas de epoxis, y una gran parte de los compuestos de matriz polimérica de alto rendimiento tienen epoxis termoendurecibles como matrices [49].

1.1.13 Preparación de superficie

En la fabricación de muestras, el rendimiento del (CFRP) Adherido al miembro estructural depende principalmente de la preparación de la superficie [11]. Se sugiere seguir los siguientes pasos (ver Figura 1.19); como el tratamiento de acabado superficial seguido de la eliminación de polvo, que son factores que influyen en la transferencia de fuerza entre las placas que se llevan a cabo a través de la unión en la interfaz entre dos materiales debido a la creación de una superficie químicamente activa en el acero que promueve la formación de fuertes enlaces químicos con el adhesivo [51].

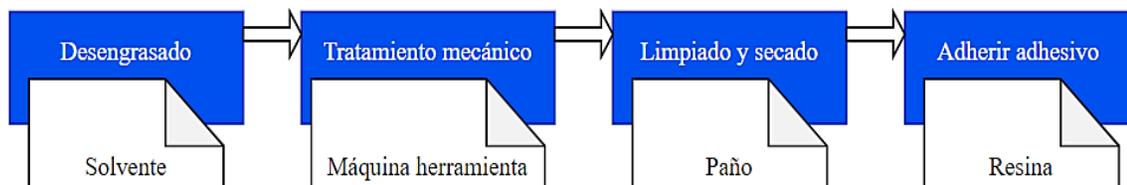


Figura 1.19 Esquema de preparación superficial para aplicar adhesivo [11].

1.1.13.1 Limpieza por máquinas herramientas

Es posible eliminar impurezas; tales como rebabas luego de corte, corrosión, residuos de soldadura, pintura envejecida y otras incrustaciones se utiliza la normativa SSPC-SP-3

mediante la aplicabilidad de máquinas herramientas eléctricas o neumáticas (ver Figura 1.20). Como una alternativa previa antes de realizar el proceso de limpieza se debe retirar todo tipo de contaminante como grasa, sal, polvo, químicos, entre otros [52].



Figura 1.20 Limpieza por maquina neumática - Granallado convencional [53].

1.1.13.2 Limpieza con chorro de abrasivo – Sandblasting

Para lograr un acabado superficial conocido como grado metal blanco (ver Figura 1.21) la normativa SSPC -SP-5/ NACE N°1, establece el uso de cualquier tipo de abrasivo proyectado a presión para eliminar imperfecciones, es utilizada donde las condiciones de superficie son extremadamente severas y deben verse libre de contaminantes [52].



Figura 1.21 Acabado generado por sandblasting [53].

- **Abrasivos**

El uso de abrasivos con características de reciclabilidad (ver Tabla 1.4) es fundamental no sólo para la rentabilidad, sino también para aumentar la circularidad de los abrasivos en el sistema, de forma que se generen menos residuos, es decir que la tasa de degradación del abrasivo depende del tipo y dureza del abrasivo además de la dureza de la superficie limpiada [54].

Tabla 1.4 Tipos de abrasivos utilizados en las operaciones de sandblasting [55].

Tipos de abrasivos	Ejemplo	Forma	Reciclabilidad
Sintético o granos de minerales naturales	Sílice cristalina	Angular	Bajo – medio
	Granate		
Escoria abrasiva	Escoria de cobre	Angular	Alta
	Escoria de níquel		
	Escoria metálica mixta		
Granalla metálica o granalla	Acero	Angular o esférica	Medio – alta
	Hierro fundido		
Orgánico (molidos)	Mazorca de maíz	Angular	Bajo – medio
	Cáscara de nuez		
Otras alternativas abrasivos	Bicarbonato de sodio	Angular o esférica	Bajo
	Hielo seco		
	Bolitas de plástico		

Para este método de limpieza se utilizan abrasivos metálicos y no metálicos a presión, asimismo, estudios previos mencionan que se admitirá que la superficie tenga un 5% de materiales extraños además de una notable coloración en cada pulgada cuadrada de la superficie [52].

Blíster blaster logra resultados de anclaje como si fuera un chorro de arena de calidad elevada, produciendo un acabado comparable al granallado (ver Figura 1.22) debido a que elimina impurezas mediante el uso de cepillos con cerdas giratorias llegando a niveles de rugosidad de hasta 120 μm por medio de una herramienta eléctrica manual portátil [53].



Figura 1.22 Proceso de preparación de superficie por cepillo abrasivo [53].

1.1.14 Rugosidad superficial

La rugosidad superficial se define como la frecuencia más corta de las superficies reales en relación con las depresiones. La rugosidad de la superficie no sólo afecta al aspecto del objeto, sino que también produce diferencias de textura o tacto añadiendo valor agregado a un producto, como la clase y la satisfacción del cliente. Si una pieza entra en contacto con algo, su rugosidad superficial afecta a la cantidad de desgaste o a la capacidad de formar un sello, además, si la pieza se va a pintar, la rugosidad también afecta al grosor de la pintura [56].

1.1.14.1 Rugosidad media

La rugosidad media es la media aritmética de los valores absolutos de las distancias “y” desde el perfil rugoso hasta la línea central dentro del tramo de medición. Corresponde a la altura de un rectángulo cuya longitud es igual al tramo de medición total y cuya área es igual a la suma de las superficies encerradas entre el perfil rugoso y la línea central (véase la Figura 1.23) [57].

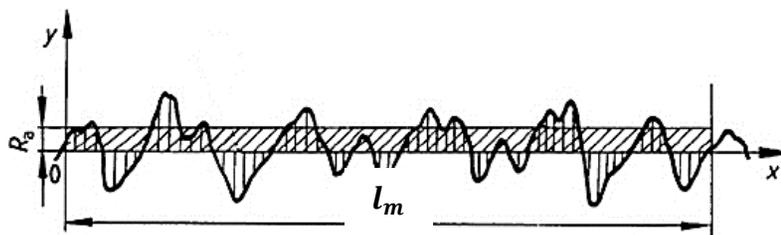


Figura 1.23 Representación de la rugosidad media [57].

Según [58] la rugosidad media se calcula mediante la fórmula:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y| dx \quad (7)$$

Donde:

R_a = Rugosidad media aritmética.

l_m = Longitud de evaluación.

y = Coordenadas del perfil.

1.1.14.2 Grado de rugosidad superficial

Según DIN/ISO 1302 se puede identificar la clase de rugosidad mediante el valor de la rugosidad media se muestra en la Tabla 1.4 para una mayor facilidad de especificación se clasifica según su proceso de fabricación [59].

Tabla 1.5 Clase de rugosidades según DIN/ISO 1302 [59].

Proceso de acabado de superficie	Valor de rugosidad R_a		Nº de calidades de rugosidad
	μm	$\mu\text{pulgadas}$	
Pulido	0.025	1	N 1
	0.05	2	N 2
	0.1	4	N 3
Bruñido	0.2	8	N 4
	0.4	16	N 5
Lijado	0.8	32	N 6
	1.6	63	N 7
Esmerilado	3.2	125	N 8
Sandblasting	6.3	250	N 9
	12.5	500	N 10
Bristle blaster	25	1000	N 11
	50	2000	N 12

1.1.14.3 Medición de la rugosidad

Para que la recogida de datos sea correcta, la galga debe pasar sobre la superficie en línea recta, de modo que sólo la punta del palpador siga la superficie que se está comprobando (ver Figura 1.24). Para ello se utiliza un punto de referencia de rectitud. Puede consistir en algún tipo de barra de referencia que suele estar lapeada o rectificada con precisión para obtener una alta tolerancia de rectitud. En otros casos, es posible utilizar un medio alternativo de referencia como es el de un patín [60].

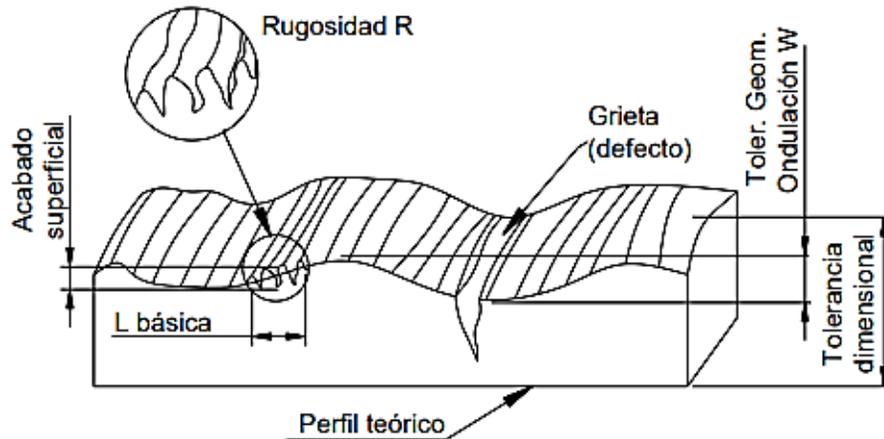


Figura 1.24 Obtención de mediciones de un perfil [58].

1.1.14.4 Rugosímetro

Para poder cuantificar la textura de la superficie, es necesario utilizar instrumentos tradicionales de medición de superficies, este consta de un palpador con una punta pequeña (uña), un calibrador o transductor, un punto de referencia transversal y un procesador (ver Figura 1.25). La superficie se mide moviendo el palpador por la superficie. A medida que el palpador sube y baja por la superficie, el transductor convierte este movimiento en una señal que se transmite a un procesador que la convierte en un número y, normalmente, en un perfil visual [60].

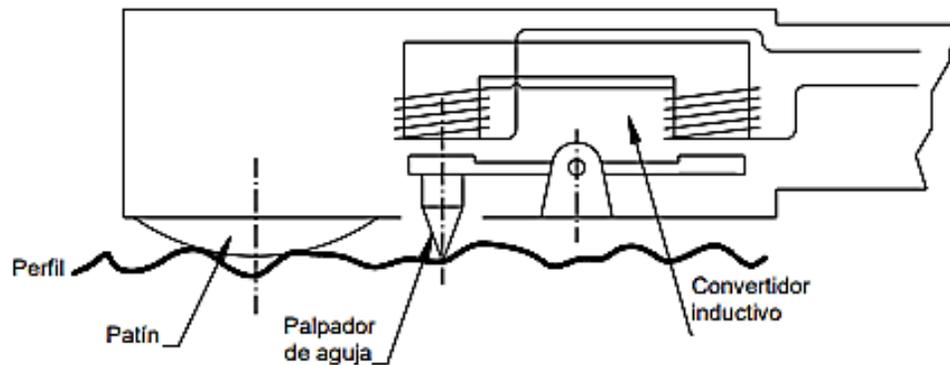


Figura 1.25 Esquema de instrumento de medición de superficie [58].

Es importante tener en cuenta las siguientes reglas para poder reconocer la calidad superficial de un determinado elemento:

- **Regla del 16 %**

La superficie se considera aceptable si como máximo el 16% de todos los valores medidos del parámetro considerado, obtenidos sobre una longitud de evaluación, sobrepasa el valor especificado en los dibujos o en otra documentación técnica del producto [58].

- **Regla del valor máximo**

Ninguno de los valores del parámetro de rugosidad medidos sobre la totalidad de la superficie a controlar debe sobrepasar el valor especificado en los dibujos o en la documentación técnica del producto [58].

1.1.15 Método de elementos finitos

El principal objetivo de este método es proponer un modelo de elementos finitos tridimensionales preciso para investigar el comportamiento de un determinado material, que pueden conducir a idear una guía de diseño específica para este tipo de aplicación.

El comportamiento no lineal, geométrico y material de todos los componentes se tiene en cuenta en el modelado [61].

El MEF se verifica comparando sus resultados con resultados experimentales disponibles (ver Figura 1.26), el procedimiento validado se utiliza para estudiar la respuesta típica de carga-deflexión de rango completo, el modo de falla, el deslizamiento relativo entre superficies y la distribución de deformaciones en un determinado elemento sujeto a cargas distribuidas uniformemente o concentradas. Luego se realizan estudios paramétricos para investigar los efectos de la variación de su comportamiento [61].

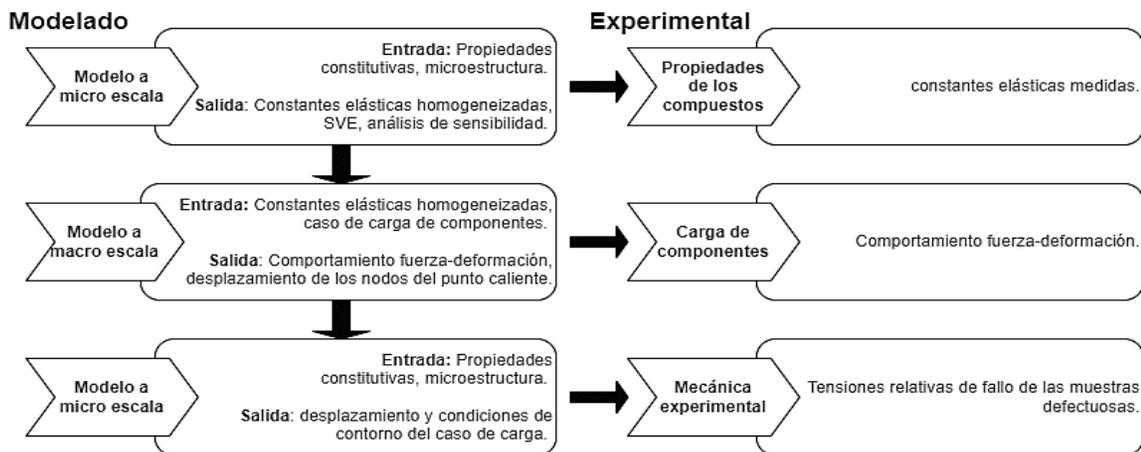


Figura 1.26 Diagrama que describe el procedimiento de un modelado con uno experimental [62].

1.1.15.1 Discretización

El Método de Elementos Finitos (FEM) es una herramienta muy útil para investigaciones generales del comportamiento de sólidos tales como: placas, láminas, vigas, sólidos, etc. FEM discretiza el área de estudio en un número finito de elementos que se encuentran conectados por nodos (ver Figura 1.27). En análisis estructural la principal variable de la tarea es el desplazamiento que sufren esos nodos, mediante FEM es posible encontrar una buena aproximación para la solución correcta de los desplazamientos de los nodos para luego interpolar esos resultados a otros nodos, esta

aproximación mejora a medida que la discretización se vuelve más precisa, es decir se divide en partes pequeñas del mismo tamaño [63].

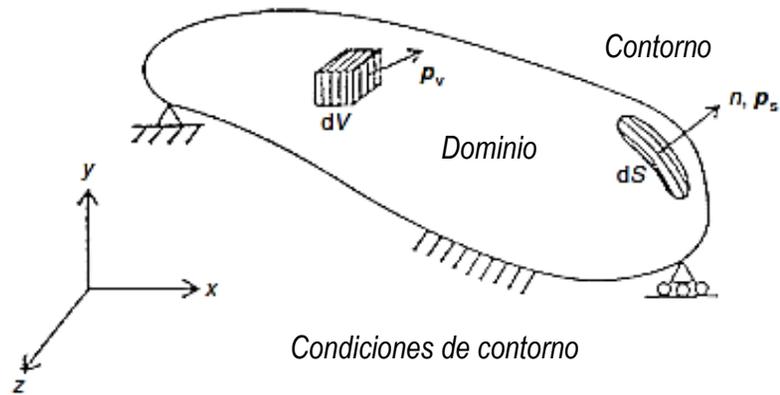


Figura 1.27 Esquema arbitrario de un problema general [64].

1.1.15.2 Tipo de elementos

La variación de desplazamiento a lo largo de una estructura compleja se puede aproximar mediante elementos finitos, la idea es dividir la estructura en elementos: 1D (barras), 2D (superficies) y 3D (sólidos) que sean lo suficientemente pequeños para que la forma desplazada se pueda asumir con poco error [64].

✓ Elemento unidimensional

Generalmente se utilizan para representar vigas o barras. La figura 1.28 muestra la imagen de un elemento lineal, este elemento se forma después de conectar dos nodos [65].



Figura 1.28 Elemento lineal con dos nodos [65].

✓ Elemento bidimensional

Se conoce como elemento bidimensional a los elementos conformados por 3 o más nodos (ver Figura 1.29). estos elementos se utilizan para el análisis de materiales compuestos, ya que solo pueden soportar tensiones en el plano del material [64].

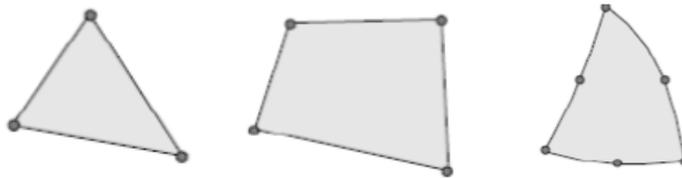


Figura 1.29 Elemento dimensional de tres o mas nodos [65].

✓ Elemento tipo Shell

Los elementos tipo Shell se modelan en términos de su plano medio de la superficie en lugar del volumen completo (ver Figura 1.30), es decir se desprecia su espesor debido a que las tensiones en dirección al espesor son insignificantes; lo que puede ser específicamente útil para mejorar la precisión de los cálculos [64].

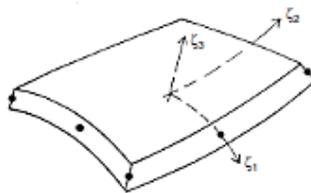


Figura 1.30 Elemento tipo Shell [64].

✓ Elemento tridimensional

Normalmente este tipo de elementos representa sólidos (ver Figura 1.31), tienden a utilizarse cuando el compuesto es muy grueso y la geometría es más sólida que la de una placa o cuando hay un campo de tensiones 3D en el material [64].

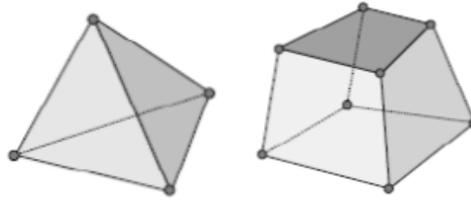


Figura 1.31 Elemento tridimensional [65].

Se sugiere utilizar el método de elementos finitos (FEM) del tipo de análisis estático no lineal, para predecir el comportamiento de carga – deflexión y la distribución de la deformación a lo largo de la longitud de la placa adherida con (CFRP) para investigar la unión entre ellas [66].

Al ejecutar la simulación se debe tomar en cuenta las propiedades no lineales del material, además de las condiciones como las de contorno de traslación del modelo, la simetría, la carga aplicada a través de incrementos de desplazamiento, (ver figura 1.32) estos desplazamientos deben ser uniformes a lo largo de los bordes a la placa de acero con reforzamiento [66].

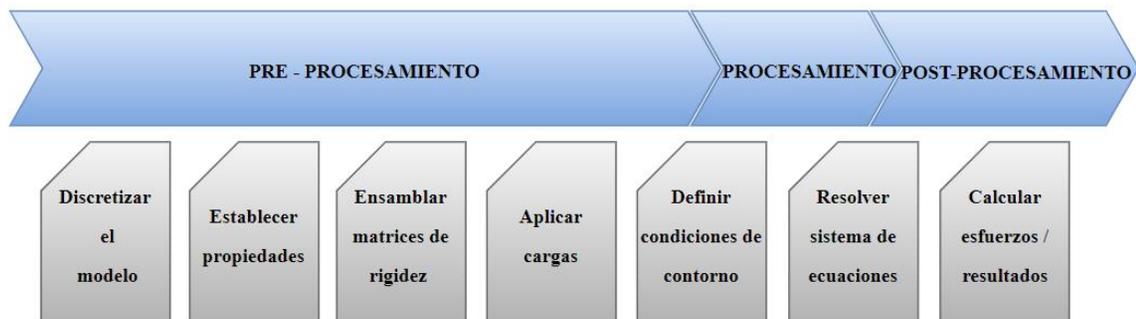


Figura 1.32 Fases del análisis por elementos finitos [65].

1.1.16 Herramientas para la validación de hipótesis

Según [5], es fundamental la estadística descriptiva debido a su capacidad de resumir y presentar los datos de carácter experimental, lo que facilita en gran parte la comprensión y la toma de decisiones basada en los ensayos, además proporciona datos como tendencia central que viene a ser el promedio, además de las medidas de dispersión, que vienen siendo definidas por las siguientes ecuaciones:

Desviación estándar

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum x_1^2}{n} - (\bar{x}_1)^2} \quad (8)$$

Donde:

x_1 = Variable.

\bar{x}_1 = Promedio de la variable.

n = Número de variables.

Error estándar:

$$\sigma_{x_1} = \frac{S_1}{\sqrt{n-1}} \quad (9)$$

Diferencia del error estándar:

$$\sigma_{\text{dif}} = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2} \quad (10)$$

Valor t calculado:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_{\text{dif}}} \quad (11)$$

Grados de libertad:

$$gl = n_1 + n_2 - 2 \quad (12)$$

Donde:

n_1 = Número de elemento de la muestra 1.

n_2 = Número de elemento de la muestra 2.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Medir la resistencia a flexión entre el acero reforzado con fibra de carbono unidireccional.

1.2.2 Objetivos específicos

- Preparar las probetas para el ensayo de flexión de acero reforzado con fibra de carbono unidireccional.
- Aplicar el método de ensayo de flexión de tres puntos según la normativa ASTM E290-22.
- Analizar los resultados obtenidos y establecer conclusiones.

1.3 Planteamiento de la hipótesis

El incremento de resistencia a flexión depende del área de contacto influyente.

1.3.1 Variable independiente

El área de contacto

1.3.2 Variable dependiente

Resistencia a flexión

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2 Materiales

Los materiales que se utilizaron en el presente trabajo se encuentran en la Tabla 2.1 con una breve descripción de los equipos y herramientas, mientras que en los consumibles se encuentran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1 Equipos.

Equipos		
Equipo	Imagen	Descripción
Torno		Equipo perteneciente al laboratorio de Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, utilizado a una velocidad del cabezal a 2500 rpm, para la limpieza de la superficie mediante el acople de una cinta de acero.
Metrotest STH-2000/		Máquina de prueba de ensayos con capacidad de carga de 400 kN a 2000 kN con precisión de medición en la carga de: $\pm 0.5\%$.
SHIMADZU AGS-X		Máquina de prueba de ensayos con capacidad de carga de 50 kN con precisión de medición en la carga de: $\pm 0.5\%$.
Computador		Recurso utilizado durante el proyecto para la obtención y registro de datos.

Tabla 2.1 Equipos (continuación).

Equipos		
Equipo	Imagen	Descripción
Rugosímetro		Instrumento de medición encargado de cuantificar la rugosidad que presenta la superficie de las placas.
Balanza digital		Instrumento de pesaje que se utilizó para mezclar las cantidades correctas de resina.
Amoladora		Instrumento de corte en caliente que facilitará el troceado para la obtención de probetas.
Taladro		Máquina giratoria a la cual generalmente se acopla un elemento de corte (broca) sin embargo se usó una llave Allen para mezclar la resina a 500 rpm.
Esmeril		Máquina eléctrica mediante el acople de una piedra de esmeril, se eliminó las rebabas del corte en caliente del acero.
Kit de protección		Se implementó el uso de equipos de seguridad como: gafas, tapones de oídos, guantes, mascarilla, mandil y zapatos punta de acero.

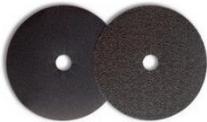
Tabla 2.2 Herramientas.

Herramientas		
Herramienta	Imagen	Descripción
Flexómetro		Herramienta de medida que ayudó a trazar longitudes.
Torquímetro de aguja		Herramienta que se encargó de medir la presión calculada para el área de contacto de las probetas reforzadas
Cutter		Herramienta de corte para mayor precisión.

Tabla 2.2 Herramientas (continuación).

Herramienta		
Herramienta	Imagen	Descripción
Dado		Herramienta ocupada para ajustar las prensas en C con la ayuda del torquímetro.
Disco de cerdas de acero		Herramienta de 110 mm de diámetro, con 23 mm de ancho, ocupada para el desbaste del área de contacto donde se pegó la platina de fibra de carbono.
Adaptador de disco de cerdas de acero		Herramienta de aluminio que se usó para el acople del disco de cerdas de acero mediante un elemento de transmisión de movimiento, generando una velocidad máxima de 4000 r.p.m.
Escuadra		Instrumento utilizado para realizar trazos a 90°.
Llave Allen		Herramienta conectada al taladro para mezclar los componentes Ay B de resina, con la finalidad de incluir la menor cantidad de aire posible.
Prensa en C		Permite unir dos piezas o más en el centro de la cavidad formada.
Cavidad formada		Aquí se controló el espesor indicado.
Espátula		Este elemento se utilizó para la aplicación de la resina en la probeta previamente preparada.
Tornillo de banco o entenalla		Sistema de mordazas empleada para mantener fijos los materiales previos al corte en caliente.
Recipientes plásticos		Se utilizó para mezclar los componentes Ay B de resina.

Tabla 2.3 Consumibles.

Consumibles		
Consumible	Imagen	Descripción
Patinas de Acero A36 de 50x10 mm		Las propiedades de este material se muestran en la tabla 2.4.
Resina		Se utilizó por sus propiedades de adhesión en una combinación de dos componentes, con bases en resina epóxica como tixotrópicos y filler especial caracterizados por tener una tonalidad blanca y negra respectivamente en la tabla 2.5.
Fibra de carbono		La fibra de carbono unidireccional que se utilizó consiste en 30% resina y 70% fibra de carbono. Las propiedades mecánicas de la fibra de carbono se muestran en la Tabla 2.7.
Thinner		Disolvente líquido para limpiar o desengrasar la probeta.
Disco abrasivo de corte		Diseñado para cortar diferentes materiales, asegurando su correcta fijación.
Lija N150		Utilizado para pulir y limpiar el metal.
Cinta adhesiva		Material adhesivo colocado en la probeta para su previa identificación.
Paños		Material utilizado para limpiar las probetas.
Guaípe		Utilizado para limpiar el excedente de resina y colocación de esta.

2.1.1 Propiedades de los materiales

A continuación, se presentan las propiedades de los materiales usados en la elaboración del trabajo con el fin de obtener las variables que dan como resultado la reproducción del ensayo experimental con materiales disponibles de refuerzo en el país.

- Acero ASTM A-36

Denominación establecida por la ASTM, esta es una aleación de hierro con un porcentaje del 98%, con contenidos máximos de carbono de 0.29% adicionalmente de cantidades menores de minerales como azufre, fósforo que mejora tanto su soldabilidad al igual que su resistencia a la intemperie y manganeso que mejora su resistencia, material de tipo estructural más usado en construcción de estructuras como puentes, edificios y estructuras atornilladas y/o soldadas debido a su abundancia, fácil ensamblaje y precio accesible [67].

Tabla 2.4 Propiedades del acero ASTM A-36 [67].

	Propiedades mecánicas				
Material	Módulo De Elasticidad	Relación De Poisson	Límite de Fluencia	Resistencia Máxima a la tracción	Falla ante la deformación plástica
	[GPa]	-	[MPa]	[MPa]	-
	200	0.3	250	400	0.23
	Composición química [%]				
	Carbono	Manganeso	Silicio	Fósforo	Azufre
	C	Mn	Si	P	S
ASTM A-36	0.25-0.29	0.6-1.2	0.15-0.4	0.04	0.05

- Adhesivo epoxi

Es un adhesivo estructural tixotrópico de alta resistencia, mostrado en la ficha técnica de Sika [68], resultante de la mezcla de dos componentes; la base denominada compuesto A, conjuntamente de un endurecedor denominado B que es colocado luego de la

preparación de la superficie sea este en materiales de construcción como hormigón, mampostería, madera, incluso placas de acero.

Es necesario un control de mezclado de los componentes A y B para obtener altas resistencias mecánicas, a la abrasión y a impactos, siendo diseñada a temperaturas de soporte de 8 °C a 35 °C con una relación de porción de mezcla de 3:1 en peso o volumen, considerando que el tiempo de vida de mezcla va en función de la temperatura ambiente, eso quiere decir que mientras mayor cantidad se mezcle más corto es el tiempo de vida de mezcla, los fabricantes recomiendan dividir las porciones del adhesivo [68].

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas de la resina epóxica [3].

Material	Módulo de Elasticidad	Relación de Poisson	Módulo de corte	Contracción
	[GPa]	-	[GPa]	%
Resina epóxica	3.78	0.35	1.4	0.04

Además de establecer información técnica el fabricante detalla la resistencia a compresión tomando en cuenta el tiempo de curado, sin embargo, estos valores pueden variar dependiendo de la intensidad del mezclado y la inclusión de aire durante el mismo [68].

Tabla 2.6 Resistencia a compresión según EN 196 [68].

Resistencia a compresión		
Tiempo de curado	10 °C	35 °C
12 horas	-	~85 N/mm ²
1 día	~55 N/mm ²	~90 N/mm ²
3 días	~70 N/mm ²	~90 N/mm ²
7 días	~75 N/mm ²	~90 N/mm ²

- Fibra de carbono Unidireccional

Tabla 2.7 Propiedades mecánicas de la fibra de carbono [3].

Material	Módulo de Elasticidad	Relación de Poisson	Módulo de corte
	[GPa]	-	[GPa]
E 230	230	0.23	9

2.2 Método

2.2.1 Tipo de investigación

✓ Experimental

En este trabajo se utilizará el método experimental, debido a que en el ensayo se ejecutará mediante una prensa hidráulica donde se aplicará carga en forma sostenida en función de lecturas de la flexión provocada en la probeta, tomando como referencia de carga de diseño obtenida por un modelo de elementos finitos, la que provoca la deflexión correspondiente. Se buscará alcanzar la carga última; mediante el uso de deformómetros en el procedimiento anterior se medirá la deflexión máxima de las probetas y su comportamiento a flexión.

✓ Descriptivo

Desde el punto de vista experimental el método descriptivo es concluyente debido a que se puntualizará las características de las probetas a ensayar, recopilando información útil permitiendo una mayor precisión en la medición de deflexión en relación con las probetas no reforzadas.

✓ Cuantitativo

No obstante, mediante el uso de variables se recopilará datos cuantificables obtenidos en los ensayos con fines estadísticos para determinar el comportamiento de las probetas reforzadas frente a las probetas no reforzadas.

2.2.2 Población y muestra

Muestra

Se utilizó un método experimental para determinar el comportamiento del acero reforzado con fibra de carbono unidireccional, sin embargo, primero se determinó las propiedades compresivas de la resina, la norma ASTM D695 cubre este método de ensayo al considerarlo como un plástico rígido reforzado, en consecuencia, se deben ensayar al menos 5 especímenes, estos deberán tener forma cilíndrica. Por otra parte, la norma ASTM E290-22 proporciona procedimientos de pruebas de ensayos a flexión; no obstante, esta norma no establece un número específico de probetas; por lo tanto, se considera ensayar 30 probetas de 10 mm de espesor, en tres diferentes dimensiones de 790, 640 y 490 mm respectivamente, de las cuales 15 de ellas no contarán con reforzamiento como se muestra en la Tabla 2.8 se especifica su respectiva combinación.

Tabla 2.8 Especificación del número de probetas.

	Combinación			Número de probetas
	Material	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	ASTM D695
1	Sikadur 30 componente A y B	24.5	Ø 12.7	5
	Material	Longitud [mm]	Espesor [mm]	ASTM E290-22
2	Acero A36 y fibra de carbono U	490	10	5
	Acero A36	490	10	5
3	Acero A36 y fibra de carbono U	640	10	5
	Acero A36	640	10	5
4	Acero A36 y fibra de carbono U	790	10	5
	Acero A36	790	10	5
Total				35

2.2.3 Operacionalización de variables

Variable independiente

Tabla 2.9 Variable independiente.

Conceptualización	Categoría	Indicadores	Índice	Técnicas e instrumentación
Mediante la ayuda de un rugosímetro se verificará la incidencia que tiene la rugosidad en una determinada área de contacto que presenta una superficie previamente preparada.	Calidad de área de contacto	Tratamiento superficial	Limpieza con disco de cerdas de acero	Bibliografía Fichas técnicas Norma ASTM E290-22 Rugosímetro Mitutoyo

2.2.4 Recolección de información

La recolección de información se detalla mediante el diagrama mostrado en la Figura 2.1

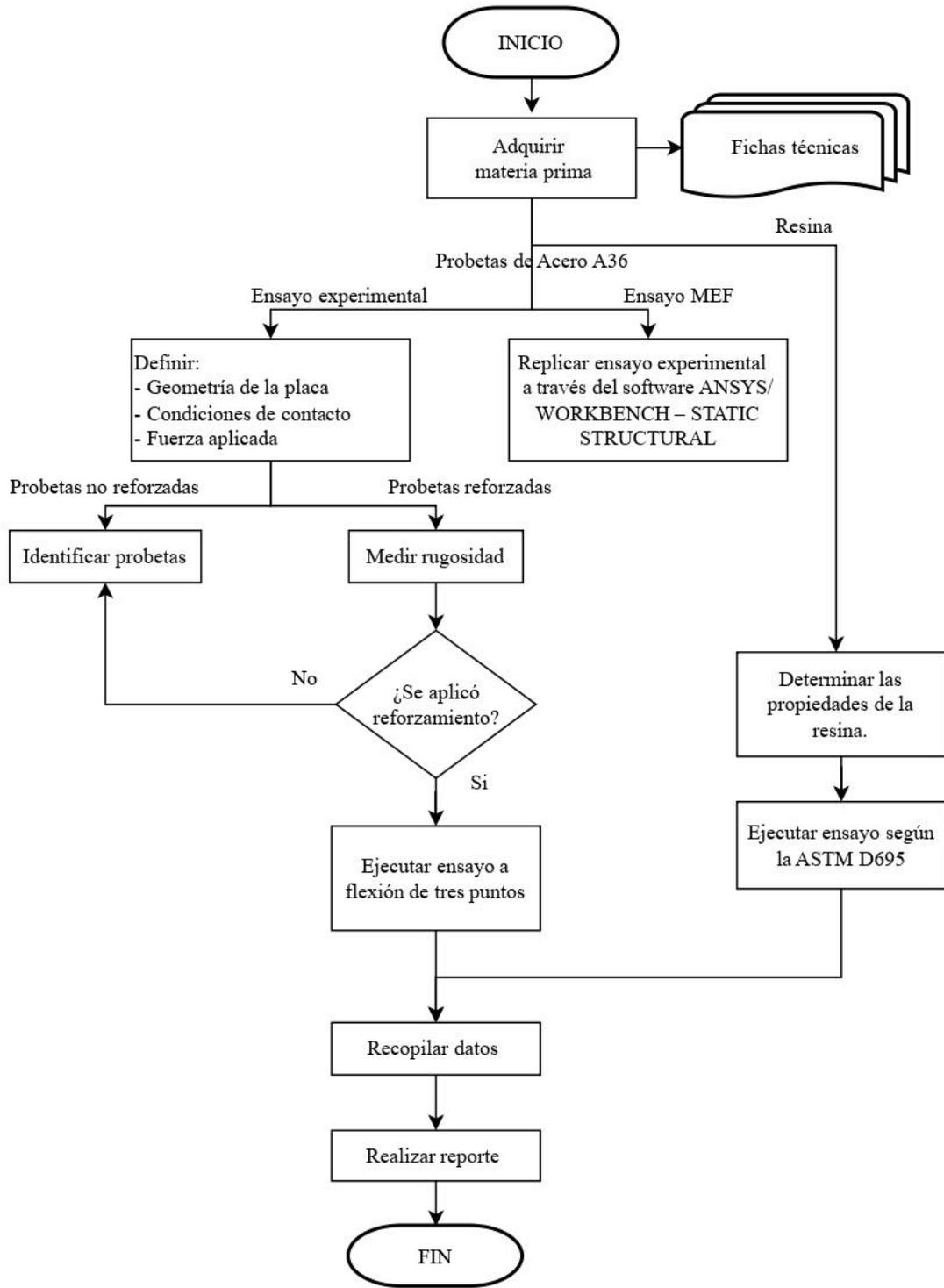


Figura 2.1 Diagrama de recolección de información.

2.2.5 Proceso para el ensayo

Previo a evaluar el comportamiento de las probetas de acero reforzadas y no reforzadas, se determinará la resistencia compresiva del adhesivo Sikadur-30 por medio de la normativa ASTM D695 que cubre un método de ensayo estándar empleado para determinar las propiedades mecánicas de plásticos rígidos reforzados y no reforzados, mediante probetas preparadas por moldeo a inyección del material que deberán tener forma cilíndrica, como se observa en la Figura 2.2, procurando obtener superficies lisas, además, especifica que se deberán ensayar al menos 5 probetas mediante una máquina de ensayos a compresión aplicando una velocidad de 1.3 mm/min donde se registrará la carga máxima soportada por la probeta, normalmente esta se produce cuando se genera la ruptura [69].

El informe contendrá la siguiente información:

1. Identificación completa del material ensayado, incluido el tipo, fuente, número de código del fabricante, forma, dimensiones principales, historial previo etc.
2. Método de preparación de muestras de ensayo,
3. Tipo de muestra de ensayo y dimensiones,
4. Procedimiento de acondicionamiento utilizado,
5. Condiciones atmosféricas en la sala de ensayo,
6. Número de muestras ensayadas,
7. Velocidad de ensayo,
8. Resistencia a la compresión, valor medio y desviación estándar,
9. Límite elástico de compresión y límite elástico compensado valor promedio y desviación estándar,
10. Módulo de elasticidad, valor promedio, desviación estándar,
11. Fecha de prueba

El ensayo que describe la normativa ASTM E290-22 proporciona métodos de ensayos a flexión para determinar la ductilidad de materiales metálicos, se incluyen cuatro

métodos de los cuales se usará el de curvatura guiada, conocida también como ensayo a flexión de tres puntos, este se lo realiza apoyando la probeta cerca de cada extremo sobre rodillos de dimensiones definidas para forzar aplicando una fuerza a través de un émbolo en la mitad de la longitud de la probeta entre dos soportes separados por un espacio definido, además de determinar la ubicación y restricciones, menciona el acabado superficial, de modo que el objetivo de esta prueba es determinar las propiedades mecánicas como la resistencia a flexión, la deformación y el módulo de elasticidad y establece los criterios de aceptación para la calidad de los resultados [70].

Para el respectivo ensayo se fabricó 30 probetas, de las cuales 15 no tienen reforzamiento con el fin de analizar el incremento de resistencia, se colocará la probeta sobre dos soportes redondos separados por una holgura. Donde mediante una máquina de ensayo se aplicará una fuerza hasta que ocurra la falla con una velocidad de 20mm/min, en cuanto al sentido la norma no establece un valor numérico específico para la resistencia a flexión sugiere incluir registros de la carga aplicada, cabe mencionar que perturbaciones en la superficie que se generan durante la prueba de flexión; como piel de naranja, donde no hay penetración no se consideran falla por grieta [70].

Acorde a la referencia la norma propone realizar un informe con la siguiente información:

1. Identificación del espécimen,
2. Tamaño y tipo de espécimen,
3. Tipo de ensayo,
4. Carga aplicada,
5. Radio utilizado para formar la curva,
6. Número y tamaño de las grietas visibles en la curva,
7. Si la probeta cumple o no los requisitos.

2.2.6 Dimensionamiento de probetas

Los tamaños de probetas establecidos por la normativa D695 (ver Figura 2.2) deben tener forma de prisma o en su defecto la de un cilindro recto cuya longitud sea el doble de su ancho o diámetro principal. [69]

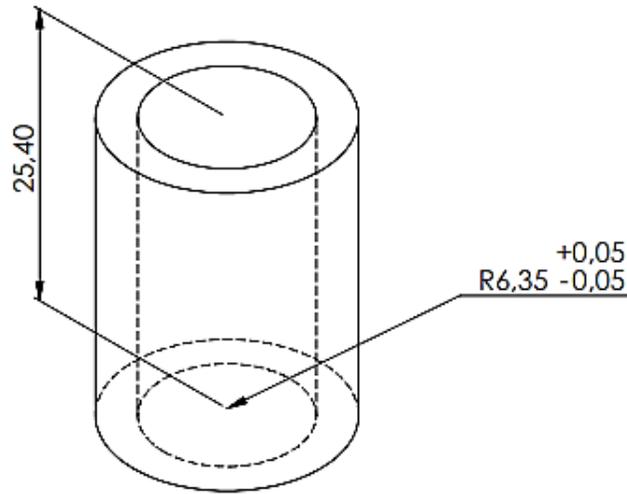


Figura 2.2 Dimensionamiento del molde para la resina.

La norma ASTM E290-22 determina el dimensionamiento entre apoyos (ver Figura 2.3) no obstante, solo se hará uso del procedimiento para determinar las propiedades a flexión debido a que este es un análisis no lineal, donde se determinará la influencia que tiene el área de contacto en el incremento de resistencia.

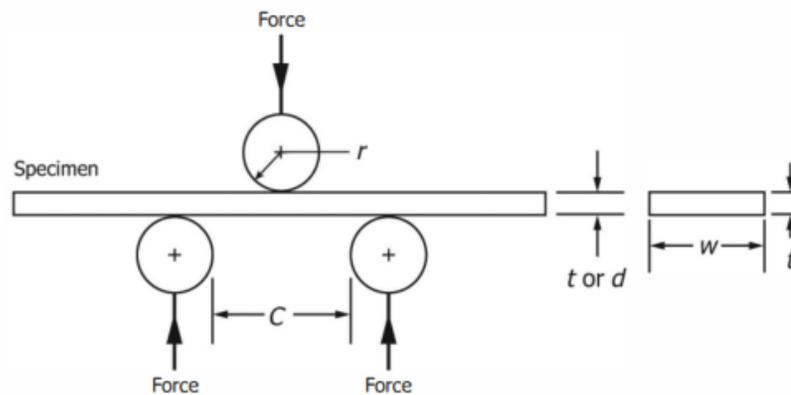


Figura 2.3 Configuración para el tipo de ensayo a flexión de tres puntos [70].

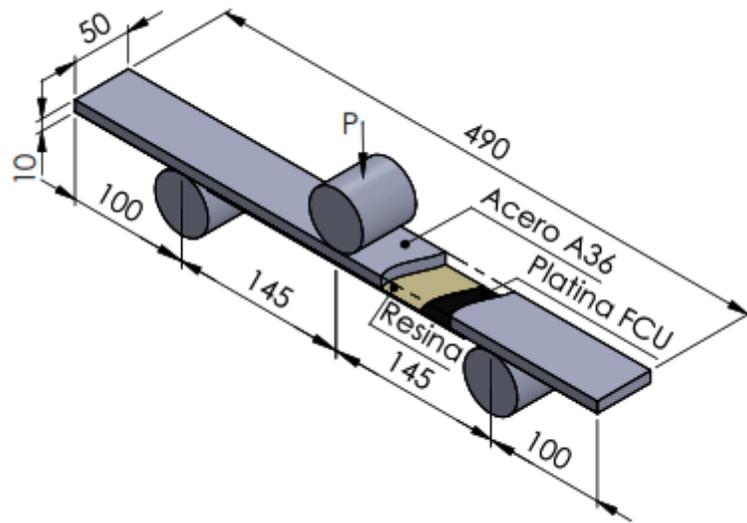


Figura 2.4 Configuración para las probetas de acero reforzado de 490 mm.

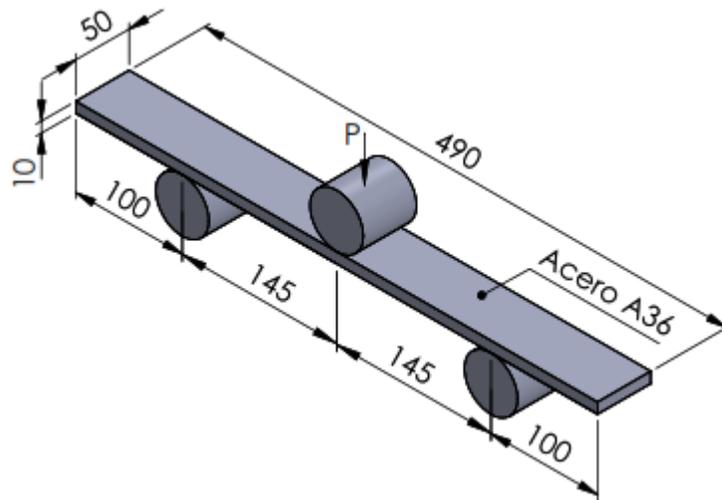


Figura 2.5 Configuración para las probetas de acero de 490 mm.

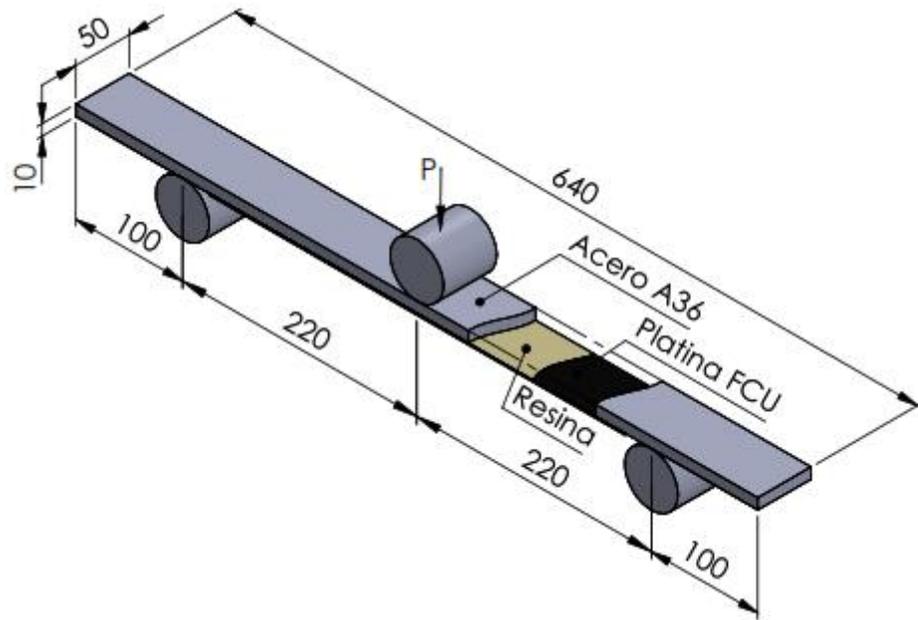


Figura 2.6 Configuración para las probetas de acero reforzado de 640 mm.

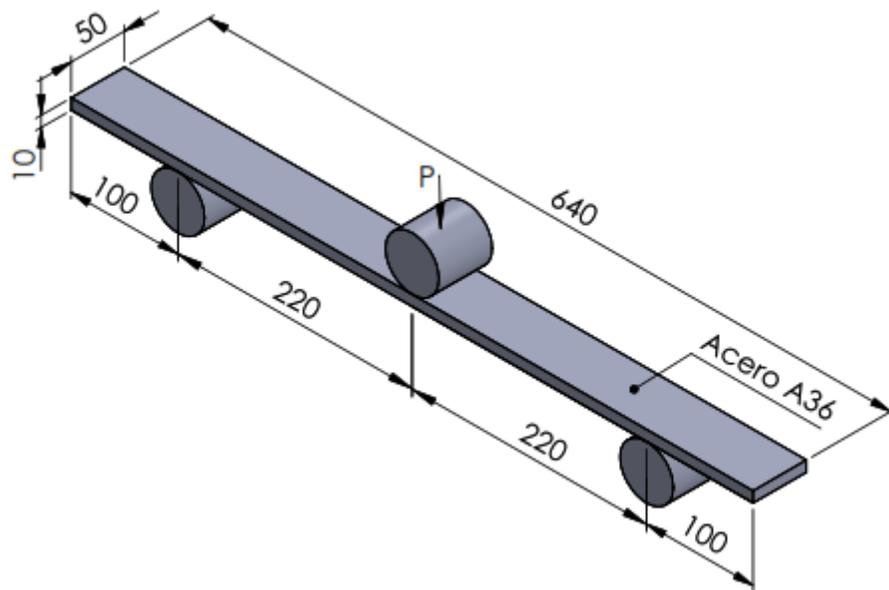


Figura 2.7 Configuración para las probetas de acero de 640 mm.

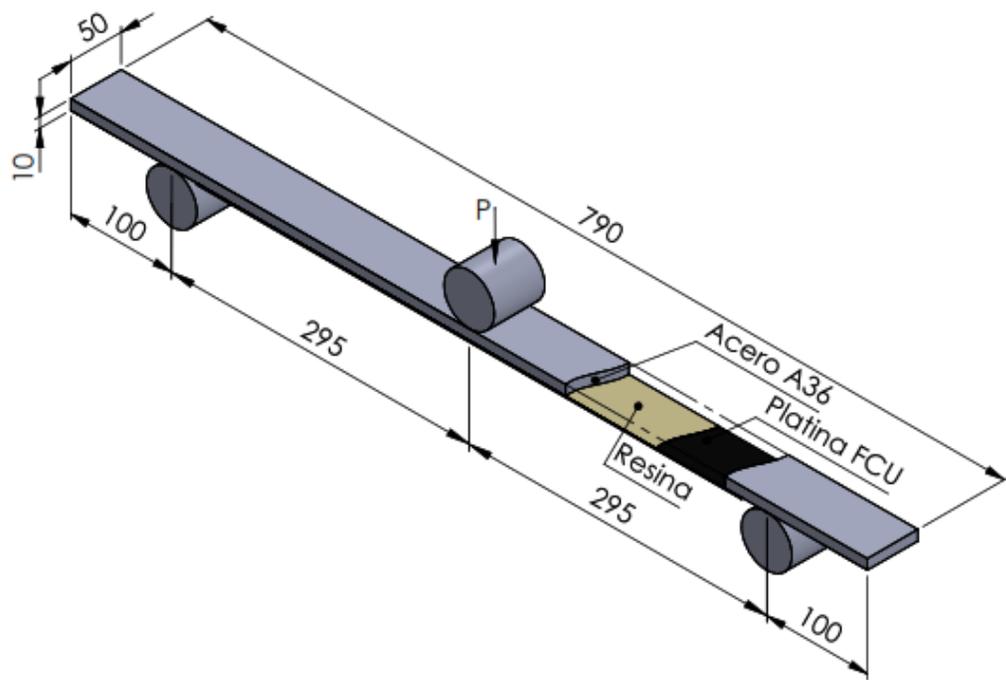


Figura 2.8 Configuración para las probetas de acero reforzado de 790 mm.

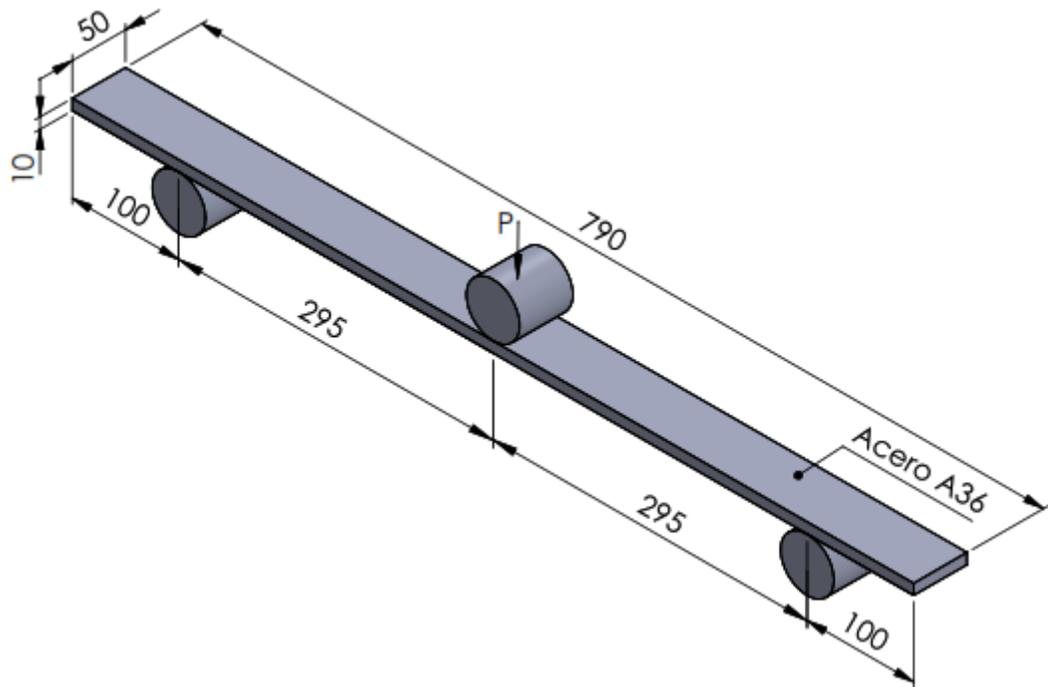


Figura 2.9 Configuración para las probetas de acero de 790 mm.

2.2.7 Determinación de la presión

Al ser una alternativa del proceso de limpieza sandblasting, estudios posteriores como en [4] recomiendan la presión de 0.374 kgf/cm^2 que debe ser ejercida para la unión entre superficies, tras generar rugosidad en el área de contacto.

Para ejercer el torque en el área donde previamente se aplicó el proceso de limpieza y posteriormente se aplicó la resina, es indispensable el uso de un torquímetro de aguja para determinar la fuerza mediante la Ecuación 13.

$$F = \frac{P}{A} \quad (13)$$

Donde:

F= Fuerza necesaria para generar torque [N]

P= Presión [kgf/cm^2]

A= Área de contacto [cm^2]

Al tener 3 grupos de probetas y estas al ser de diferentes dimensiones, obtendremos distintas áreas de contacto A_1 A_2 y A_3 respectivamente, mediante la Ecuación 14.

$$A = B \times H \quad (14)$$

Donde:

B= Base [cm]

H= altura [cm]

$$A_1 = 27[\text{cm}] \times 5[\text{cm}]$$

$$A_1 = 135 [\text{cm}^2]$$

$$A_2 = 42[\text{cm}] \times 5[\text{cm}]$$

$$A_2 = 210 [\text{cm}^2]$$

$$A_3 = 57[\text{cm}] \times 5[\text{cm}]$$

$$A_3 = 285 [\text{cm}^2]$$

Luego despejamos la fuerza P de la Ecuación 13 y la multiplicamos por el valor de aceleración de la gravedad para obtener resultados en Newtons:

$$P_1 = 0.374 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \times 135 [\text{cm}^2]$$

$$P_1 = 50.49 \text{ kgf} \times 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$P_1 = 495.307 [\text{N}]$$

$$P_2 = 0.374 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \times 210 [\text{cm}^2]$$

$$P_2 = 70.54 \text{ kgf} \times 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$P_2 = 770.477 [\text{N}]$$

$$P_3 = 0.374 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] \times 285 [\text{cm}^2]$$

$$P_3 = 106.59 \text{ kgf} \times 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$P_3 = 1045.648 [\text{N}]$$

El torque necesario se lo puede calcular mediante la Ecuación 15, considerando la longitud del torquímetro de 40 cm.

$$T = Fxd \quad (15)$$

Donde:

d = distancia del mango del torquímetro [m]

Para distribuir la presión aplicada se dividirá para el número de prensas usadas en la elaboración de las probetas.

$$T_1 = 495.307 \text{ [N]} \times 0.4 \text{ [m]}$$

$$T_1 = \frac{198.123}{3 \text{ prensas}}$$

$$T_1 = 66.041 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$T_2 = 770.477 \text{ [N]} \times 0.4 \text{ [m]}$$

$$T_2 = \frac{308.191}{5 \text{ prensas}}$$

$$T_2 = 61.638 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$T_3 = 1045.648 \text{ [N]} \times 0.4 \text{ [m]}$$

$$T_3 = \frac{418.259}{7 \text{ prensas}}$$

$$T_3 = 59.751 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

2.2.8 Identificación de probetas

El análisis preciso de los resultados requiere que todas las muestras analizadas tengan un código específico para una fácil identificación. Las codificaciones utilizadas en este proyecto se describen en la Tabla 2.10 a continuación:

- Para el adhesivo

AB

A: Denominación “A” para identificar el adhesivo.

B: Denominación para identificar el número de probeta previa a ensayar.

- Para las probetas reforzadas

CCC_DD_EF

CCC: Denominación “CRF” para identificar si el acero estructural lleva refuerzo de fibra de carbono Y “SRF” respectivamente, si no contiene reforzamiento.

DDD: Denominación “790, 640 Y 490” para identificar la dimensión de probeta.

EF: denominación “EF” para identificar el ensayo con elementos finitos, mientras que para los ensayos experimentales esta denominación establece el número de probeta.

Tabla 2.10 Identificación de probetas.

Probeta	Descripción	Tipo de flexión
A1	Fabricada en molde	Ensayo experimental
A2	Fabricada en molde	Ensayo experimental
A3	Fabricada en molde	Ensayo experimental
A4	Fabricada en molde	Ensayo experimental
A5	Fabricada en molde	Ensayo experimental
SRF_490_01	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_490_02	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_490_03	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_490_04	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_490_05	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_490_EF	Probeta reforzada	Ensayo con elementos finitos
CRF_490_01	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_490_02	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_490_03	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_490_04	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_490_05	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_490_EF	Probeta sin reforzamiento	Ensayo con elementos finitos
SRF_640_01	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_640_02	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_640_03	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_640_04	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_640_05	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_640_EF	Probeta reforzada	Ensayo con elementos finitos
CRF_640_01	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_640_02	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_640_03	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_640_04	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_640_05	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_640_EF	Probeta sin reforzamiento	Ensayo con elementos finitos
SRF_790_01	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_790_02	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_790_03	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_790_04	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_790_05	Probeta reforzada	Ensayo experimental
SRF_790_EF	Probeta reforzada	Ensayo con elementos finitos
CRF_790_01	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_790_02	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_790_03	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_790_04	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_790_05	Probeta sin reforzamiento	Ensayo experimental
CRF_790_EF	Probeta sin reforzamiento	Ensayo con elementos finitos

2.2.9 Preparación de probetas

En el siguiente diagrama de flujo (ver Figura 2.10) se encuentra el procedimiento para la elaboración de probetas reforzadas y no reforzadas.

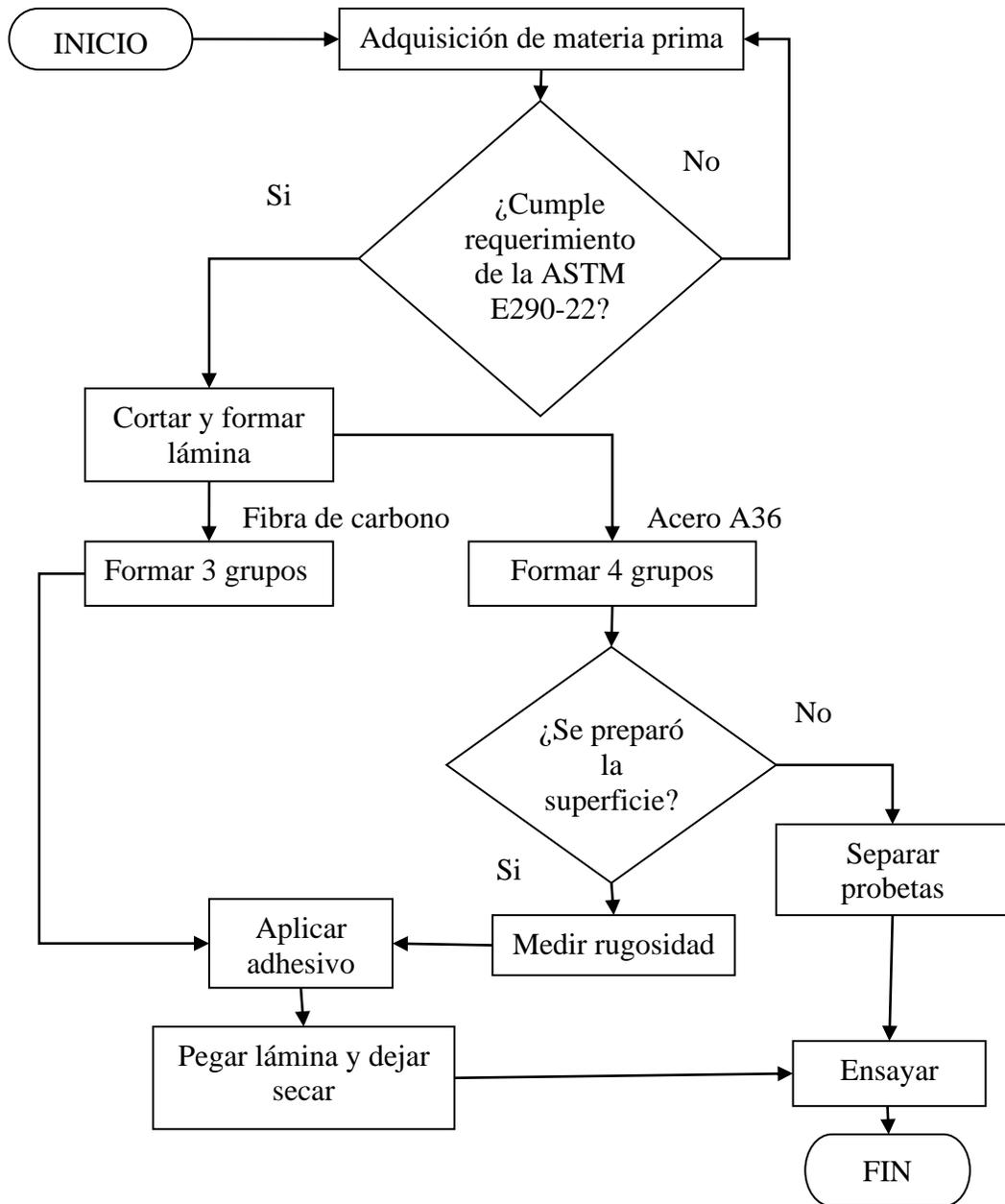


Figura 2.10 Diagrama de flujo de elaboración de probetas.

2.2.9.1 Proceso de preparación de probetas

El procedimiento de preparación de probetas depende del ensayo a realizar, como se muestra en las Tabla 2.11, 2.12, los respectivos ensayos de compresión y flexión:

- Ensayo a compresión

Tabla 2.11 Procedimiento de preparación en probetas de resina.

Paso
<p>1. Fijar en la entenalla el tubo circular de 1/2 in [12.7 mm] para realizar 5 cortes a 25.7 mm de distancia, para usarlo de molde para la resina.</p> 
<p>2. Eliminar excesos o rebabas de corte; en el caso del acero hacemos uso de un esmeril para desbastar los filos hasta obtener una superficie plana.</p> 
<p>3. Eliminar mediante el uso de lija las rugosidades internas del tubo y limpiamos con guaípe.</p> 

Tabla 2.11 Procedimiento de preparación en probetas de resina (continuación).

4. Aplicar aceite, en este caso se usó aceite quemado de automóvil, para evitar problemas al momento de desmoldar, luego con silicón caliente se fijó los tubos en una superficie de vidrio para facilidad de desmolde.



5. Remover los componentes individualmente de resina para obtener una mezcla homogénea.



6. Pesar los componentes para la mezcla en porción 3:1 de resina.

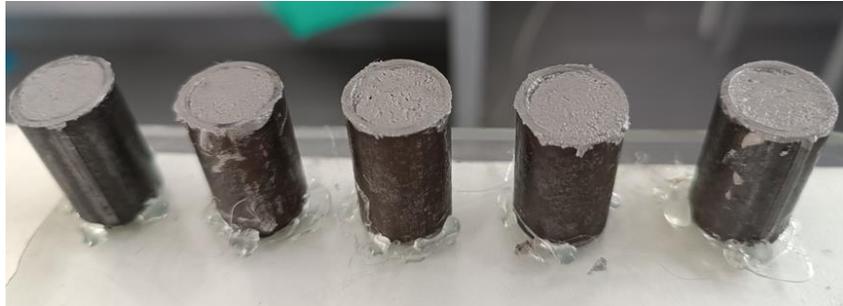


Tabla 2.11 Procedimiento de preparación en probetas de resina (continuación).

7. Mezclar durante 3 minutos las porciones de mezcla para la preparación de resina con un taladro de bajas revoluciones hasta reducir inclusiones de aire.



8. Aplicar la mezcla de componentes de resina en los moldes y dejar curar un tiempo estimado de 72h según el fabricante, para analizar las propiedades compresivas al cumplir este periodo.



9. Lijar las imperfecciones presentes tratando de eliminar cualquier rasgo de poro, debido a que la inclusión de aire presente en la probeta influye en los resultados obtenidos.



Tabla 2.11 Procedimiento de preparación en probetas de resina (continuación).

10. Etiquetar probeta; la codificación de las probetas de resina se encuentra en la Tabla 2.10



11. Realizar ensayo a compresión una vez calibrada la máquina y establecido los parámetros de ejecución de ensayo según la norma ASTM D695.



- Ensayo a flexión 3 puntos

Tabla 2.12 Proceso de conformado de probetas CRF y SRF.

Paso
<p>1. Medir la distancia establecida para el acero A36 y marcarla en tres dimensiones de 490, 640 y 790 mm respectivamente, en el caso de la fibra de carbono unidireccional la distancia será de 270, 420 y 570 mm.</p> 
<p>2. Fijar a una mesa de trabajo el material a cortar, seguidamente mediante el uso de una escuadra trazamos una línea guía de corte.</p> 
<p>3. Previo al equipamiento de EPP, mediante el uso de una amoladora, realizar un corte limpio y recto por la línea guía trazada anteriormente.</p> 

Tabla 2.12 Proceso de conformado de probetas CRF y SRF (continuación).

4. Eliminar excesos o rebabas de corte; en el caso del acero hacemos uso de un esmeril para desbastar los filos hasta obtener una superficie plana, para el caso de la fibra se utilizó una lija.



5. Etiquetar probetas, se aplicó cinta adhesiva y se anotó la codificación establecida según la Tabla 2.10.



6. Implementar herramientas como; el adaptador del cepillo abrasivo, que va acoplado al eje de plato de garras y una varilla soldada, conectada al portaherramientas de forma que simule una barra de aceleración.



Tabla 2.12 Proceso de conformado de probetas CRF y SRF (continuación).

7. Encender el torno y ajustar la velocidad del ralentí a 2300 RPM gradualmente para evitar atascos con la barra aceleradora, debido a que es un método convencional pero funcional de limpieza mediante el acople de una cinta abrasiva.



8. Emparejar el rugosímetro a la PC mediante un cable USB para posteriormente exportar los resultados a una hoja digital y calibrar el instrumento de medición de rugosidad.



9. Medir rugosidad, ubicando las probetas en una superficie plana, para evitar fallos en la medición, además para la toma de datos se consideró ubicar al rugosímetro en diferentes posiciones.



Tabla 2.12 Proceso de conformado de probetas CRF y SRF (continuación).

10. Remover los componentes individualmente de resina para obtener una mezcla homogénea.



11. Pesar los componentes para la mezcla en porción 3:1 de resina.



12. Mezclar durante 3 minutos las porciones de mezcla para la preparación de resina con un taladro de bajas revoluciones hasta reducir inclusiones de aire.



Tabla 2.12 Proceso de conformado de probetas CRF y SRF (continuación).

13. Aplicar thinner (diluyente) en guaipe y limpiar las superficies de acero y fibra de carbono.



14. Aplicar la resina con la ayuda de una espátula.



15. Remover excedente por medio de la cavidad formada, procurando dejar una capa aproximadamente de 2 mm de espesor.



Tabla 2.12 Proceso de conformado de probetas CRF y SRF (continuación).

16. Unimos la superficie previamente añadida la resina a la superficie lijada de la fibra y realizamos presión para que la resina llegue a toda el área de contacto.



17. Ajustar la probeta mediante la prensa manual, adicionalmente se usó separadores de papel para evitar contaminaciones no deseadas.

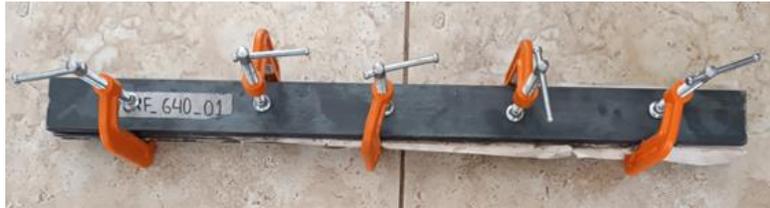


18. Comprobar el ajuste calculado mediante el uso de un torquímetro de aguja en una superficie plana.



Tabla 2.12 Proceso de conformado de probetas CRF y SRF (continuación).

19. Retirar el excedente de resina que gotea por los lados al momento de aplicar la presión y dejar curar 72 horas, tiempo recomendado por el fabricante.



20. Ensayar por grupos de 5 probetas, primero las que no contenga reforzamiento, seguidamente de las probetas reforzadas en las mismas dimensiones.



2.2.10 Proceso de simulación en elementos finitos

Tabla 2.13 Procedimiento de réplica de ensayo experimental.

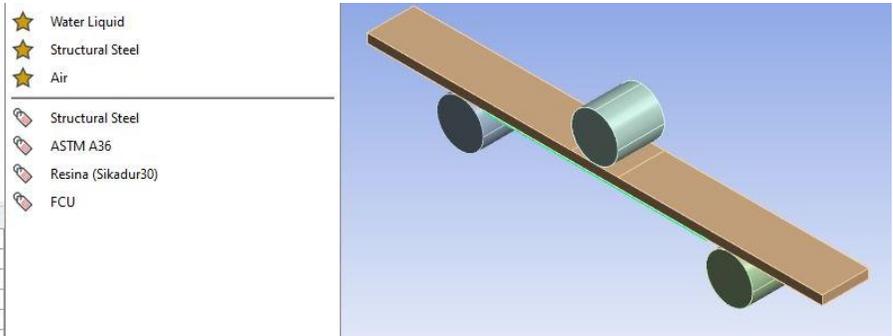
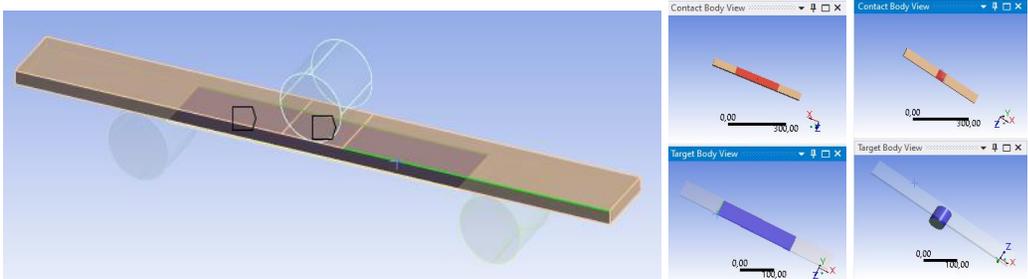
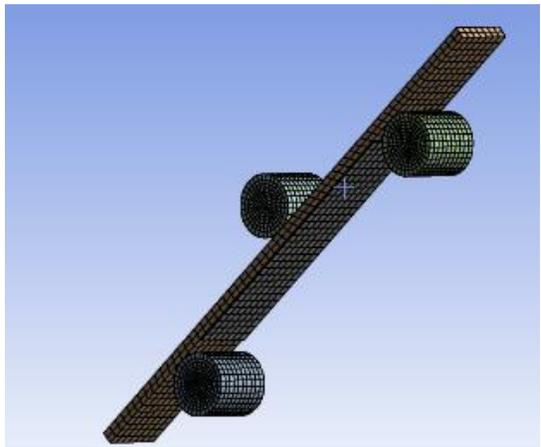
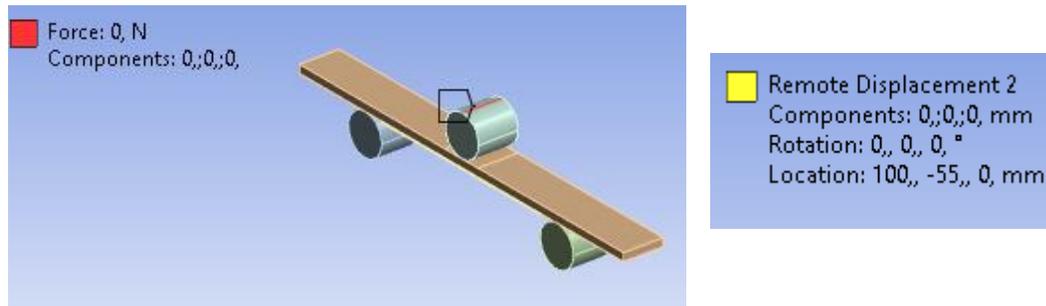
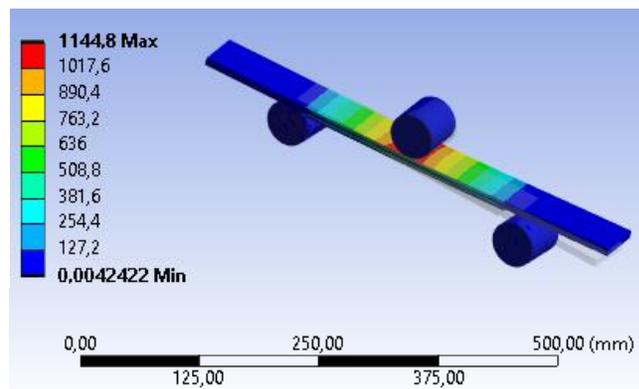
Pasos																			
<p>1. Importar geometría de extensión .step, seguidamente definir materiales.</p>																			
<p>2. Asignación de contactos, de contactos, previamente eliminamos los contactos generados de forma automática, para el presente estudio se utilizará desplazamiento remoto para los apoyos y fuerza con una componente para tabular e ingresar el dato de fuerza.</p>																			
<p>3. Mallado.</p>	 <table border="1" data-bbox="966 1533 1404 1785"> <thead> <tr> <th colspan="2">Details of "Mesh"</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Error Limits</td> <td>Aggressive Mechanical</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Target Element Quality</td> <td>5,e-002</td> </tr> <tr> <td>Smoothing</td> <td>Medium</td> </tr> <tr> <td>Mesh Metric</td> <td>Element Quality</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Min</td> <td>4,343e-002</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Max</td> <td>0,99991</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Average</td> <td>0,75782</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/> Standard Deviation</td> <td>0,29599</td> </tr> </tbody> </table>	Details of "Mesh"		Error Limits	Aggressive Mechanical	<input type="checkbox"/> Target Element Quality	5,e-002	Smoothing	Medium	Mesh Metric	Element Quality	<input type="checkbox"/> Min	4,343e-002	<input type="checkbox"/> Max	0,99991	<input type="checkbox"/> Average	0,75782	<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,29599
Details of "Mesh"																			
Error Limits	Aggressive Mechanical																		
<input type="checkbox"/> Target Element Quality	5,e-002																		
Smoothing	Medium																		
Mesh Metric	Element Quality																		
<input type="checkbox"/> Min	4,343e-002																		
<input type="checkbox"/> Max	0,99991																		
<input type="checkbox"/> Average	0,75782																		
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,29599																		

Tabla 2.13 Procedimiento de réplica de ensayo experimental (continuación).

4. Asignación de condiciones de simulación; restringir el desplazamiento en los rodillos como también parametrizar la fuerza para obtener datos.



5. Obtención de resultados.



CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

3.1.1 Resultados del ensayo a compresión de la resina SIKADUR-30

La siguiente ficha técnica contiene un reporte general de los datos y resultados generados al realizar en ensayo a compresión según la ASTM D695.

Tabla 3.1 Reporte de ensayos a compresión.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A COMPRESIÓN					
DATOS DE ENSAYO A COMPRESIÓN							
Fecha de inicio:		15/06/2023		Fecha de finalización:		15/06/2023	
Ciudad:		Ambato		Codificación:		A	
Laboratorio:		Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero					
Norma:		ASTM D 695		N° de probetas:		5	
Máquina:		Máquina de ensayo universal Shimadzu serie AGS-X					
Velocidad de carga:		1.3 mm/min		Precarga:		2 kN	
Matriz:		Resina epóxica		Refuerzo:		N/A	
Fracción volumétrica:		Comp. A; Comp B. 3:1 en peso		Orientación de las partículas:		Aleatoria	
Dimensiones:		Ø12,7 x 25,4 mm		Estratificación:		Compresión	
Temperatura:		21.8 °C		Humedad relativa:		58.3	
Resultados de ensayo a compresión							
N°	Dimensiones		Fuerza Max [N]	Esfuerzo Max de compresión [MPa]	Desplazamiento Max [mm]	Deformación [%]	Módulo de elasticidad [MPa]
	Ø	Long.					
A1	12,82	25,40	10518.7	83.035	1.364	5.371	4265.93
A2	12,95	25,64	9859.47	77.831	1.543	6.074	3332.48
A3	13,30	25,71	8981.66	70.902	1.500	5.897	3784.87
A4	13,01	25,58	9834.60	77.635	1.472	5.798	4044.74
A5	12,83	24,49	10839.6	85.569	1.488	5.856	4240.83
Promedio			10006,8	78,99	1,47	5,80	3933,75
Desviación estándar			717,264	5,662	0,066	0,260	387,540
C. V.			7,168	7,168	4,488	4,488	9,852
Gráfico:							
							

Tabla 3.1 Reporte de ensayo a compresión (continuación).

GRÁFICAS																																																																															
<p>Esfuerzo máximo de compresión [MPa]</p> <table border="1"> <tr><th>Probetas</th><th>Esfuerzo [MPa]</th></tr> <tr><td>A1</td><td>83.04</td></tr> <tr><td>A2</td><td>77.83</td></tr> <tr><td>A3</td><td>70.90</td></tr> <tr><td>A4</td><td>77.64</td></tr> <tr><td>A5</td><td>85.57</td></tr> <tr><td>Promedio</td><td>78.99</td></tr> </table>	Probetas	Esfuerzo [MPa]	A1	83.04	A2	77.83	A3	70.90	A4	77.64	A5	85.57	Promedio	78.99	<p>Módulo de Elasticidad [GPa]</p> <table border="1"> <tr><th>Probeta</th><th>Módulo [GPa]</th></tr> <tr><td>A1</td><td>4265.93</td></tr> <tr><td>A2</td><td>3332.40</td></tr> <tr><td>A3</td><td>3784.87</td></tr> <tr><td>A4</td><td>4044.74</td></tr> <tr><td>A5</td><td>4240.83</td></tr> <tr><td>Promedio</td><td>3933.75</td></tr> </table>	Probeta	Módulo [GPa]	A1	4265.93	A2	3332.40	A3	3784.87	A4	4044.74	A5	4240.83	Promedio	3933.75																																																		
Probetas	Esfuerzo [MPa]																																																																														
A1	83.04																																																																														
A2	77.83																																																																														
A3	70.90																																																																														
A4	77.64																																																																														
A5	85.57																																																																														
Promedio	78.99																																																																														
Probeta	Módulo [GPa]																																																																														
A1	4265.93																																																																														
A2	3332.40																																																																														
A3	3784.87																																																																														
A4	4044.74																																																																														
A5	4240.83																																																																														
Promedio	3933.75																																																																														
<p>Deformación [%]</p> <table border="1"> <tr><th>Probeta</th><th>Deformación [%]</th></tr> <tr><td>A1</td><td>5.37</td></tr> <tr><td>A2</td><td>6.07</td></tr> <tr><td>A3</td><td>5.90</td></tr> <tr><td>A4</td><td>5.80</td></tr> <tr><td>A5</td><td>5.86</td></tr> <tr><td>Promedio</td><td>5.80</td></tr> </table>		Probeta	Deformación [%]	A1	5.37	A2	6.07	A3	5.90	A4	5.80	A5	5.86	Promedio	5.80																																																																
Probeta	Deformación [%]																																																																														
A1	5.37																																																																														
A2	6.07																																																																														
A3	5.90																																																																														
A4	5.80																																																																														
A5	5.86																																																																														
Promedio	5.80																																																																														
Fuerza Vs Desplazamiento																																																																															
<p>Diagrama Fuerza Vs Desplazamiento</p> <table border="1"> <tr><th>Desplazamiento [mm]</th><th>A1 [N]</th><th>A2 [N]</th><th>A3 [N]</th><th>A4 [N]</th><th>A5 [N]</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.6</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.8</td><td>2000</td><td>1500</td><td>1000</td><td>1200</td><td>2500</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>6000</td><td>5000</td><td>4000</td><td>6000</td><td>8000</td></tr> <tr><td>1.2</td><td>9000</td><td>7500</td><td>6000</td><td>8000</td><td>10000</td></tr> <tr><td>1.4</td><td>10500</td><td>9000</td><td>8000</td><td>9500</td><td>10500</td></tr> <tr><td>1.6</td><td>10500</td><td>9500</td><td>8500</td><td>9800</td><td>10500</td></tr> <tr><td>1.8</td><td>10000</td><td>9000</td><td>8000</td><td>9500</td><td>10000</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>9500</td><td>8500</td><td>7500</td><td>9000</td><td>9500</td></tr> <tr><td>2.2</td><td>9000</td><td>8000</td><td>7000</td><td>8500</td><td>9000</td></tr> </table>		Desplazamiento [mm]	A1 [N]	A2 [N]	A3 [N]	A4 [N]	A5 [N]	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0.8	2000	1500	1000	1200	2500	1.0	6000	5000	4000	6000	8000	1.2	9000	7500	6000	8000	10000	1.4	10500	9000	8000	9500	10500	1.6	10500	9500	8500	9800	10500	1.8	10000	9000	8000	9500	10000	2.0	9500	8500	7500	9000	9500	2.2	9000	8000	7000	8500	9000
Desplazamiento [mm]	A1 [N]	A2 [N]	A3 [N]	A4 [N]	A5 [N]																																																																										
0	0	0	0	0	0																																																																										
0.2	0	0	0	0	0																																																																										
0.4	0	0	0	0	0																																																																										
0.6	0	0	0	0	0																																																																										
0.8	2000	1500	1000	1200	2500																																																																										
1.0	6000	5000	4000	6000	8000																																																																										
1.2	9000	7500	6000	8000	10000																																																																										
1.4	10500	9000	8000	9500	10500																																																																										
1.6	10500	9500	8500	9800	10500																																																																										
1.8	10000	9000	8000	9500	10000																																																																										
2.0	9500	8500	7500	9000	9500																																																																										
2.2	9000	8000	7000	8500	9000																																																																										
Evaluación	Observación																																																																														
<ul style="list-style-type: none"> El esfuerzo máximo de compresión promedio fue de 78.99 MPa. El porcentaje de deformación promedio fue de 5.80 % 	<ul style="list-style-type: none"> La probeta A3 presenta un esfuerzo de compresión máx. de 70.902 MPa, donde probablemente contenga poros internos, pero no afecta al valor promedio 																																																																														
Realizó:	Willian Pullopaxi	Revisó:	Ing. Francisco Peña MSc																																																																												

3.1.2 Recolección de la rugosidad de las probetas con reforzamiento

Las Tablas 3.2-16 contiene un reporte de la rugosidad superficial del área de contacto influyente entre el acero y la fibra de carbono Unidireccional, que vendría siendo la distancia entre apoyos del presente proyecto.

Tabla 3.2 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_490_01.

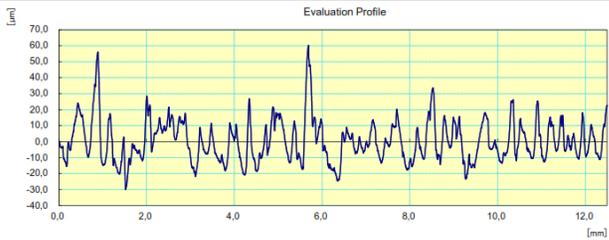
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	01		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_490_01				
Dimensiones:	490x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
11.013	10.890	12.495	9.397	9.440	10.646
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
		Disco de cerdas de acero			

Tabla 3.3 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_490_02.

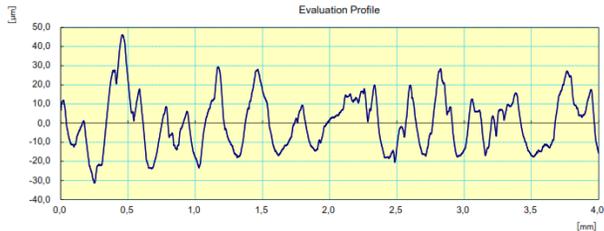
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	02		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_490_02				
Dimensiones:	490x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.662	10.017	10.662	9.793	11.62	10.550
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.4 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_490_03.

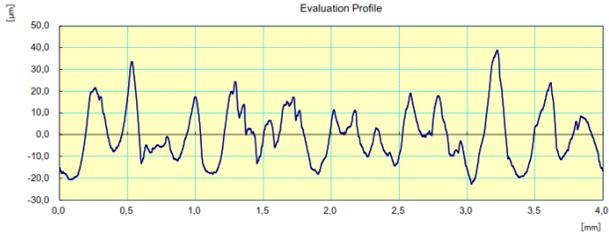
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	03		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_490_03				
Dimensiones:	490x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.916	10.508	13.083	10.508	9.384	10.880
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.5 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_490_04.

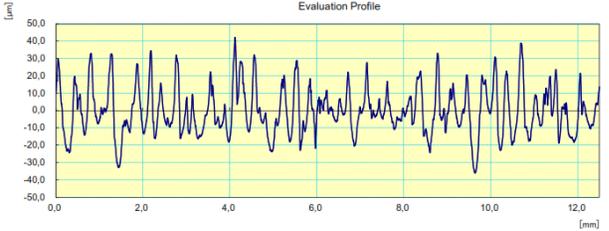
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	04		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_490_04				
Dimensiones:	490x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
12.178	9.766	12.938	11.180	9.495	11.111
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.6 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_490_05.

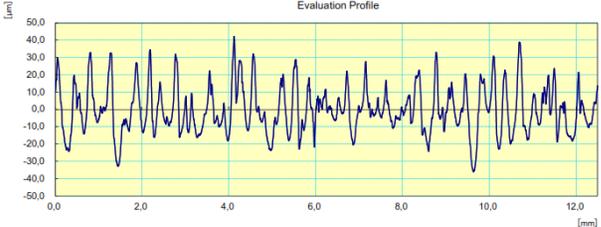
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	05		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_490_05				
Dimensiones:	490x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.154	10.293	9.933	10.961	9.457	10.160
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.7 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_01.

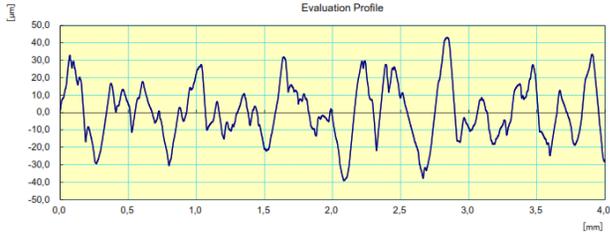
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	06		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_640_01				
Dimensiones:	640x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
13.194	8.876	12.051	11.501	14.046	11.934
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.8 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_02.

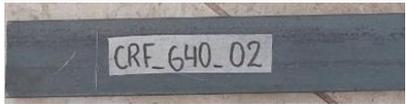
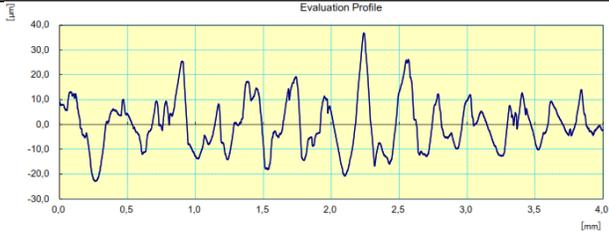
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	07		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_640_02				
Dimensiones:	640x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
8.228	9.963	10.822	8.879	10.180	9.614
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.9 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_03.

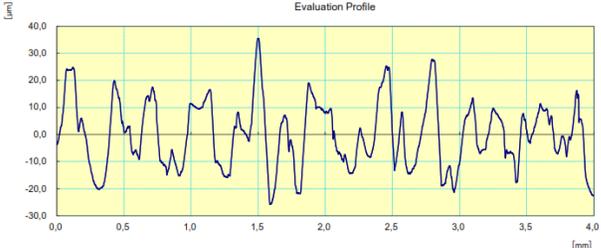
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	08		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_640_03				
Dimensiones:	640x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.044	10.057	9.435	10.477	10.556	10.114
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.10 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_04.

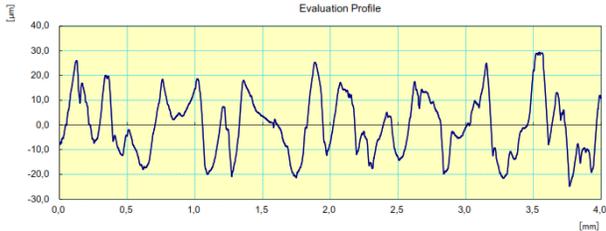
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	09		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_640_04				
Dimensiones:	640x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
12.065	10.092	11.038	8.071	10.578	10.369
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.11 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_640_05.

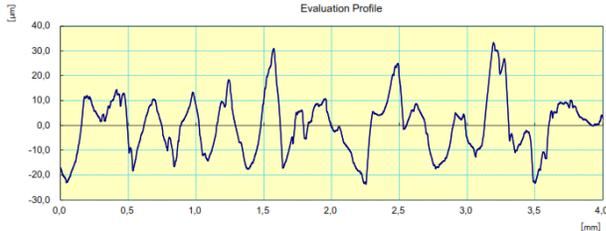
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	10		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_640_05				
Dimensiones:	640x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.446	10.273	8.528	9.340	8.891	9.496
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.12 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_01.

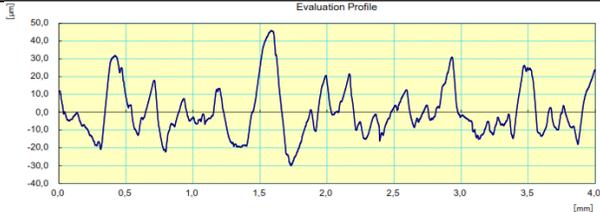
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	11		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_790_01				
Dimensiones:	790x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.009	11.625	10.858	10.803	10.279	10.715
RESULTADOS					
			Clase de rugosidad		
			N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)		
			Proceso:		
			Disco de cerdas de acero		

Tabla 3.13 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_02.

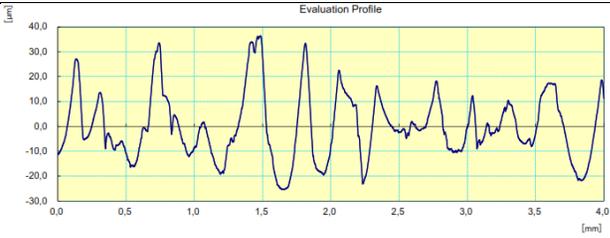
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	12		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_790_02				
Dimensiones:	790x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
11.037	9.313	9.587	10.438	10.887	10.252
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.14 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_03.

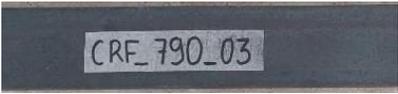
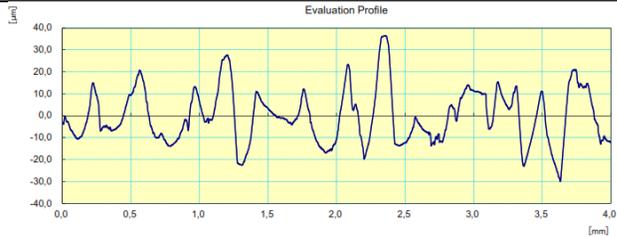
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	13		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_790_03				
Dimensiones:	790x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.836	10.372	10.557	11.108	10.918	10.758
RESULTADOS					
			Clase de rugosidad		
			N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)		
			Proceso:		
			Disco de cerdas de acero		

Tabla 3.15 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_04.

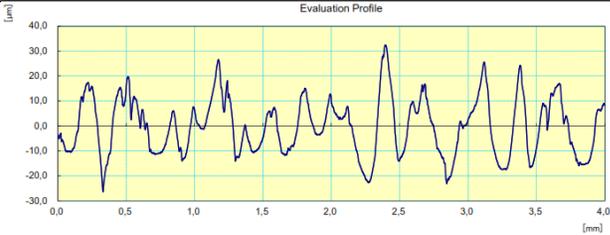
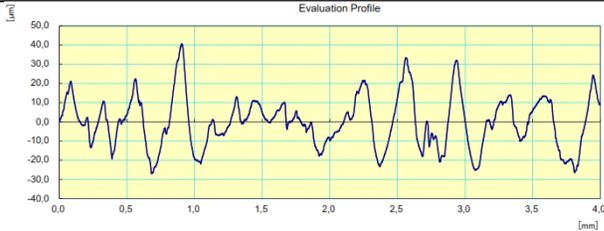
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	14		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_790_04				
Dimensiones:	790x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.202	10.872	9.589	10.281	11.150	10.419
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

Tabla 3.16 Reporte de rugosidad superficial probeta CRF_790_05.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL 					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Nº	15		
Fecha de ejecución:	03/06/2023				
Lugar de estudio:	Universidad técnica de Ambato				
Motivo:	Trabajo de titulación				
Elaborado por:	Willian Pullopaxi				
EQUIPO, MATERIALES Y HERRAMIENTAS					
Material:	Acero ASTM A36				
Codificación:	CRF_790_05				
Dimensiones:	790x50x10 mm				
PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					
Máquina:	Rugosímetro Mitutoyo SJ-210				
Norma:	ISO 1997				
Rango:	0.2 – 1.6 μm				
Mediciones:	5				
Número de pasadas:	5				
Velocidad de avance:	0.5 mm/s				
REGISTRO DE MEDICIONES DE RUGOSIDAD					
Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio
10.114	10.628	14.506	10.105	10.070	11.085
RESULTADOS					
				Clase de rugosidad	
				N9 – N10 (6.3 – 12.5 μm)	
				Proceso:	
				Disco de cerdas de acero	

3.1.3 Resultados de ensayo a flexión de tres puntos

A continuación, en las tablas 3.17-22 se presenta un reporte de los datos y resultados obtenidos

Tabla 3.17 Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_490.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN					
DATOS DE ENSAYO A FLEXIÓN							
Fecha de inicio:	15/06/2023		Fecha de finalización:	15/06/2023			
Ciudad:	Ambato		Codificación:	EFM 02			
Laboratorio:	Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero						
Norma:	ASTM E290-22		Nº de probetas:	5			
Máquina:	Máquina de ensayos universal Metrotest 1500 kN						
Material:	Acero:		Adhesivo:		Refuerzo:		
	ASTM A36		N/A		N/A		
Vel. del ensayo:	Precarga:	Dimensiones:	Distancia entre apoyo:				
20 mm/min	100 N	490 mm x 50 mm	290 mm				
Temperatura:	22.2 °C		Humedad relativa:		58.3 °C		
Resultados de ensayo a flexión							
Nº	Dimensiones		Fuerza Max [N]	Deflección [mm]	Esfuerzo Max de flexión [MPa]	Deformación [%]	Tipo de fallo
	Ancho [mm]	Espe-sor [mm]					
01	49,86	8,84	5000	4,514	558,216	0,28	N/A
02	49,82	8,81	4500	4,887	506,228	0,31	N/A
03	49,76	8,8	4850	4,444	547,501	0,28	N/A
04	49,99	8,88	4800	4,349	529,690	0,28	N/A
05	50,02	8,82	4850	4,818	542,188	0,30	N/A
Promedio:			4800	4,602	536,765	0,290	
Desv. estándar:			183,712	0,237	19,921	0,014	
Coef. de variación			3,827	5,149	3,711	4,959	
Gráfico:							
							

Tabla 3.17 Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_490 (continuación).

GRÁFICAS																																	
<p>Fuerza Max [N]</p>	<p>Deflexión [mm]</p>																																
<p>Esfuerzo máximo de flexión [MPa]</p>	<p>Deformación máxima [%]</p>																																
Fuerza Vs Desplazamiento																																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Probeta</th> <th>F_{Rot} N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>5000,000</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4500,000</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4850,000</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4800,000</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>4850,000</td> </tr> <tr> <td>Media</td> <td>4800,000</td> </tr> <tr> <td>Mediana</td> <td>4850,000</td> </tr> <tr> <td>Desv. Std</td> <td>183,712</td> </tr> <tr> <td>Coef. V.</td> <td>0,038</td> </tr> <tr> <td>Máximo</td> <td>5000,000</td> </tr> <tr> <td>Mínimo</td> <td>4500,000</td> </tr> <tr> <td>Rango</td> <td>500,000</td> </tr> <tr> <td>CPK</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>+3 Sigma</td> <td>5351,135</td> </tr> <tr> <td>-3 Sigma</td> <td>4248,865</td> </tr> </tbody> </table>	Probeta	F _{Rot} N	1	5000,000	2	4500,000	3	4850,000	4	4800,000	5	4850,000	Media	4800,000	Mediana	4850,000	Desv. Std	183,712	Coef. V.	0,038	Máximo	5000,000	Mínimo	4500,000	Rango	500,000	CPK	0,000	+3 Sigma	5351,135	-3 Sigma	4248,865
Probeta	F _{Rot} N																																
1	5000,000																																
2	4500,000																																
3	4850,000																																
4	4800,000																																
5	4850,000																																
Media	4800,000																																
Mediana	4850,000																																
Desv. Std	183,712																																
Coef. V.	0,038																																
Máximo	5000,000																																
Mínimo	4500,000																																
Rango	500,000																																
CPK	0,000																																
+3 Sigma	5351,135																																
-3 Sigma	4248,865																																
Evaluación	Observación																																
<ul style="list-style-type: none"> El esfuerzo máximo de flexión promedio fue 536.76 MPa. El porcentaje de deformación promedio de este grupo fue 0.29 % La deflexión promedio en este grupo de probetas fue 4.605 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> La probeta SRF_490_02 fue la que menor resistencia obtuvo del grupo, sin embargo, su varianza no es significativa. No se aplica el tipo de falla debido a que no se visualiza ningún tipo de fisura o grieta en las probetas ensayadas. 																																
Realizó:	William Pullopaxi	Revisó:	Ing. Francisco Peña MSc																														

Tabla 3.18 Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_490.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN					
		DATOS DE ENSAYO A FLEXIÓN					
Fecha de inicio:	15/06/2023		Fecha de finalización:	15/06/2023			
Ciudad:	Ambato		Codificación:	EFM 01			
Laboratorio:	Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero						
Norma:	ASTM E290-22		N° de probetas:	5			
Máquina:	Máquina de ensayos universal Metrotest 1500 kN						
Material:	Acero:		Adhesivo:		Refuerzo:		
	ASTM A36		Sikadur – 30		Fibra de carbono U		
Vel. del ensayo:	Precarga:		Dimensiones:		Distancia entre apoyo:		
	20 mm/min		100 N		490 mm x 50 mm		290 mm
Temperatura:	22.9 °C		Humedad relativa:		59.1°C		
Resultados de ensayo a flexión							
N°	Dimensiones		Fuerza Max [N]	Deflección [mm]	Esfuerzo Max de flexión [MPa]	Deformación [%]	Tipo de fallo
	Ancho [mm]	Espe-sor [mm]					
01	50,39	10,54	11600	16,806	901,409	1,26	A/C
02	49,99	10,48	12200	20,139	966,592	1,51	A/C
03	49,82	10,52	12400	19,132	978,308	1,44	A/C
04	49,92	10,54	9700	9,245	760,861	0,70	A/C
05	49,92	10,51	12750	18,377	1005,818	1,38	A/C
Promedio:			11730	16,740	922,598	1,256	
Desv. estándar:			1209,132	4,363	98,200	0,326	
Coef. de variación			10,308	26,062	10,644	25,933	
Gráfico:							

Tabla 3.18 Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_490 (continuación).

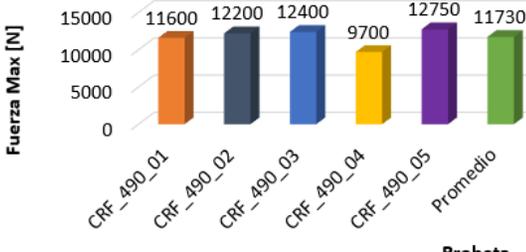
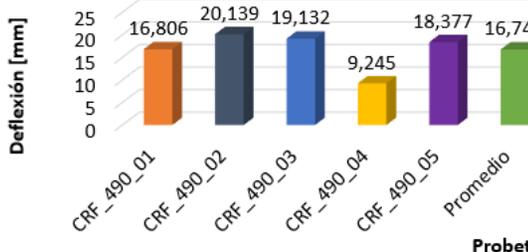
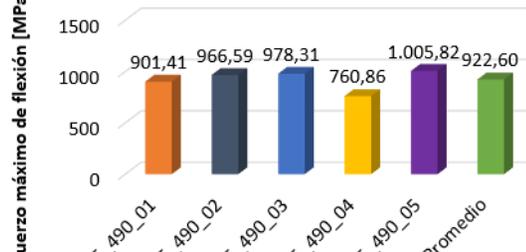
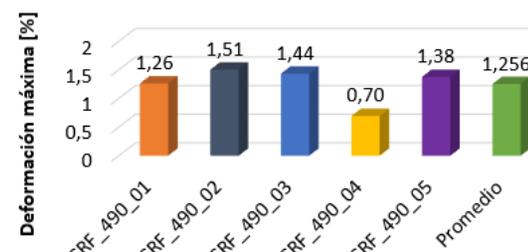
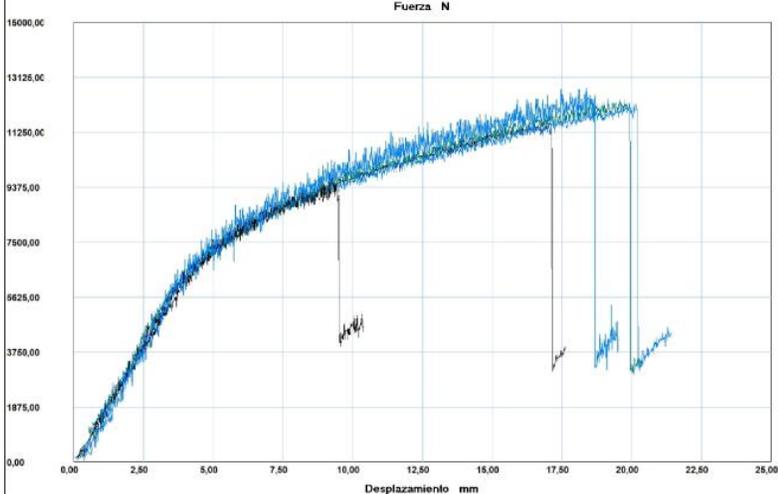
DATOS DE ENSAYO A FLEXIÓN																																	
GRÁFICAS																																	
<p>Fuerza Max [N]</p>  <p style="text-align: center;">Probeta</p>	<p>Deflexión [mm]</p>  <p style="text-align: center;">Probeta</p>																																
<p>Esfuerzo máximo de flexión [MPa]</p>  <p style="text-align: center;">Probeta</p>	<p>Deformación máxima [%]</p>  <p style="text-align: center;">Probeta</p>																																
Fuerza Vs Desplazamiento																																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Probeta</th> <th>FMax N</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>11600,00</td></tr> <tr><td>2</td><td>12200,00</td></tr> <tr><td>3</td><td>12400,00</td></tr> <tr><td>4</td><td>9700,00</td></tr> <tr><td>5</td><td>12750,00</td></tr> <tr><td>Media</td><td>11730,000</td></tr> <tr><td>Mediana</td><td>12200,000</td></tr> <tr><td>Desv. Std</td><td>1209,132</td></tr> <tr><td>Coef. V.</td><td>0,103</td></tr> <tr><td>Máximo</td><td>12750,000</td></tr> <tr><td>Mínimo</td><td>9700,000</td></tr> <tr><td>Rango</td><td>3050,000</td></tr> <tr><td>CPK</td><td>0,000</td></tr> <tr><td>+3 Sigma</td><td>15357,396</td></tr> <tr><td>-3 Sigma</td><td>8102,604</td></tr> </tbody> </table>	Probeta	FMax N	1	11600,00	2	12200,00	3	12400,00	4	9700,00	5	12750,00	Media	11730,000	Mediana	12200,000	Desv. Std	1209,132	Coef. V.	0,103	Máximo	12750,000	Mínimo	9700,000	Rango	3050,000	CPK	0,000	+3 Sigma	15357,396	-3 Sigma	8102,604
Probeta	FMax N																																
1	11600,00																																
2	12200,00																																
3	12400,00																																
4	9700,00																																
5	12750,00																																
Media	11730,000																																
Mediana	12200,000																																
Desv. Std	1209,132																																
Coef. V.	0,103																																
Máximo	12750,000																																
Mínimo	9700,000																																
Rango	3050,000																																
CPK	0,000																																
+3 Sigma	15357,396																																
-3 Sigma	8102,604																																
Evaluación	Observación																																
<ul style="list-style-type: none"> El esfuerzo máximo de flexión promedio fue 922.60 MPa. El porcentaje de deformación promedio de este grupo fue 1.256 % La deflexión promedio en este grupo de probetas fue 16.74 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> La probeta CRF_490_04 fue la menos resistente del grupo. Se evidencia que los ensayos se realizaron hasta el desprendimiento de la fibra. Los tipos de falla presente en este grupo es adhesivo/cohesivo. 																																
Realizó:	Willian Pullopaxi																																
Revisó:	Ing. Francisco Peña MSc																																

Tabla 3.19 Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_640.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN					
		DATOS DE ENSAYO A FLEXIÓN					
Fecha de inicio:	15/06/2023		Fecha de finalización:	15/06/2023			
Ciudad:	Ambato		Codificación:	EFM 04			
Laboratorio:	Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero						
Norma:	ASTM E290-22		N° de probetas:	5			
Máquina:	Máquina de ensayos universal Metrotest 1500 kN						
Material:	Acero:		Adhesivo:		Refuerzo:		
	ASTM A36		N/A		N/A		
Vel. del ensayo:	Precarga:		Dimensiones:		Distancia entre apoyo:		
	20 mm/min		100 N		640 mm x 50 mm	440 mm	
Temperatura:	23.9 °C		Humedad relativa:		54.1°C		
Resultados de ensayo a flexión							
N°	Dimensiones		Fuerza Max [N]	Deflección [mm]	Esfuerzo Max de flexión [MPa]	Deformación [%]	Tipo de fallo
	Ancho [mm]	Espe-sor [mm]					
01	49,76	8,86	2700	8,004	456,205	0,22	N/A
02	49,86	8,85	2900	8,767	490,121	0,24	N/A
03	49,91	8,85	2900	8,81	489,630	0,24	N/A
04	49,77	8,84	2900	9,08	492,119	0,25	N/A
05	49,91	8,86	3000	9,288	505,371	0,26	N/A
Promedio:			2880	8,790	486,689	0,241	
Desv. estándar:			109,545	0,488	18,222	0,013	
Coef. de variación			3,804	5,547	3,744	5,518	
Gráfico:							
							

Tabla 3.19 Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_640 (continuación).

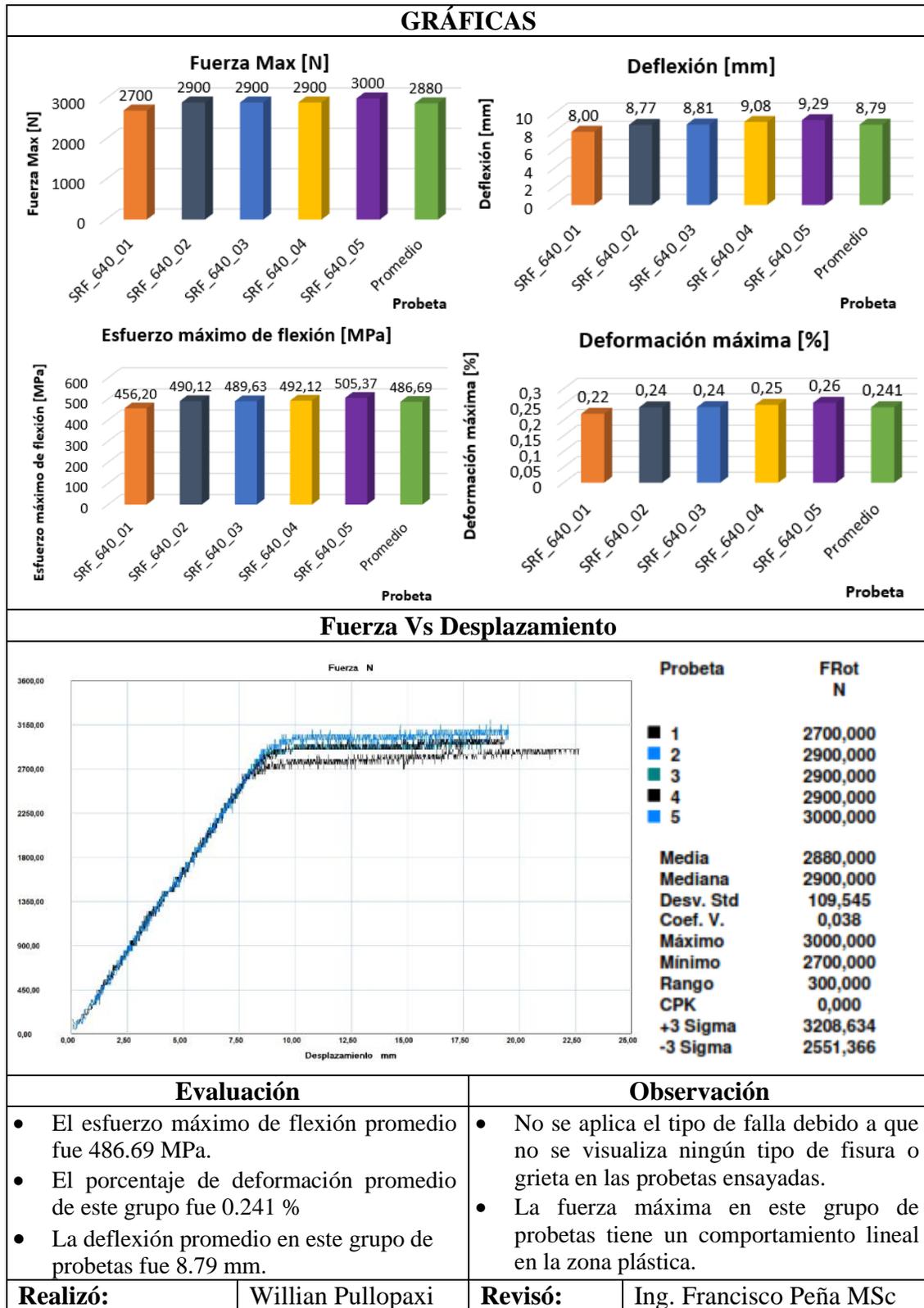


Tabla 3.20 Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_640.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN					
		DATOS DE ENSAYO A FLEXIÓN					
Fecha de inicio:	15/06/2023	Fecha de finalización:	15/06/2023				
Ciudad:	Ambato	Codificación:	EFM 03				
Laboratorio:	Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero						
Norma:	ASTM E290-22	N° de probetas:	5				
Máquina:	Máquina de ensayos universal Metrotest 1500 kN						
Material:	Acero:	Adhesivo:	Refuerzo:				
	ASTM A36	Sikadur – 30	Fibra de carbono U				
Vel. del ensayo:	Precarga:	Dimensiones:	Distancia entre apoyo:				
20 mm/min	100 N	640 mm x 50 mm	440 mm				
Temperatura:	22.5 °C	Humedad relativa:	54.3°C				
Resultados de ensayo a flexión							
N°	Dimensiones		Fuerza Max [N]	Deflección [mm]	Esfuerzo Max de flexión [MPa]	Deformación [%]	Tipo de fallo
	Ancho [mm]	Espe-sor [mm]					
01	50,72	10,56	8750	69,887	1021,045	2,29	A/C
02	49,91	10,74	8350	57,613	957,270	1,92	A/C
03	49,92	10,52	8700	73,759	1039,339	2,40	A/C
04	49,81	10,51	9050	76,163	1085,602	2,48	A/C
05	49,70	10,63	8850	85,139	1040,074	2,80	A/C
Promedio:			8740	72,512	1028,666	2,379	
Desv. estándar:			1452,515	40,209	89,332	1,334	
Coef. de variación			16,619	55,452	8,684	56,058	
Gráfico:							
							

Tabla 3.20 Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_640 (continuación).

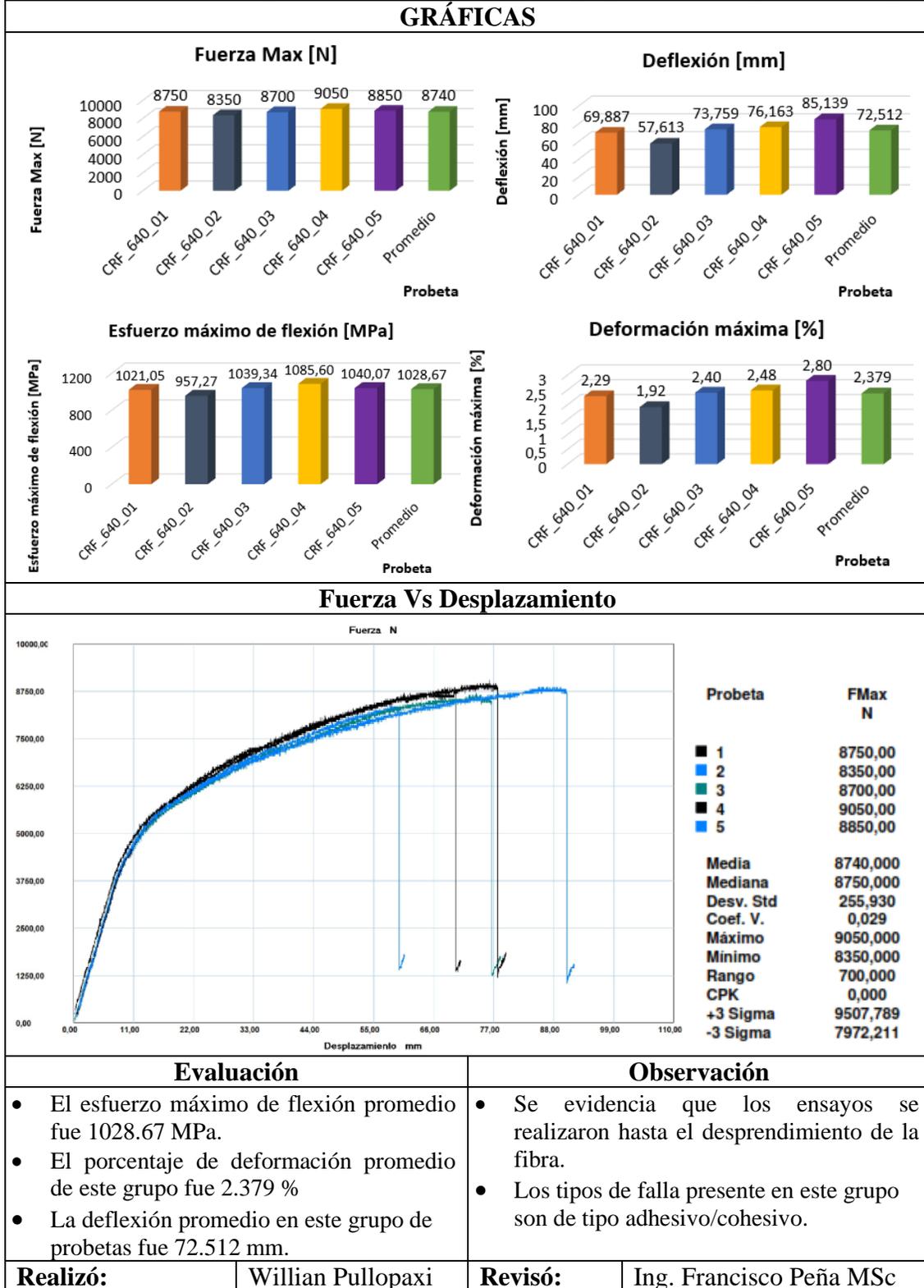


Tabla 3.21 Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_790.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN					
		DATOS DE ENSAYO A FLEXIÓN					
Fecha de inicio:		15/06/2023		Fecha de finalización:		15/06/2023	
Ciudad:		Ambato		Codificación:		EFM 06	
Laboratorio:		Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero					
Norma:		ASTM E290-22		N° de probetas:		5	
Máquina:		Máquina de ensayos universal Metrotest 1500 kN					
Material:		Acero:		Adhesivo:		Refuerzo:	
		ASTM A36		N/A		N/A	
Vel. del ensayo:		Precarga:		Dimensiones:		Distancia entre apoyo:	
20 mm/min		100 N		790 mm x 50 mm		590 mm	
Temperatura:		23.8 °C		Humedad relativa:		53.1°C	
Resultados de ensayo a flexión							
N°	Dimensiones		Fuerza Max [N]	Deflección [mm]	Esfuerzo Max de flexión [MPa]	Deformación [%]	Tipo de fallo
	Ancho [mm]	Espe-sor [mm]					
01	49,82	8,92	2200	15,391	491,171	0,24	N/A
02	49,74	8,93	2250	15,764	502,015	0,24	N/A
03	49,75	8,92	2050	14,965	458,326	0,23	N/A
04	49,81	8,99	2100	14,583	461,665	0,23	N/A
05	49,75	9,02	2150	14,748	470,084	0,23	N/A
Promedio:			2150	15,090	476,652	0,233	
Desv. estándar:			79,057	0,483	19,090	0,007	
Coef. de variación			3,677	3,203	4,005	2,862	
Gráfico:							

Tabla 3.21 Reporte de ensayo a flexión del grupo SRF_790 (continuación).

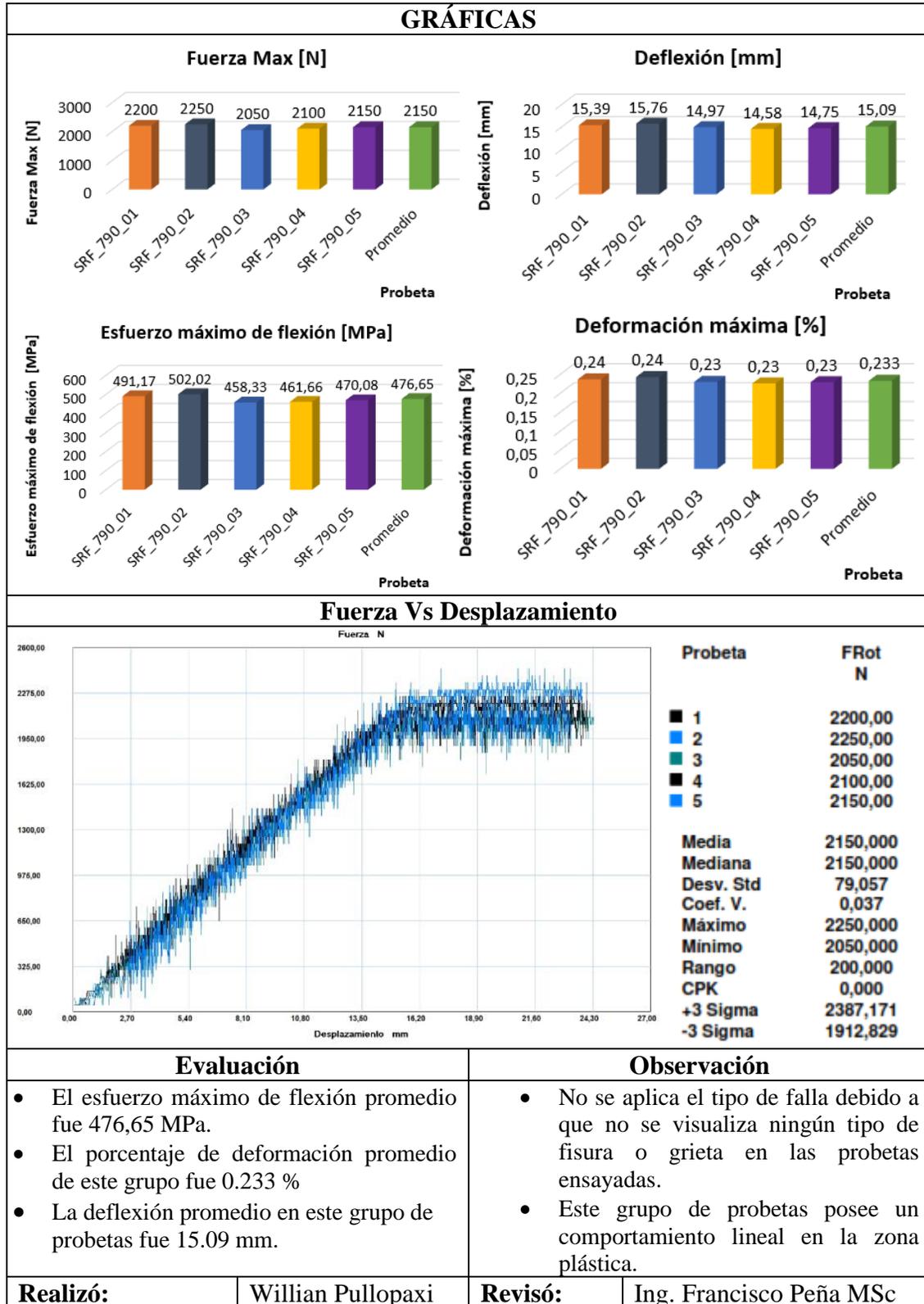
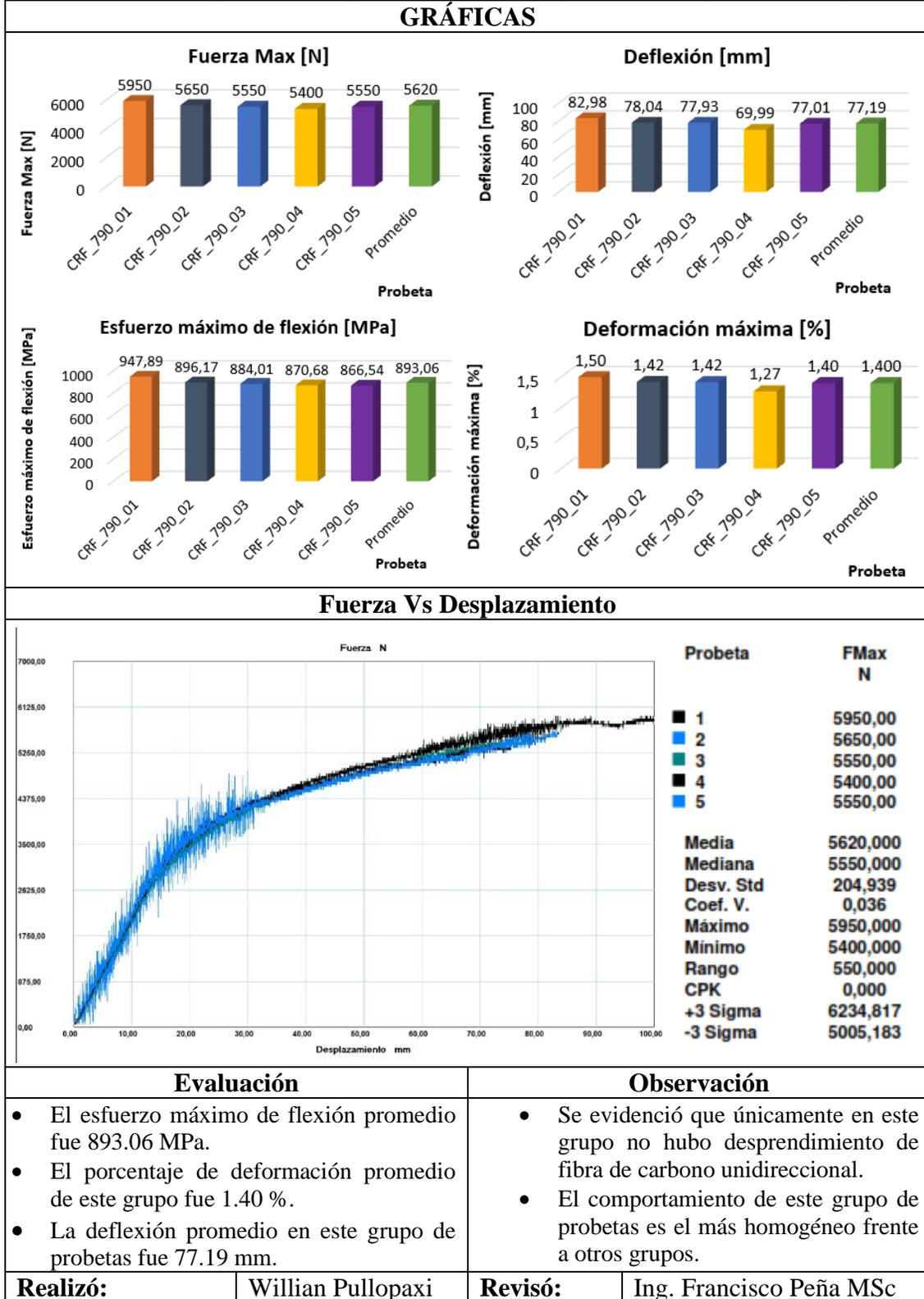


Tabla 3.22 Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_790.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN					
		DATOS DE ENSAYO A FLEXIÓN					
Fecha de inicio:	15/06/2023	Fecha de finalización:	15/06/2023				
Ciudad:	Ambato	Codificación:	EFM 05				
Laboratorio:	Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero						
Norma:	ASTM E290-22	N° de probetas:	5				
Máquina:	Máquina de ensayos universal Metrotest 1500 kN						
Material:	Acero:		Adhesivo:		Refuerzo:		
	ASTM A36		Sikadur – 30		Fibra de carbono U		
Vel. del ensayo:	Precarga:	Dimensiones:	Distancia entre apoyo:				
20 mm/min	100 N	790 mm x 50 mm	590 mm				
Temperatura:	21.8 °C	Humedad relativa:	65.5°C				
Resultados de ensayo a flexión							
N°	Dimensiones		Fuerza Max [N]	Deflección [mm]	Esfuerzo Max de flexión [MPa]	Deformación [%]	Tipo de fallo
	Ancho [mm]	Espe-sor [mm]					
01	50,58	10,48	5950	82,978	947,892	1,50	N/A
02	50,13	10,55	5650	78,038	896,167	1,42	N/A
03	49,92	10,55	5550	77,934	884,009	1,42	N/A
04	49,88	10,49	5400	69,991	870,682	1,27	N/A
05	50,83	10,56	5550	77,005	866,539	1,40	N/A
Promedio:			5620	77,189	893,058	1,400	
Desv. estándar:			204,939	4,654	32,796	0,084	
Coef. de variación			3,647	6,029	3,672	6,030	
Gráfico:							
							

Tabla 3.22 Reporte de ensayo a flexión del grupo CRF_790 (continuación).



3.1.4 Resultados del ensayo a flexión del acero reforzado

Seguidamente en las Tablas 3.23-27, tenemos los datos obtenidos mediante la simulación en elementos finitos para poder comparar los resultados

Tabla 3.23 Deflexión del acero A-36

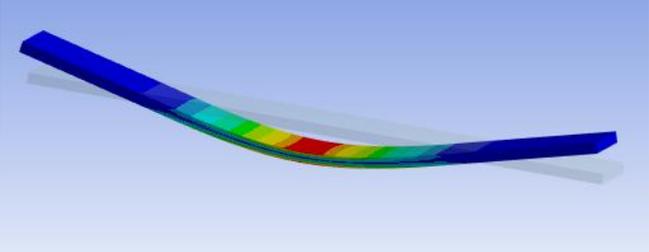
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN POR MEF			
Nº de simulación:	01_SRF_490	Probeta:	SRF_490_EF
Material:	Acero:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A36	N/A	N/A
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación:	Tiempo de procesamiento:
	5.0 kN	10 mm/min	29 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
Nº de nodos:	81227	Tipo de análisis:	Static structural
Nº de elementos:	15894	Calidad de mallado:	0.78
Características del ordenador:	Intel(R) Core(TM)i7-5500U CPU 2.40GHz	8 GB RAM	4 núcleos
Realizado por:	Willian Hernan Pullopaxi	Revisado por:	Ing. Francisco Peña MSc
		Fecha:	25/06/2023
Resultados de simulación			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0.0	0		
0.5	0,474		
1.0	1,015		
1.5	1,567		
2.0	2,002		
2.5	2,448		
3.0	2,899		
3.5	3,353		
4.0	3,863		
4.5	4,317		
5.0	4,828		

Tabla 3.24 Deflexión del acero reforzado

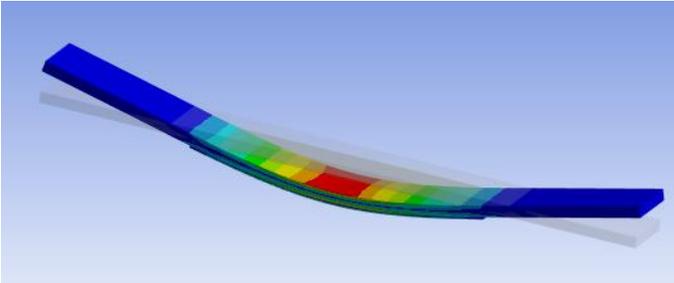
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN POR MEF			
N° de simulación:	02_CRF_490	Probeta:	CRF_490_EF
Material:	Acero:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A36	Fibra de carbono U	N/A
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación:	Tiempo de procesamiento:
	12 kN	10 mm/min	37 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
N° de nodos:	85749	Tipo de análisis:	Static structural
N° de elementos:	15696	Calidad de mallado:	0.84
Características del ordenador:	Intel(R) Core(TM)i7-5500U CPU 2.40GHz	8 GB RAM	4 núcleos
Realizado por:	Willian Hernan Pullopaxi	Revisado por:	Ing. Francisco Peña MSc
		Fecha:	25/06/2023
Resultados de simulación			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0		
1	1,896		
2	3,792		
3	5,688		
4	7,584		
5	9,479		
6	11,362		
7	13,222		
8	15,080		
9	16,940		
10	18,800		
11	20,660		
12	22,524		

Tabla 3.25 Deflexión del acero A-36

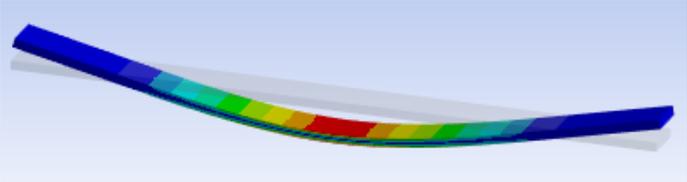
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN POR MEF			
N° de simulación:	03_SRF_640	Probeta:	SRF_640_EF
Material:	Acero:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A36	N/A	N/A
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación:	Tiempo de procesamiento:
	5.0 kN	10 mm/min	52 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
N° de nodos:	423945	Tipo de análisis:	Static structural
N° de elementos:	92900	Calidad de mallado:	0.9
Características del ordenador:	Intel(R)Core(TM)i7-5500UCPU 2.40GHz	8 GB RAM	4 núcleos
Realizado por:	Willian Hernan Pullopaxi	Revisado por:	Ing. Francisco Peña MSc
		Fecha:	25/06/2023
Resultados de simulación			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0		
0.5	1,537		
1.0	3,031		
1.5	4,608		
2.0	6,094		
2.5	7,679		
3.0	9,275		
3.5	10,796		
4.0	12,395		
4.5	14,000		
5.0	15,511		

Tabla 3.26 Deflexión del acero reforzado

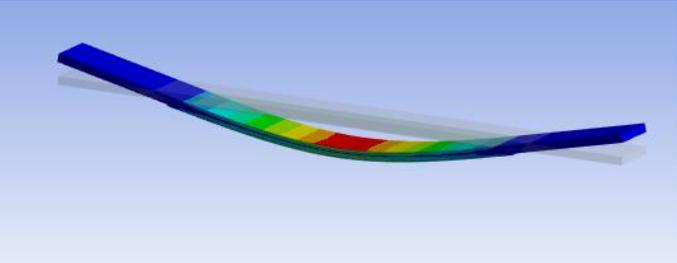
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN POR MEF			
Nº de simulación:	04_CRF_640	Probeta:	CRF_640_EF
Material:	Acero:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A36	Fibra de carbono U	N/A
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación:	Tiempo de procesamiento:
	12 kN	10 mm/min	49 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
Nº de nodos:	80027	Tipo de análisis:	Static structural
Nº de elementos:	15747	Calidad de mallado:	0.77
Características del ordenador:	Intel(R) Core(TM)i7-5500U CPU 2.40GHz	8 GB RAM	4 núcleos
Realizado por:	Willian Hernan Pullopaxi	Revisado por:	Ing. Francisco Peña MSc
		Fecha:	25/06/2023
Resultados de simulación			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0,000		
1	2,799		
2	4,786		
3	6,200		
4	8,347		
5	15,611		
6	27,893		
7	39,544		
8	51,195		
9	69,322		
10	91,987		
11	128,551		
12	166,48		

Tabla 3.27 Deflexión del acero A-36

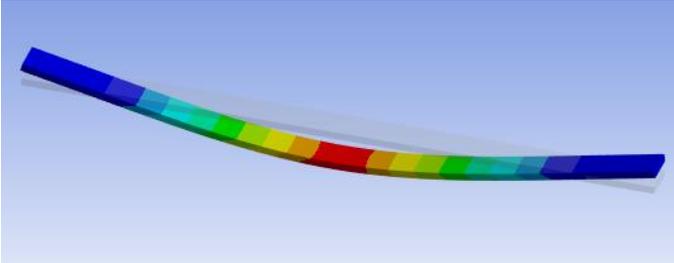
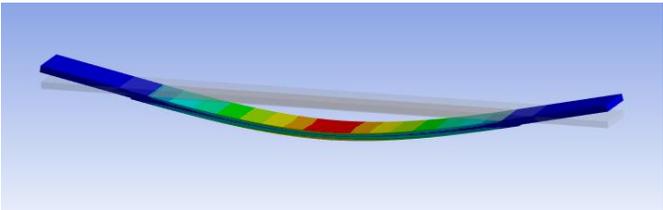
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN POR MEF			
Nº de simulación:	05_SRF_790	Probeta:	SRF_790_06
Material:	Acero:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A36	N/A	N/A
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación:	Tiempo de procesamiento:
	5.0 kN	10 mm/min	49 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
Nº de nodos:	80857	Tipo de análisis:	Static structural
Nº de elementos:	17856	Calidad de mallado:	0.84
Características del ordenador:	Intel(R) Core(TM)i7-5500U CPU 2.40GHz	8 GB RAM	4 núcleos
Realizado por:	Willian Hernan Pullopaxi	Revisado por:	Ing. Francisco Peña MSc
		Fecha:	25/06/2023
Resultados de simulación			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0		
0.5	3,6811		
1.0	7,3635		
1.5	11,046		
2.0	14,728		
2.5	18,411		
3.0	22,093		
3.5	25,776		
4.0	29,458		
4.5	33,141		
5.0	36,823		

Tabla 3.28 Deflexión del acero reforzado

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA REPORTE DE ENSAYO A FLEXIÓN POR MEF			
Nº de simulación:	06_CRF_790	Probeta:	CRF_790_EF
Material:	Acero:	Refuerzo:	Hormigón:
	ASTM A36	Fibra de carbono U	N/A
Características de la simulación:	Fuerza aplicada:	Velocidad de aplicación:	Tiempo de procesamiento:
	12 kN	10 mm/min	58 min
Software utilizado:	ANSYS RESEARCH, WORKBENCH		
Nº de nodos:	81767	Tipo de análisis:	Static structural
Nº de elementos:	16795	Calidad de mallado:	0.77
Características del ordenador:	Intel(R) Core(TM)i7-5500U CPU 2.40GHz	8 GB RAM	4 núcleos
Realizado por:	Willian Hernan Pullopaxi	Revisado por:	Ing. Francisco Peña MSc
		Fecha:	25/06/2023
Resultados de simulación			
Fuerza [kN]	Deflexión [mm]		
0	0,000		
1	5,122		
2	13,457		
3	20,000		
4	48,544		
5	77,088		
6	105,466		
7	161,711		
8	228,998		
9	307,698		
10	398,744		
11	494,228		
12	602,787		

3.2 Análisis de resultados

Con los resultados obtenidos en los ensayos de tanto de resina como de acero con y sin reforzamiento se aplicó un método estadístico, como se muestra en la Tabla 3.29 un resumen del comportamiento de las probetas cilíndricas de resina.

Tabla 3.29 Resumen de datos en probetas de resina.

Probeta	Fuerza Max [N]	Diferencia	E. Max de compresión [MPa]	Diferencia
A1	10518,70	511,89	83,04	4,04
A2	9859,47	-147,34	77,83	-1,16
A3	8981,66	-1025,15	70,90	-8,09
A4	9834,60	-172,21	77,64	-1,36
A5	10839,60	832,79	85,57	6,57
N° datos	5			
Promedio	10006,81		78,99	
Varianza	514467,110		32,060	
Desv. Est.	717,264		5,662	
CV	7,168		7,168	

Para interpretar la variabilidad los datos obtenidos previos al ensayo de compresión, se representará la distribución normal mediante campanas de Gauss los resultados de fuerza y esfuerzo de compresión máximos.

Fuerza	Probetas de resina Sikadur-30			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	10006,81	717,264	10839,60	8981,66

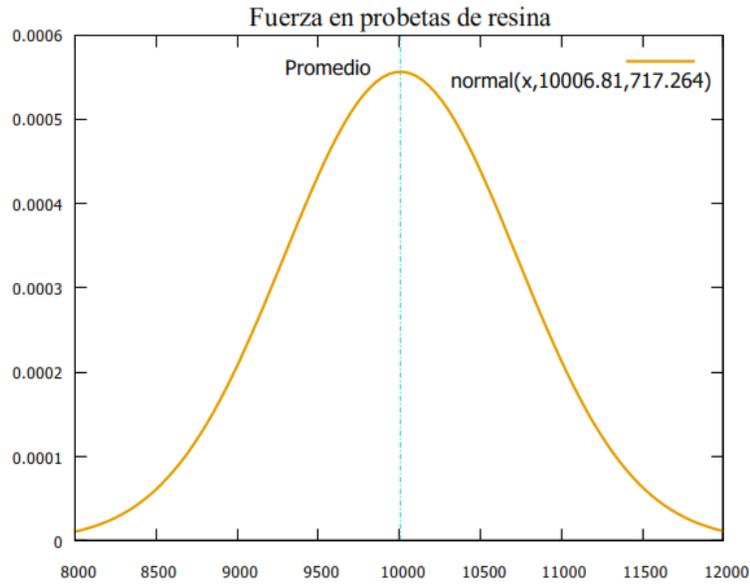


Figura 3.1 Distribución normal de fuerza en probetas de resina

Esfuerzo máximo de compresión	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	78,99	5,662	85,57	70,90

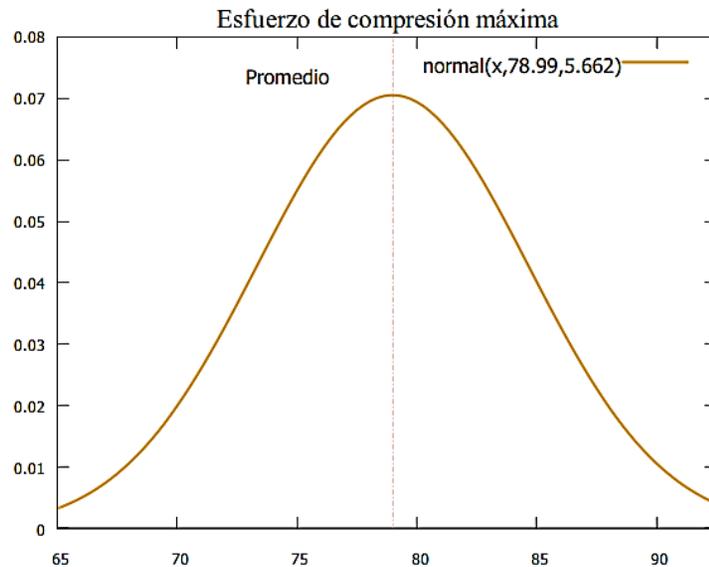


Figura 3.2 Distribución normal de esfuerzo máximo de compresión en probetas de resina

A continuación, en la Tabla 3.30 se presenta un resumen de los resultados obtenidos como; fuerza y esfuerzo máximos de flexión en probetas de acero, mientas que en la Tabla 3.31 los resultados de rugosidad promedio, fuerza y esfuerzo máximos de flexión en probetas de acero reforzado.

Tabla 3.30 Resumen de datos en probetas no reforzadas.

Probeta	Fuerza Max [N]	Diferencia	E. Max de flexión [MPa]	Diferencia
SRF_490_01	5000	200	558,216	21,451
SRF_490_02	4500	-300	506,228	-30,537
SRF_490_03	4850	50	547,501	10,736
SRF_490_04	4800	0	529,69	-7,075
SRF_490_05	4850	50	542,188	5,423
N° datos	5			
Promedio	4800		536,765	
Varianza	33750		396,845	
Desv. Est.	183,712		19,921	
CV	3,827		3,711	
SRF_640_01	2700	-180	456,205	-30,484
SRF_640_02	2900	20	490,121	3,432
SRF_640_03	2900	20	489,63	2,941
SRF_640_04	2900	20	492,119	5,430
SRF_640_05	3000	120	505,371	18,682
N° datos	5			
Promedio	2880		486,689	
Varianza	12000		332,051	
Desv. Est.	109,545		18,222	
CV	3,804		3,744	
SRF_790_01	2150	50	491,171	14,519
SRF_790_02	2250	100	502,015	25,363
SRF_790_03	2050	-100	458,326	-18,326
SRF_790_04	2100	-50	461,665	-14,987
SRF_790_05	2150	0	470,084	-6,568
N° datos	5			
Promedio	2150		476,652	
Varianza	6250		364,419	
Desv. Est.	79,057		19,090	
CV	3,677		4,005	

Fuerza SRF_490	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	4800	183.712	5000	4500

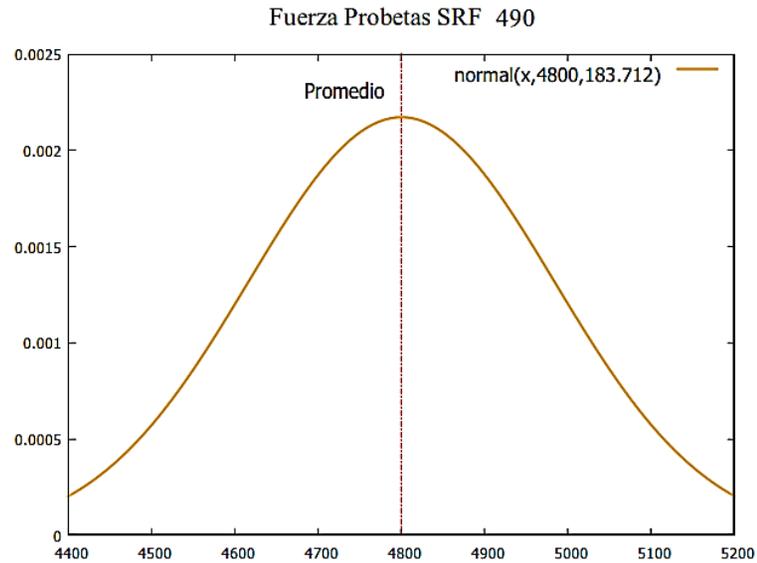


Figura 3.3 Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 de 490 mm

Fuerza SRF_640	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	2880	109.545	3000	2700

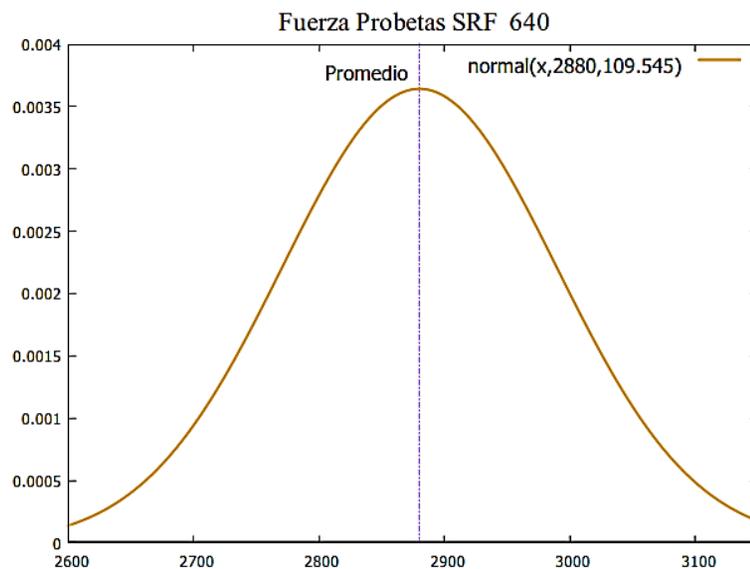


Figura 3.4 Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 de 640 mm

Fuerza SRF_790	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	2150	79.057	2250	2050

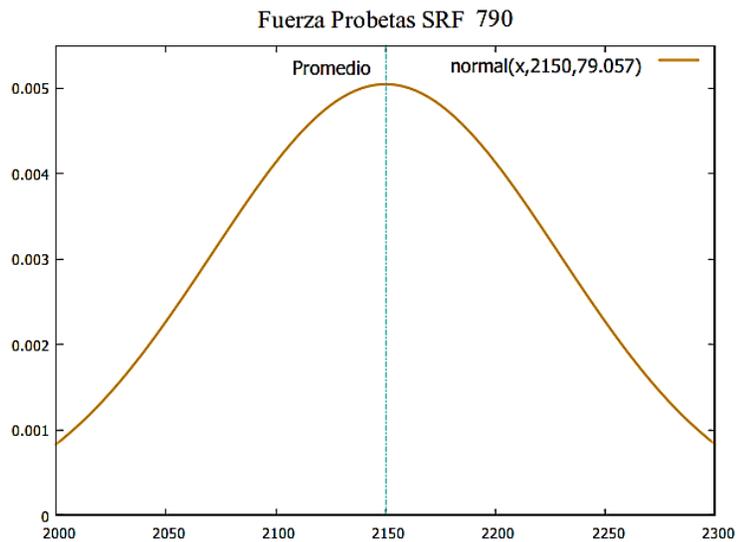


Figura 3.5 Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 de 790 mm

Esfuerzo Máximo de flexión SRF_490	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	536.765	19.921	558.216	506.228

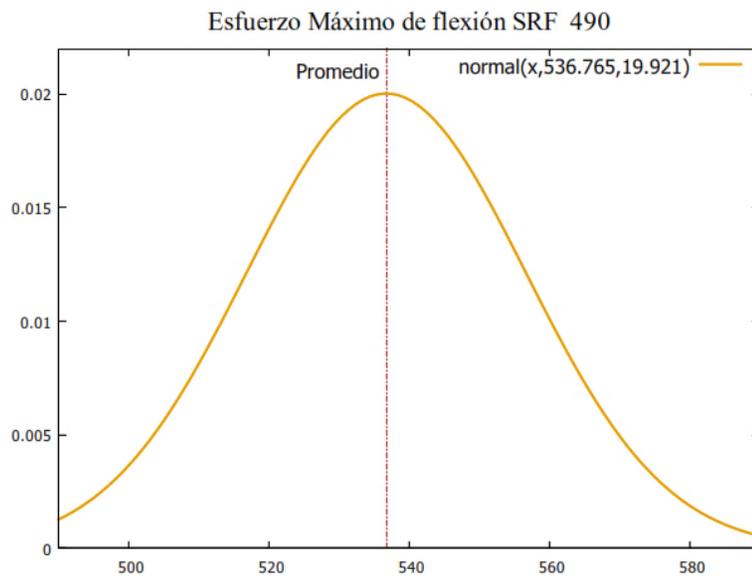


Figura 3.6 Distribución normal del esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 de 490 mm

Esfuerzo Máximo de flexión SRF_640	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	486.689	18.222	505.371	456.205

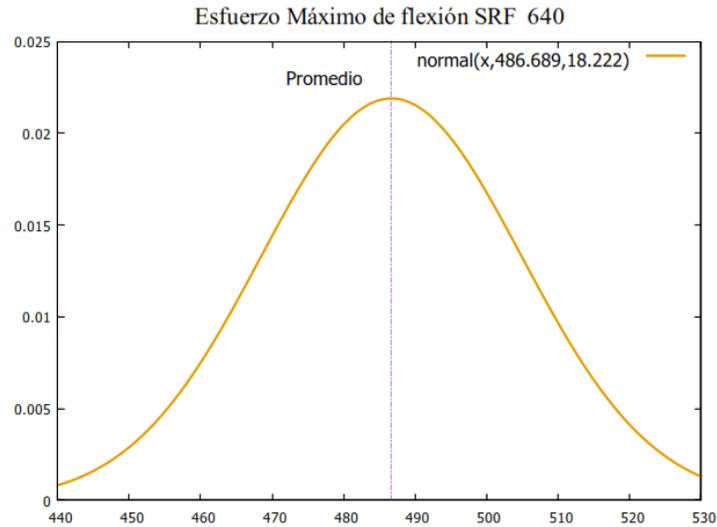


Figura 3.7 Distribución normal del esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 de 640 mm

Esfuerzo Máximo de flexión SRF_790	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	476.652	19.090	502.015	458.326

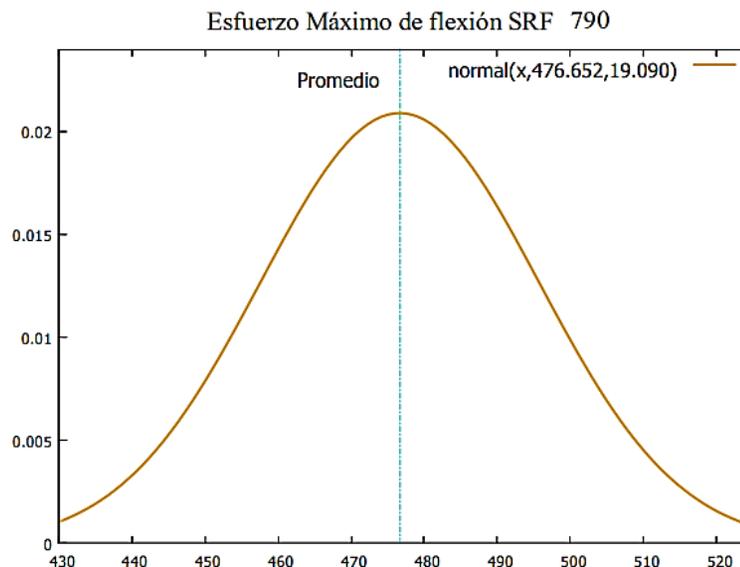


Figura 3.8 Distribución normal del esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 de 790 mm

Tabla 3.31 Resumen de datos en probetas de acero reforzado.

Probeta	Rugosidad promedio [μm]	Diferencia	Fuerza Max [N]	Diferencia	E. Max de flexión [MPa]	Diferencia
CRF_490_01	10,665	-0,0083	11600	-130	901,409	-21,189
CRF_490_02	10,551	-0,123	12200	470	966,592	43,994
CRF_490_03	10,880	0,206	12400	670	978,308	55,710
CRF_490_04	11,111	0,438	9700	-2030	760,861	-161,737
CRF_490_05	10,160	-0,514	12750	1020	1005,818	83,220
N° datos		5				
Promedio	10,673		11730		922,598	
Varianza	0,128		1462000		9643,119	
Desv. Est.	0,358		1209,132		98,199	
CV	3,357		10,308		10,644	
CRF_640_01	11,934	1,628	8750	10	1021,045	-7,621
CRF_640_02	9,614	-0,691	8350	-390	957,27	-71,396
CRF_640_03	10,114	-0,191	8700	-40	1039,339	10,673
CRF_640_04	10,368	0,063	9050	310	1085,602	56,936
CRF_640_05	9,496	-0,810	8850	110	1040,074	11,408
N° datos		5				
Promedio	10,305		8740		1028,666	
Varianza	0,956		65500		2160,308	
Desv. Est.	0,978		255,930		46,479	
CV	9,489		2,928		4,518	
CRF_790_01	10,715	0,069	5950	330	947,892	54,834
CRF_790_02	10,252	-0,393	5650	30	896,167	3,109
CRF_790_03	10,758	0,112	5550	-70	884,009	-9,049
CRF_790_04	10,419	-0,227	5400	-220	870,682	-22,376
CRF_790_05	11,085	0,439	5550	-70	866,539	-26,519
N° datos		5				
Promedio	10,646		5620		893,058	
Varianza	0,103		14775		323,868	
Desv. Est.	0,321		121,552		17,996	
CV	3,013		2,163		2,015	

Rugosidad CRF_490	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	10,160	0,358	11,111	10,160

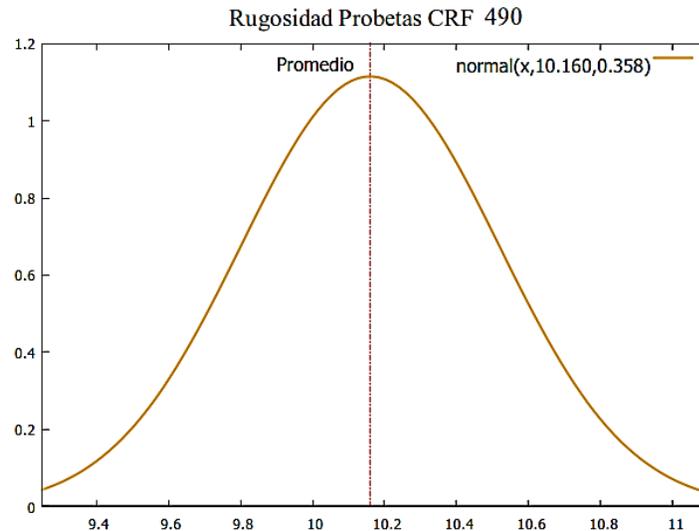


Figura 3.9 Distribución normal de rugosidad promedio en probetas de acero A36 reforzadas de 490 mm.

Rugosidad CRF_640	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	10,305	0,978	11,934	9,496

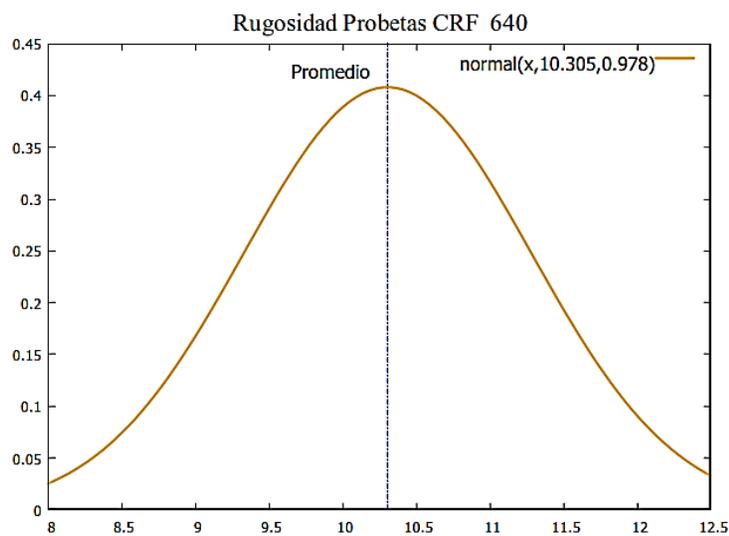


Figura 3.10 Distribución normal de rugosidad promedio en probetas de acero A36 reforzadas de 640 mm.

Rugosidad CRF_790	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	10,646	0,321	11,085	10,252

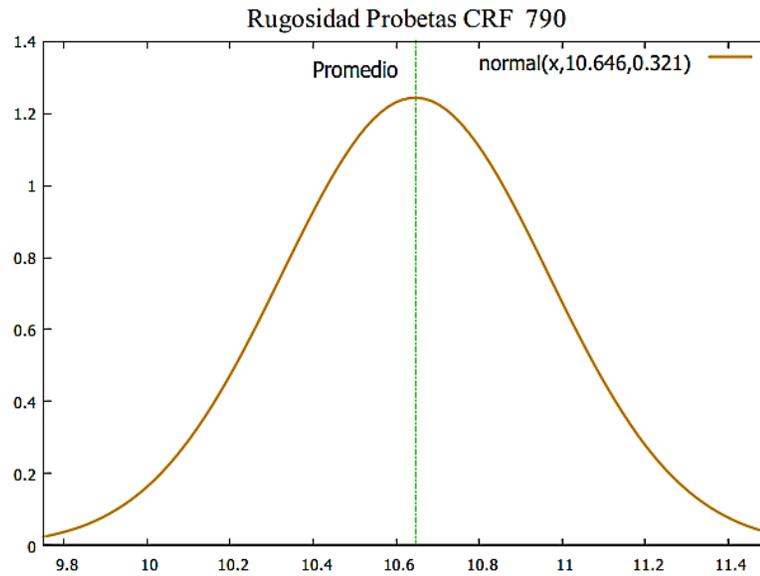


Figura 3.11 Distribución normal de rugosidad promedio en probetas de acero A36 reforzadas de 790 mm

Fuerza CRF_490	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	11730	1209,132	12750	9700

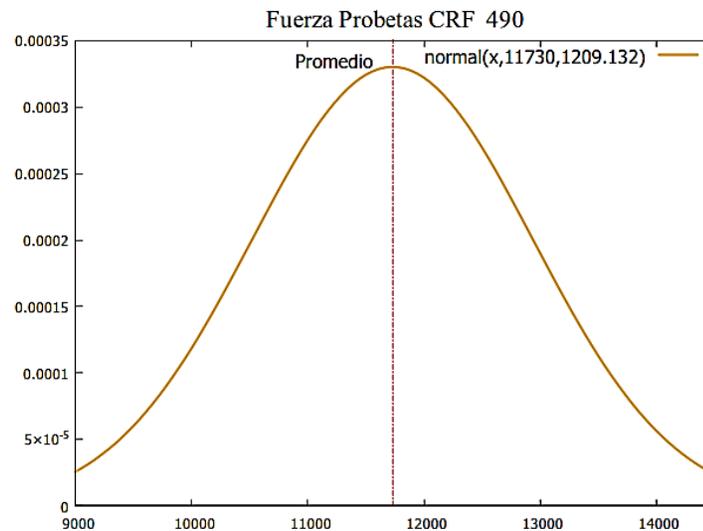


Figura 3.12 Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 reforzadas de 490 mm.

Fuerza CRF_640	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	8740	255,930	9050	8350

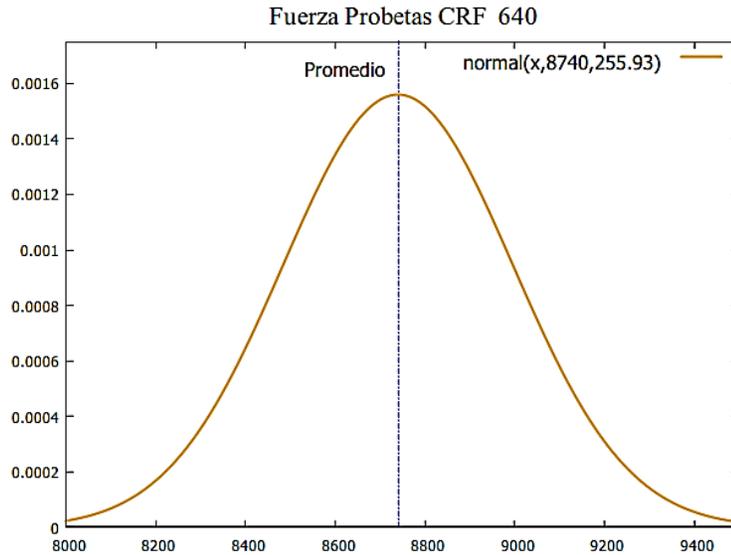


Figura 3.13 Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 reforzadas de 640 mm.

Fuerza CRF_790	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	5620	121,552	5950	5400

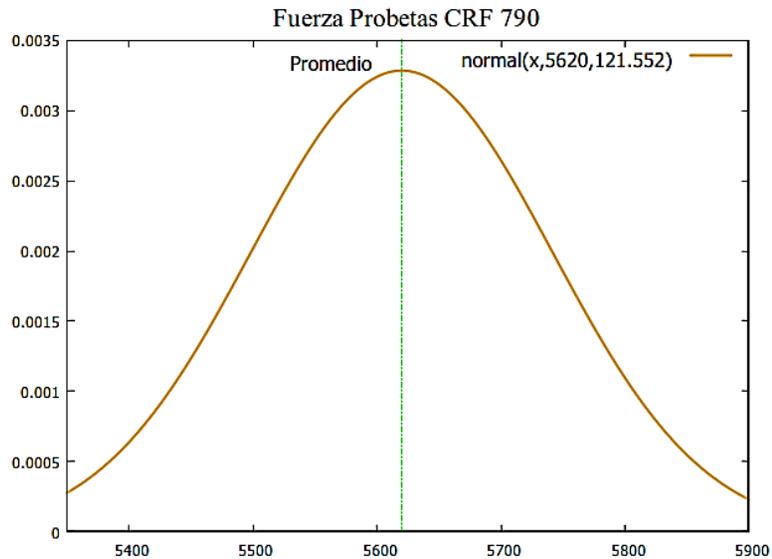


Figura 3.14 Distribución normal de fuerza en probetas de acero A36 reforzadas de 790 mm.

Esfuerzo Máximo de flexión CRF_490	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	922,598	98,199	1005,818	760,861

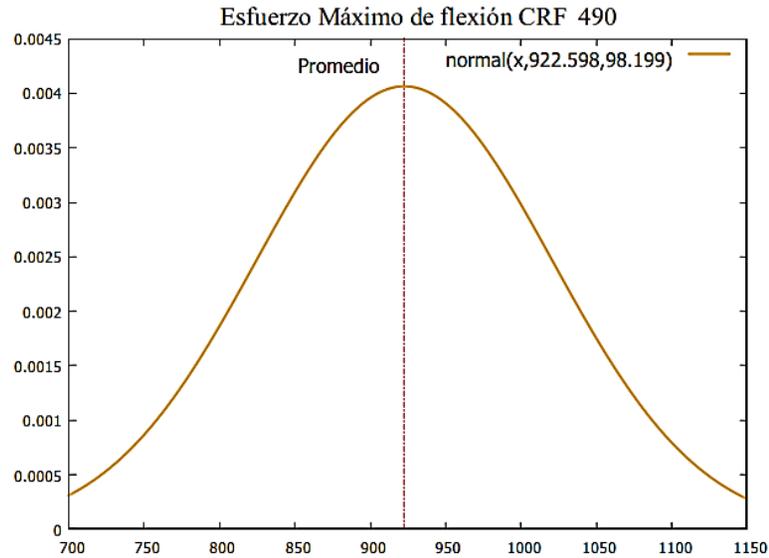


Figura 3.15 Distribución normal de esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 reforzadas de 490 mm.

Esfuerzo Máximo de flexión CRF_640	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	1028,666	46,479	1085,602	957,270

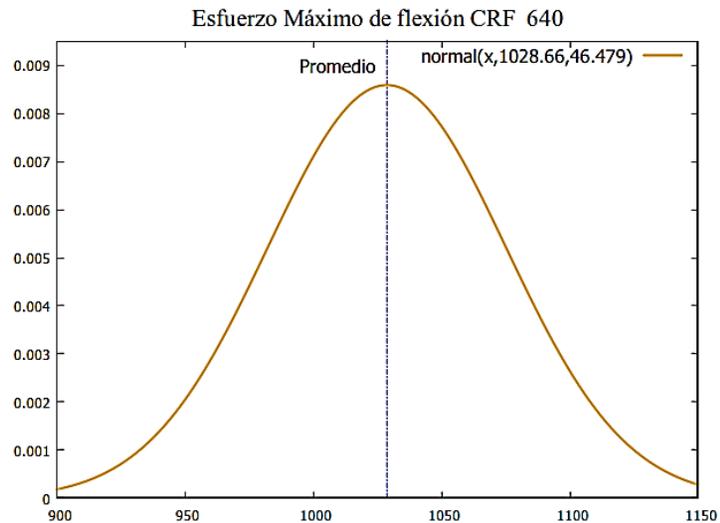


Figura 3.16 Distribución normal de esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 reforzadas de 640 mm.

Esfuerzo Máximo de flexión CRF_790	Limpieza con disco de cerdas de acero			
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo
	893,058	17,996	947,892	866,539

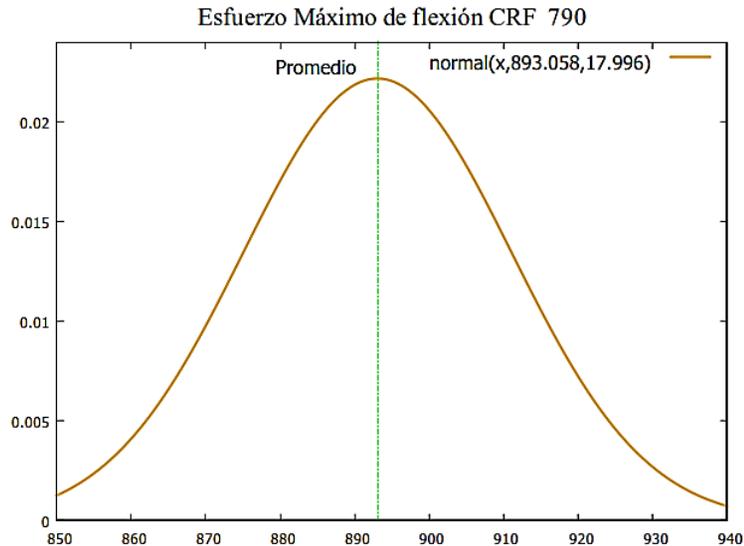


Figura 3.17 Distribución normal de esfuerzo máximo de flexión en probetas de acero A36 reforzadas de 790 mm.

Los valores de distribución que representan las gráficas anteriores muestran una aproximación a la distribución normal de datos, que depende netamente del promedio y desviación estándar .

3.2.1 Comparación de deflexiones

Los datos obtenidos por los métodos de ensayo experimental y elementos finitos, mostradas en las Tablas 3.32 y 3.33, son expresados mediante la diferencia de las deflexiones, de manera que; los valores positivos de diferencia expresan que están bajo los datos obtenidos por método de elementos finitos y los valores negativos de manera inversa.

Se analizó primero las probetas sin reforzamiento; por consiguiente, se tomó como referencia los datos experimentales del ensayo que más se acercó al valor promedio pertenecientes a cada grupo de probeta:

- Probetas sin reforzamiento

Tabla 3.32 Comparación de los resultados obtenidos en probetas sin reforzamiento

Fuerza [kN]	SRF_490_EX	SRF_490_EF	Diferencia	SRF_640_EX	SRF_640_EF	Diferencia	SRF_790_EX	SRF_790_EF	Diferencia
	Deflexión [mm]								
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0.5	0,178	0,474	-0,296	1,467	1,537	-0,070	3,012	3,6811	-0,669
1.0	0,585	1,015	-0,430	2,83	3,031	-0,201	6,918	7,3635	-0,446
1.5	1,05	1,567	-0,517	4,392	4,608	-0,216	10,234	11,046	-0,812
2.0	1,458	2,002	-0,544	5,989	6,094	-0,105	13,281	14,728	-1,447
2.5	1,875	2,448	-0,573	7,413	7,679	-0,265	-	18,411	-
3.0	2,274	2,899	-0,625	10,972	9,275	1,697	-	22,093	-
3.5	2,795	3,353	-0,558	-	10,796	-	-	25,776	-
4.0	3,203	3,863	-0,660	-	12,395	-	-	29,458	-
4.5	3,672	4,317	-0,645	-	14,000	-	-	33,141	-
5.0	5,66	4,828	0,832	-	15,511	-	-	36,823	-
Máx			0,832			1,697			0,00
Min			-0,660			-0,216			-1,447

En las probetas sin reforzamiento de 490, 640 y 790 mm, existe una mayor presencia de diferencia negativa, de manera que los datos obtenidos de forma experimental están sobre los datos mediante el método de elementos finitos, pero no existe una diferencia significativa como se puede observar en la Figura 3.18.

- Probetas con reforzamiento de FCU+ resina Sikadur-30

Tabla 3.33 Comparación de los resultados obtenidos en probetas con reforzamiento

Fuerza [kN]	CRF_490_EX	CRF_490_EF	Diferencia	CRF_640_EX	CRF_640_EF	Diferencia	CRF_790_EX	CRF_790_EF	Diferencia
	Deflexión [mm]								
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,704	0,694	0,010	1,424	2,799	-1,375	4,47	5,122	-0,652
2	1,242	1,624	-0,382	3,49	4,786	-1,296	9,331	13,457	-4,126
3	1,945	2,458	-0,513	5,66	6,200	-0,540	14,47	20,000	-5,530
4	2,613	3,452	-0,839	7,63	8,347	-0,717	24,965	48,544	-23,57
5	3,247	3,987	-0,740	11,128	15,611	-4,483	51,944	77,088	-25,14
6	3,915	4,791	-0,876	18,42	27,893	-9,473	-	105,466	-
7	4,792	6,547	-1,755	29,965	39,544	-9,579	-	161,711	-
8	6,094	7,657	-1,563	46,476	51,195	-4,719	-	228,998	-
9	8,108	10,896	-2,788	-	69,322	-	-	307,698	-
10	10,747	13,874	-3,127	-	91,987	-	-	398,744	-
11	14,505	17,845	-3,340	-	128,551	-	-	494,228	-
12	18,121	21,369	-3,248	-	166,48	-	-	602,787	-
Máx			0.010			0,000			0,000
Mín			-3,340			-9.473			-25,14

Nota: los valores marcados en color rosa corresponden a una zona plástica y esta ocurre después de que se produce el desprendimiento de la fibra.

En las probetas con reforzamiento de 490, 640 y 790 mm, existe una mayor presencia de diferencia negativa, de manera que los datos obtenidos de forma experimental están sobre los datos mediante el método de elementos finitos, como se puede observar en la Figura 3.18. Sí existe una diferencia significativa debido a que se produjo un proceso previo de desbaste y pegado mediante el ajuste controlado por medio de un torquímetro.

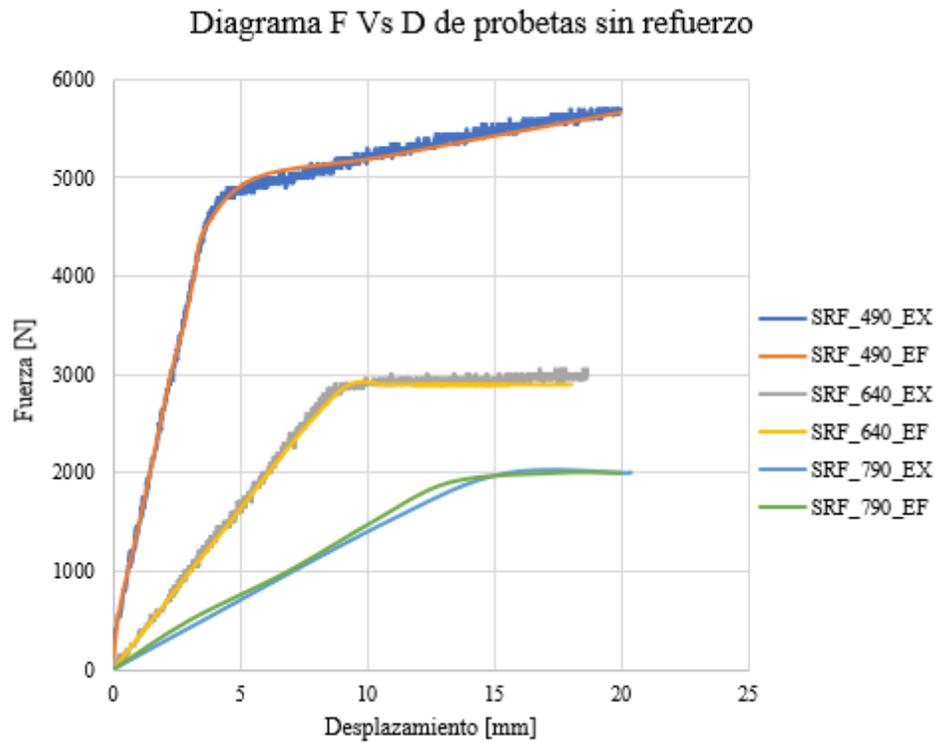


Figura 3.18 Diagrama de comparación de ensayo en probetas de acero sin reforzamiento de 490, 640 y 790 mm.

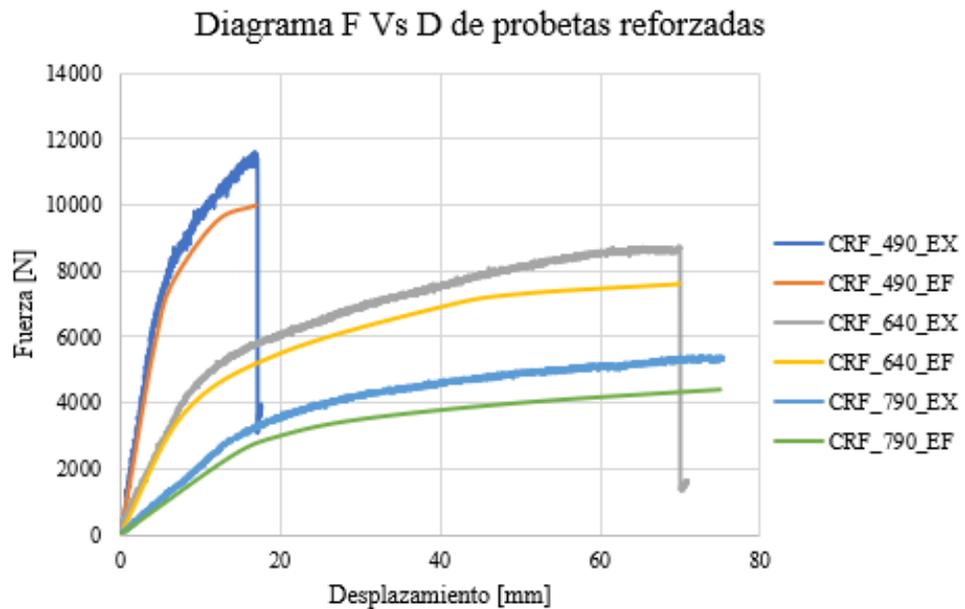


Figura 3.19 Diagrama de comparación de ensayos en probetas de acero con reforzamiento de 490, 640 y 790 mm.

3.3 Verificación de la hipótesis

Al ser este un trabajo de carácter experimental, se utilizó la prueba t de student que generalmente es usada para grupos independientes de un mismo tamaño o muestra, en primer lugar, definimos la hipótesis nula y las alternativas para validarlas:

H₀= el incremento de resistencia a flexión depende del área de contacto influyente

H₁= el incremento de resistencia a flexión no depende del área de contacto influyente

Para poder validar la hipótesis calculamos el valor de t de los esfuerzos máximos de compresión en la zona elástica de los ensayos experimentales realizados en las probetas con reforzamiento para poder compararlo con las probetas sin refuerzo.

Las Tablas 3.34-35, resumen los esfuerzos máximos de flexión correspondientes a los grupos de 490, 640 y 790 mm respectivamente

Tabla 3.34 Cálculo del valor de t de los esfuerzos máximos de flexión.

	Esfuerzos máximos de flexión					
	SRF_490	X_1^2	SRF_640	X_2^2	SRF_790	X_3^2
1	558,216	311605,356	456,205	208122,852	491,171	241248,732
2	506,228	256266,868	490,121	240218,381	502,015	252019,520
3	547,501	299757,846	489,630	239737,319	458,326	210062,571
4	529,690	280571,047	492,119	242180,697	461,665	213134,267
5	542,188	293968,148	505,371	255399,683	470,084	220979,070
Sumatoria		1442169,264		1185658,932		1137444,160
Promedio		536,765		486,689		476,652
Desv. Est		17,818		16,298		17,075
Error estándar		8,909		8,149		8,537

Tabla 3.34 Cálculo del valor de t de los esfuerzos máximos de flexión (continuación).

	SRF_490	SRF_640	SRF_790
Error estándar diferencia	3.6	2.545	2,547
t	13.91	3.944	23.605
Grados de libertad	8		
Nivel de significancia	5%		
Valor crítico en Tablas	2.306		

Seguidamente, comprobamos los valores de t:

Para un área de $490 \times 50 = 24500 \text{ mm}^2$

$$t_{cal} \geq t_{tab}$$
$$13.91 \geq 2.306$$

Para un área de $640 \times 50 = 32000 \text{ mm}^2$

$$t_{cal} \geq t_{tab}$$
$$2.455 \geq 2.306$$

Para un área de $790 \times 50 = 39500 \text{ mm}^2$

$$t_{cal} \geq t_{tab}$$
$$2.547 \geq 2.306$$

Conclusión: se rechaza la hipótesis nula H_0 : el incremento de resistencia a flexión depende del área de contacto influyente.

Tabla 3.35 Cálculo del valor de t de los esfuerzos máximos de flexión.

	Esfuerzos máximos de flexión					
	CRF_490	X_1^2	CRF_640	X_2^2	CRF_790	X_3^2
1	901,409	812537,348	1021,045	1042533,009	947,892	898499,195
2	966,592	934300,909	957,270	916365,134	896,167	803115,836
3	978,308	957087,135	1039,339	1080225,099	884,009	781472,169
4	760,861	578909,112	1085,602	1178531,193	870,682	758087,296
5	1005,818	1011669,987	1040,074	1081754,167	866,539	750890,510
Sumatoria	4294504,490			5299408,602		3992065,005
Promedio	922,598			1028,666		893,058
Desv. Est	87,832			41,572		29,333
Error estándar	43,916			20,786		14,667

Tabla 3.35 Cálculo del valor de t de los esfuerzos máximos de flexión.

	CRF_490	CRF_640	CRF_790
Error estándar diferencia	38.68	14.73	41.39
t	2.74	9.20	0.71
Grados de libertad	8		
Nivel de significancia	5%		
Valor crítico en Tablas	2.306		

Para un área de $490 \times 50 = 24500 \text{ mm}^2$

$$t_{cal} \geq t_{tab}$$

$$2.74 \geq 2.306$$

Para un área de $640 \times 50 = 3200 \text{ mm}^2$

$$t_{cal} \geq t_{tab}$$

$$9.20 \geq 2.306$$

Para un área de $790 \times 50 = 24500 \text{ mm}^2$

$$t_{cal} \geq t_{tab}$$

$$0.71 \leq 2.306$$

Conclusión: se rechaza la hipótesis nula H_0 : el incremento de resistencia a flexión depende del área de contacto influyente.

Por consiguiente, examinamos la hipótesis con los valores obtenidos previamente en los ensayos y presentamos una gráfica caja y bigotes con la finalidad de comparar los esfuerzos máximos de flexión entre las probetas sin refuerzo frente a las probetas reforzadas.

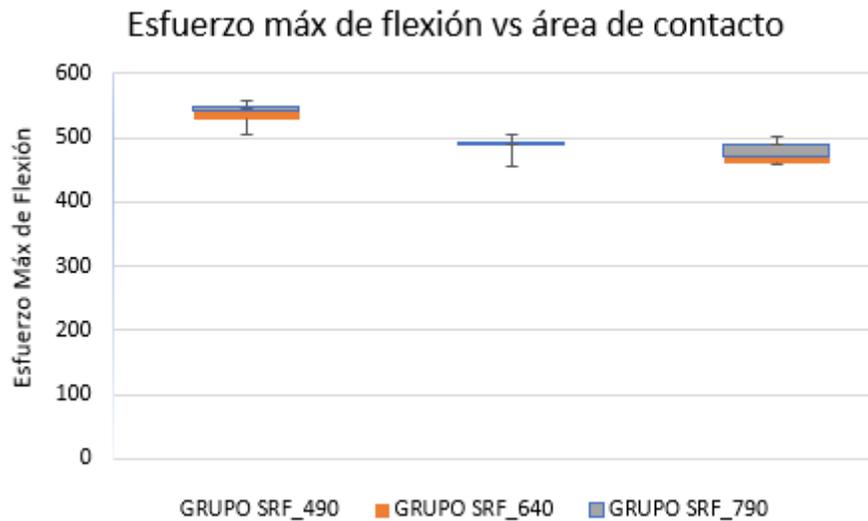


Figura 3.20 Representación del diagrama caja y bigotes con los esfuerzos máximos en las probetas sin refuerzo.

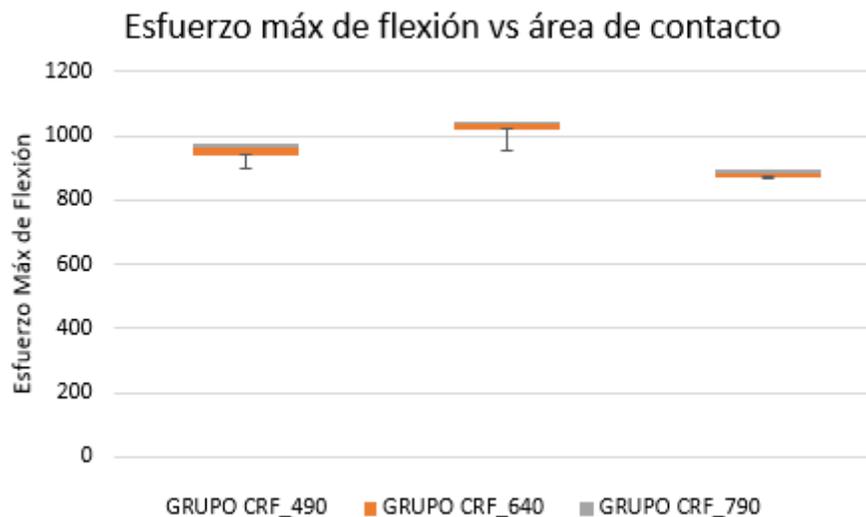


Figura 3.21 Representación del diagrama caja y bigotes con los esfuerzos máximos en las probetas con refuerzo.

CAPÍTULO IV

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se concluye que al realizar probetas reforzadas estas soportan una carga mayor antes de fallar en el ensayo de flexión, evidenciando así que la incorporación de la platina de fibra de carbono aumenta significativamente su capacidad de soportar cargas y flexión, además de presentar menor deformación en la fractura, generando así posibles aplicaciones industriales que utilicen este perfil de anclaje como método de reforzamiento, evidenciando de tal forma que muestran una mejora significativa en la capacidad estructural del material, como una mayor rigidez; es decir, una menor deformación bajo carga en comparación con las probetas de acero sin refuerzo, lo que lo convierte en un material de mayor resistencia y rendimiento.

Es evidente que al realizar el ensayo a flexión en probetas de acero al disminuir el área de contacto o a su vez la distancia entre apoyos, el esfuerzo máximo de flexión tiende a aumentar, sin embargo al añadir un reforzamiento se logró duplicar la resistencia a flexión en cada grupo de probetas, no obstante estos valores de esfuerzo pertenecen a una zona plástica donde el grupo de probetas CRF_790 no tuvo ningún tipo de falla cohesivo ni adhesivo, hasta llegar a la deflexión máxima con un esfuerzo máximo de 893,058 MPa

Se concluye que al ejecutar el ensayo a flexión de tres puntos según la norma ASTM E290-22 se garantiza la consistencia y comparabilidad de los resultados, mediante especificaciones y pautas establecidas por este método, proporcionando así información crucial sobre el comportamiento del material previo a ensayar bajo carga de flexión, permitiendo evaluar la calidad y homogeneidad del proceso de perfil de anclaje de forma que garantice su idoneidad en aplicaciones específicas.

Considero que el análisis por elementos finitos es apropiado para realizar modelados basados en ensayos experimentales, debido a que se obtienen las propiedades reales para poder replicar dicho ensayo, no obstante existe cierta diferencia entre métodos a causa de la implementación de un perfil rugoso y la aplicación de una determinada presión que a su vez son fenómenos físicos que generan incertidumbre en la geometría, sin embargo en los ensayos sin reforzamiento se obtuvo una diferencia mínima de -1.477 mm mientras que en las probetas con reforzamiento se encontró una diferencia máxima 25.14 mm.

Luego del análisis, es importante destacar la preparación de la superficie, tomada de estudios posteriores debido a su influencia en la mejora de la distribución de las tensiones entre el adhesivo y el material adherido, como es el caso de la fibra de carbono unidireccional además reduce la probabilidad de que se formen burbujas de aire atrapadas entre el acero y el adhesivo, debilitando la unión de forma afectando negativamente la resistencia, se usó el tipo de limpieza superficial convencional por disco de cerdas de acero, dándonos una rugosidad promedio de 10.541 μm

Al ejecutar el ensayo de compresión en la resina se comprobó las propiedades compresivas a las 72h determinado por fichas técnicas dando como resultado que tiene una funcionalidad del 86.11% siendo un valor aceptable.

Se concluye que para examinar los datos es necesario de un método estadístico basado en la interpretación de resultados recopilados durante los ensayos, donde se analizó la uniformidad de las propiedades mecánicas frente a lo largo de las muestras ensayadas de forma que permita conocer parámetros como, la carga máxima que el material pueda soportar antes de fracturarse o deformarse significativamente.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda duplicar el procedimiento para el diseño de componentes o la selección de materiales para ciertas aplicaciones, considerando las características y limitaciones del material probado, con el fin de disminuir costos de fabricación en trabajos posteriores.

Se recomienda realizar una pasada en una sola dirección con el cepillo abrasivo a una velocidad aproximada de 0.2 mm/s de cepillado debido a que, una vez anclado la cinta abrasiva, puesto que esta tiene aproximadamente una durabilidad en limpieza de superficie de 1.5 m².

Se recomienda diseñar un sistema similar al del set eléctrico o neumático de acople del disco de cerdas de acero como un adaptador universal para amoladoras que genere alrededor de 2300 rpm, velocidad necesaria para obtener resultados de rugosidad óptimos para un eficiente anclaje entre superficies.

Se recomienda el uso de un compresor para pulverizar los residuos de acero generados en la limpieza de la superficie del área desbastada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Bai, T. C. Nguyen, X. L. Zhao, y R. Al-Mahaidi, "Environment-Assisted Degradation of the Bond between Steel and Carbon-Fiber-Reinforced Polymer", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, n.º 9, p. 04014054, sep. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000951.
- [2] A. Awaludin y D. P. Sari, "Numerical and experimental study on repaired steel beam using carbon fiber reinforced polymer". Gadjah Mada University, Indonesia, 2015.
- [3] F. A. Peña y J. L. Yunapanta, "Propuesta de reforzamiento de vigas de alma llena de puentes metálicos con fibra de carbono y resina epóxica", Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2022.
- [4] C. D. Guerra Chiquito y L. G. Tigmasa Paredes, "Análisis de la resistencia de la junta traslapada simple, entre el acero estructural, resina epóxica y fibra de carbono unidireccional, utilizado para reforzamiento de vigas de acero", Universidad Técnica de Ambato, 2022. Accedido: 2 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/36491>
- [5] J. J. Escobar Altamirano, "Determinación de la resistencia de la junta traslapada simple, entre el acero estructural, resina epóxica y fibra de carbono unidireccional, utilizando métodos de limpieza superficial alternativos", bachelorThesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica, 2023. Accedido: 27 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/38807>
- [6] M. Tavakkolizadeh y H. Saadatmanesh, "Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets", *J. Struct. Eng.*, vol. 129, n.º 1, pp. 30-40, ene. 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:1(30).
- [7] FHWA Federal Highway Administration, "Puentes y Estructuras", *U.S Department of Transportation*. <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/> (accedido 22 de mayo de 2023).
- [8] Specifications for the National Bridge Inventory, 2022.
- [9] D. C. Sánchez, "Algunas reflexiones acerca de la rehabilitación estructural sismorresistente de puentes", *Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)*, vol. 3, 2016.

- [10] Instituto para el Ecodesarrollo Regional Amazónico, "Programa de puentes para la circunscripción territorial especial amazónica". 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.secretariadelamazonia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/11/Proy_Programa_Puentes_CTEA.pdf
- [11] S. Selvaraj y M. Madhavan, "Retrofitting of steel beams using low-modulus carbon fiber reinforced polymer laminates", *J. Constr. Steel Res.*, vol. 167, p. 105825, abr. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105825.
- [12] W. Li, S. Li, X. Li, y T. Zhu, "Study of the Tensile Properties of CFRP Strengthened Steel Plates", *Polymers*, vol. 7, n.º 12, pp. 2595-2610, dic. 2015, doi: 10.3390/polym7121537.
- [13] H. Ju, S. J. Lee, S. M. Choi, J. R. Kim, y D. Lee, "Applicability of Hybrid Built-Up Wide Flange Steel Beams", *Metals*, vol. 10, n.º 5, p. 567, abr. 2020, doi: 10.3390/met10050567.
- [14] A. N. Gastelum, M. S. Hernández, B. Gonzalez, Y. Vega, y I. M. Muñoz, "Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica", *Matér. Rio Jan.*, vol. 23, n.º 2, jul. 2018, doi: 10.1590/s1517-707620180002.0428.
- [15] K. Shirvanimoghaddam, S. U. Hamim, M. K. Akbari, y et al, "Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties", *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 92, pp. 70-96, ene. 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.10.032.
- [16] M. H. Seleem, I. A. Sharaky, y H. E. M. Sallam, "Flexural behavior of steel beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer plates – Three dimensional finite element simulation", *Mater. Des.*, vol. 31, n.º 3, pp. 1317-1324, mar. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.09.010.
- [17] Y. Davydenko, O. Horb, y Y. Avramenko, "Adhesive-Bonded Joint Influence on Deflection of Composite Steel and Concrete Beams with Strengthening by External Steel Reinforcement", *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, n.º 3.2, p. 349, jun. 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.2.14551.
- [18] J.-H. Kim, D.-J. Kwon, K. L. DeVries, y J.-M. Park, "Innovative Effects on GFRP Inserted Epoxy Adhesives with Different Thicknesses for Bonding in Two-Part Wind Turbine Blades", *Fibers Polym.*, vol. 23, n.º 11, pp. 3197-3206, nov. 2022, doi: 10.1007/s12221-022-0447-1.

- [19] N. N. Bhaskar y M. K. Venkatesh, "Stress Analysis of Single Lap Joint Using Al 6063 and GFRP as Adherents with Bond 108 as Adhesive", *J. Inst. Eng. India Ser. D*, feb. 2023, doi: 10.1007/s40033-023-00452-3.
- [20] Y. Wang, F. Wang, Q. Xu, y et al, "Design and Analysis of a Novel Carbon Fiber Reinforced Polymer Sandwich Adhesive Joint", *Appl. Compos. Mater.*, mar. 2023, doi: 10.1007/s10443-023-10113-z.
- [21] M. Noeske, W. L. Cavalcanti, H. Brüning, B. Mayer, y et al, "Introduction to Recent Advances in Quality Assessment for Adhesive Bonding Technology", en *Adhesive Bonding of Aircraft Composite Structures : Non-destructive Testing and Quality Assurance Concepts*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1-50. doi: 10.1007/978-3-319-92810-4_1.
- [22] Q. Fu y B. Han, "Bridge vibration monitoring system based on vibrating-wire sensor and ZigBee technologies", en *9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, Guangzhou, may 2017, pp. 338-342. doi: 10.1109/ICCSN.2017.8230131.
- [23] J. Rendón, "Reforzamiento y Actualización Sísmica de Estructuras", *SIKA*, 2016.
- [24] E. Raigosa, "Técnicas de reforzamiento de estructuras construidas de concreto que presentan deficiencias estructurales", *Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería en Construcción*, 2010.
- [25] W. D. Callister, *Materials science and engineering: an introduction*, 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [26] R. P. L. Nijssen, *Composites Materials an Introduction*, 1ra ed. Inholland University of Applied Sciences, 2015.
- [27] Z. T. AbiD y H. J. Abdulsamad, "Mechanical Specification Review of Composite Materials and its Applications", *H J*, 2022.
- [28] Y. U. Medhane y P. Talmale, "Comparative Analysis of Composite Materials by Using Finite Element Method", *Int. J. Eng. Res.*, vol. V6, n.º 08, p. IJERTV6IS080173, ago. 2017, doi: 10.17577/IJERTV6IS080173.
- [29] B. D. Agarwal y L. Broutman, "Analysis and performance of fiber composites», *Wiley*, 2006.

- [30] Cotton Incorporated, "Textile Fibers", *America's Cotton Producers And Importers*, 2013.
- [31] M. J. Bin, "Studies on the properties of woven natural fibers reinforced unsaturated polyester composites", *University Sains Malaysia*, 2008.
- [32] C. Elanchezhian, B. V. Ramnath, y J. Hemalatha, "Mechanical Behaviour of Glass and Carbon Fibre Reinforced Composites at Varying Strain Rates and Temperatures", *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, pp. 1405-1418, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.120.
- [33] K. Morita, Y. Murata, A. Ishitani, K. Murayama, T. Ono, y A. Nakajima, "Characterization of Commercially Available PAN (Polyacrylonitrile)-Based Carbon Fibers". De Gruyter. doi: 10.1515/iupac.58.0009.
- [34] A. Miravete, *Materiales compuestos Tomo I*, vol. 1. Barcelona: REVERTÉ S.A., 2012.
- [35] D. Lewis, "Interlaminar Reinforcement of Carbon Fiber Composites from Unidirectional Prepreg Utilizing Aligned Carbon Nanotubes", *Massachusetts Institute of Technology*, p. 15, 2016.
- [36] E. H. Bashra, M. I. Mansor, y M. A. Mohammed, "Manufacturing Technology of Composite Material Structure", Sudan University of Science and Technology, Sudán, 2017.
- [37] F. M. Garitano, *Mecánica de laminados composites*. España: Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, 2011.
- [38] M. W. Hyer, *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*. Boston: Mc Graw-Hill, 1998.
- [39] R. G. Ledesma, "Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales", Universidad Politécnica de Madrid, 2013. doi: 10.20868/UPM.thesis.22235.
- [40] X. R. Ramon, "Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos avanzados en la construcción de edificios industriales", Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica de Terrasa, Terrasa, 2005.

- [41] V. C. Luna, "Tipos de uniones", *Revista digital para profesionales de la enseñanza*, nov. 2009.
- [42] I., *Diseño de uniones*, vol. tomo 13. Guipuzcoa: Instituto técnico de la estructura en acero, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/26367453-Diseno-de-uniones-instituto-tecnico-de-la-estructura-en-acero-itea.html>
- [43] M. Singh y V. Singh, "Application of Mechanical Joints in Fiber- Reinforced Composite Laminates", *Jerit*, vol. 6, n.º 3, mar. 2019.
- [44] E. M. Petrie, *Handbook of adhesives and sealants*. Mc Graw - Hill Handbook, 1999.
- [45] I. A. S., *Pocket guide on adhesive bonding*. Nacka: Atlas Copco, 2020.
- [46] M. Madrid, "Tecnología de la adhesión", *Departamento Técnico de Loctite España*, 2009.
- [47] R. G. Budynas J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9na ed. Mc Graw-Hill, 2012.
- [48] R. L. Peaslee y R. L. Holdren, *Brazement Desing*, 5Th edition. AWS Brazing Handbook, 2007. Accedido: 25 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpBHE0001J/cid:kt0095WEU1/viewerType:khtml/root_slug:brazing-handbook-5th/url_slug:stress-distribution?b-q=stress%20distribution%20in%20joints&include_synonyms=no&sort_on=default&page=13&view=collapsed&zoom=1&q=stress%20distribution%20in%20joints
- [49] K. K. Chawla, *Composite materials*, 3rd edition. Birmingham: Springer, 2013.
- [50] West system Epoxy, "Manual del usuario y guía de producto", *Gougeon Brothers, Inc*, 2016.
- [51] D. Schnerch, K. Stanford, E. Sumner, y et al, "Strengthening Steel Structures and Bridges with High-Modulus Carbon Fiber-Reinforced Polymers Resin Selection and Scaled Monopole Behavior", *Transp. Res. Rec.*, vol. 1892, ene. 2004, doi: 10.3141/1892-25.
- [52] CYM Materiales S.A., "Preparación de Superficie - Norma SSPC", Santa Fé, ago. 2015.

- [53] Montipower, "Bristle blasting powertools". Monti, octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://cointoindustrial.com/wp-content/uploads/2021/04/catalogo-monti-espanol.pdf>
- [54] I. Zulkarnain, N. A. Mohamad, M. I. Syakir, y et al, "Sustainability-Based Characteristics of Abrasives in Blasting Industry", *Sustainability*, vol. 13, n.º 15, Art. n.º 15, ene. 2021, doi: 10.3390/su13158130.
- [55] SAIF, "Abrasive blasting". junio de 2022.
- [56] Keyence, "Introduction to Surface Roughness Measurement", 2012.
- [57] Norma Din 4768. Determinación de los valores de rugosidad con aparatos eléctricos de palpado, *Universidad Politécnica de Cartagena*, 2007, [En línea]. Disponible en: https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/135/A4_DETERMINACION+DE+RUGOSIDAD.pdf?sequence=9
- [58] UNE-EN-ISO 1302:2002, "Especificación Geométrica de Productos. Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos.", 2015.
- [59] J. S. Barrero, "Evaluación de parámetros de la rugosidad superficial obtenida del proceso de fresado para aleaciones de aluminio 7075 usando diseño experimental", Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10424/T08101.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- [60] Proscan 2000, "Roughness Measurement A Guide V2", 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/Engineering/Roughness-Guide-V2.pdf>
- [61] X. Liu, M. A. Bradford, Q. J. Chen, y H. Ban, "Finite element modelling of steel-concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors", *Elsevier*, oct. 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2015.09.004>.
- [62] K. N. Antin, A. Laukkanen, T. Andersson, D. Smyl, y P. Vilaça, "A Multiscale Modelling Approach for Estimating the Effect of Defects in Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites", *MDPI*, 2019, doi: [doi:10.3390/ma12121885](https://doi.org/10.3390/ma12121885).

- [63] M. M. Quispe, "Formulación de elementos finitos y elementos discretos", C.I.M.A.T. y C.I.M.N.E., Barcelona, 2013. [En línea]. Disponible en: https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/468/1/TE_1523.pdf
- [64] F. L. Matthews, Ed., *Finite element modelling of composite materials and structures*. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [65] M. V. Melconian, *Modelagem Numérica e Computacional com Similitude e Elementos Finitos: Desenvolvimento de Equação Preditiva para o Cálculo da Força de Retenção em Freios de Estampagem*. Editora Blucher, 2014.
- [66] S. Fawzia, R. Al-Mahaidi, y X. L. Zhao, "Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP", *Compos. Struct.*, vol. 75, n.º 1, pp. 156-162, sep. 2006, doi: 10.1016/j.compstruct.2006.04.038.
- [67] F. M. Guzhñay Miranda, "Estudio del comportamiento del acero A36 mediante ensayos de tracción para determinar fallas en elementos estructurales, mediante la norma ASTM E-8", bachelorThesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Mecánica., Ambato, 2012. Accedido: 18 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/3035>
- [68] Sika, "Sikadur®-30 adhesivo para pegado de refuerzo", n.º 03, oct. 2018, [En línea]. Disponible en: https://ecu.sika.com/dms/getdocument.get/64b63b86-f147-447e-9a71-ef6ee853b0f4/sikadur_-30.pdf
- [69] I. ASTM D695, "Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics", ASTM International. doi: 10.1520/D0695-15.
- [70] I. ASTM, "Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility". <https://www.astm.org/e0290-22.html> (accedido 15 de mayo de 2023).

ANEXOS



Designation: E290 – 22

Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility¹

This standard is issued under the fixed designation E290; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover bend testing for ductility of materials. Included in the procedures are four conditions of constraint on the bent portion of the specimen; a guided-bend test using a mandrel or plunger of defined dimensions to force the mid-length of the specimen between two supports separated by a defined space; a semi-guided bend test in which the specimen is bent, while in contact with a mandrel, through a specified angle of bend or to a specified inside radius of bend (r) measured while under the bending force; a free-bend test in which the ends of the specimen are brought toward each other, but in which no transverse force is applied to the bend itself and there is no contact of the concave inside surface of the bend with other material; a bend-and-flatten test, in which a transverse force is applied to the bend such that the legs make contact with each other over the length of the specimen.

1.2 After bending, the convex surface of the bend is examined for evidence of a crack or surface irregularities. If the specimen fractures, the material has failed the test. When complete fracture does not occur, the criterion for failure is the number and size of cracks or surface irregularities visible to the unaided eye occurring on the convex surface of the specimen after bending, as specified by the product specification. Any cracks within one thickness of the edge of the specimen are not considered a bend test failure. Cracks occurring in the corners of the bent portion shall not be considered significant unless they exceed the size specified for corner cracks in the product specification.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard. Inch-pound values given in parentheses were used in establishing test parameters and are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appro-*

priate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

1.5 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing
E8/E8M Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

E190 Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Refer to Terminology E6 for the definitions of bend test, ductility and springback.

3.1.1 *guided bend, n*—the bend obtained by using a mandrel to guide and force the portion of the specimen being bent between two faces of a die.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *angle of bend, n*—the change in the angle between the two legs of the specimen during a bend test, measured before release of the bending forces, unless otherwise specified.

3.2.2 *bend-and-flatten bend, n*—the bend obtained by compressing the legs of a 180° bend between platens until the legs of the bend contact.

3.2.3 *crack, n*—a nominally two-dimensional defect caused by the bend test that extends primarily from the surface of the test specimen to its interior.

3.2.3.1 *Discussion*—Different disciplines characterize and describe cracks using different, specific terminology. The terminology of a specification that cites E290 shall always be followed instead of any crack terminology defined here.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E28.02 on Ductility and Formability.

Current edition approved June 15, 2022. Published September 2022. Originally approved in 1966. Last previous edition approved in 2014 as E290 – 14. DOI: 10.1520/E0290-22.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard