



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño de una junta adhesiva para el ensamble de un prototipo de chasis monoplaza serie kart

Daniel Alejandro Portilla Enriquez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia
2022

Diseño de una junta adhesiva para el ensamble de un prototipo de chasis monoplaza serie kart

Daniel Alejandro Portilla Enriquez

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería- Ingeniería Mecánica

Director:

Germán Leonardo García Monsalve, PhD.

Codirector:

Nelson Antonio Vanegas Molina

Línea de Investigación:

Diseño de uniones adhesivas

Grupo de Investigación:

Diseño Mecánico Computacional (DIMEC)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Mecánica

Medellín, Colombia

2022

Dedicatoria

*A mis padres Jorge y Mercedes, por su sacrificio para darme todo el apoyo, que a pesar de la distancia siempre me dan un aliento para continuar persiguiendo mis sueños. Mis hermanos Andrés y Lina quienes son mi motor para seguir adelante. Mi sobrina Julitica, que desde el cielo me cuida y me guía. A toda mi familia por creer en mí.
Gracias Dios, padre celestial por sus inmensas bendiciones.*

Agradecimientos

Agradecimientos especiales al grupo de investigación DIMEC, sus integrantes docentes y estudiantes de pregrado en ingeniería mecánica, por todo el trabajo en equipo para sacar las ideas adelante. Al Laboratorio de Procesos de Manufactura y quienes forman parte de este, técnicos operarios y al director en su momento Nelson Vanegas Molina por todo el apoyo en recursos físicos y equipos durante toda la investigación.

Muy agradecido con mi asesor de tesis, PhD. Germán García, docente del Departamento de Ingeniería Mecánica, por su acompañamiento, dedicación, gestión y aporte intelectual en todo momento de esta investigación.

Agradezco al Ingeniero Luis Gil, laboratorista del Laboratorio de Procesos de Manufactura e investigador del grupo de Investigación DIMEC, quien me acompañó y aportó grandemente a mi formación académica e intelectual. Mil gracias a todos.

Resumen

Se presentan los resultados obtenidos de una investigación experimental, relacionada con el diseño y fabricación de uniones adhesivas anaeróbicas ensamblada en un chasis tubular de un vehículo monoplace de competencia go kart, normalizado según la norma CIK/FIA, para determinar la influencia de algunos parámetros de diseño (material de los sustratos, espesor/volumen del adhesivo, parámetro de rugosidad superficial y longitud de la unión) en la resistencia mecánica de la unión a torsión.

La selección de los puntos de unión con ensamble adhesivo, requirió la evaluación del comportamiento mecánico estructural del chasis y se utilizó el análisis por elementos finitos como herramienta de diseño para establecer el estado de esfuerzos cuyos valores máximos de 72.2 MPa se concentraron en las zonas cercanas a los ejes del kart donde fueron seleccionados seis nodos para los ensambles adhesivos.

Se propuso una metodología para la construcción y ensamble del chasis consistente en cinco etapas que incluyen desde el diseño y manufactura de la junta adhesiva cilíndrica hasta el ensamble de los elementos del chasis. Los parámetros geométricos seleccionados para el diseño de la unión adhesiva fueron; rugosidad de 1.5 μm , longitud de traslape de 16 mm, espesor adhesivo 0.3 mm. Se utilizó un adhesivo anaeróbico comercial Loctite 648 en un proceso de curado a temperatura entre los 80°C y 100°C por 1 hora.

Finalmente, la evaluación de la resistencia mecánica de la unión adhesiva se apoyó en un diseño experimental factorial 2^k , dos factores con dos niveles y se manufacturan probetas previamente diseñadas para las uniones adhesivas que se someten a ensayos destructivos a cargas de torsión cuasi estáticas, obteniendo una resistencia máxima a torsión de 29 Nm.

Palabras clave: Uniones híbridas, junta adhesiva, resistencia a torsión, Chasis go kart, ensayos destructivos.

Abstract

Design of an adhesive joint for the assembling a chassis prototype single-seater kart series

The results obtained from an experimental investigation are presented, related to the design and manufacture of anaerobic adhesive joints assembled on a tubular chassis of a single-seater go kart competition vehicle, standardized according to the CIK/FIA standard, to determine the influence of some design parameters (substrate material, thickness/adhesive volume, parameter of surface roughness and length of the joint) on the mechanical resistance of the joint to torsion. The selection of the joint points with adhesive assembly required the evaluation of the structural mechanical behavior of the chassis and finite element analysis was used as a design tool to establish the stress state whose maximum values of 72.2 MPa were concentrated in the nearby areas to the kart axles and six nodes were selected for the adhesive assemblies.

A methodology was proposed for the construction and assembly of the chassis consisting of five stages from design and manufacture of the cylindrical adhesive joint to assembly of the chassis elements. The geometric parameters selected for the joint design were: roughness of 1.5 μm , overlap length of 16 mm, adhesive thickness of 0.3 mm. A Loctite 648 commercial anaerobic adhesive was used with a curing process at a temperature between 80°C and 100°C for 1 hour. Finally, the evaluation of the mechanical strength for the adhesive joint was based on a 2^k factorial experimental design, two factors with two levels and previously designed specimens for the adhesive joints were manufactured and subjected to destructive tests at quasi-static torsional loads, obtaining a maximum torsional strength of 29 Nm.

Keywords: Hybrid joints, Adhesive joint, torsional strength, Go kart chassis, destructive tests.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVI
Introducción.....	17
1. Marco teórico.....	23
1.1 Conceptos generales sobre uniones adhesivas	23
1.1.1 Definición de unión adhesiva	23
1.1.2 Clasificación de los adhesivos	24
1.1.3 Características de las uniones adhesivas	26
1.1.4 ¿Cómo se forma la unión?.....	27
1.2 Teorías de la adhesión	28
1.2.1 El modelo de adhesión mecánica	29
1.2.2 Teoría de la difusión	30
1.2.3 Teoría eléctrica	31
1.2.4 Teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial.....	32
1.3 Mecanismos de falla en uniones adhesivas	34
1.4 Rugosidad media y parámetro de medida	35
1.5 Generalidades de un vehículo monoplaza go kart	35
1.5.1 Chasis.....	36
1.5.2 Fuerzas presentes en el chasis	37
1.6 Reglamentación CIK/FIA-2022	39
1.7 Metodología general de análisis mecánico mediante FEA (Análisis Elementos Finitos)	40
1.7.1 Pre-procesamiento.....	40
1.7.2 Procesamiento.....	40
1.7.3 Post- procesamiento.....	41
2. Estado del arte.....	42
2.1 Comportamiento mecánico de un chasis monoplaza	42
2.2 Parámetros geométricos que influyen en la resistencia mecánica de la unión adhesiva	46
3. Materiales y métodos	55
3.1 Cálculo de los esfuerzos sobre el chasis	55
3.1.1 Determinación de cargas	57
3.1.2 Análisis estructural del chasis mediante FEA.....	58

3.2 ... Metodología para la construcción y ensamble del chasis con uniones adhesivas	60
3.2.1 Etapa de definición	61
3.2.2 Etapa de medición	61
3.2.3 Etapa de diseño de la unión adhesiva sobre el chasis	62
3.2.4 Etapa de corte y doblado	67
3.2.5 Etapa de ensamble	69
3.3 Parte experimental.....	70
3.3.1 Diseño experimental	71
3.3.2 Proceso de manufactura de probetas	73
3.3.3 Ensamble unión adhesiva	75
3.3.4 Realización de pruebas de torsión	78
4. Resultados y Análisis	80
4.1 Estudio elementos finitos para evaluación de cargas en el chasis	80
4.2 Prototipo de chasis	82
4.3 Resultados de las pruebas de torsión pura sobre las uniones adhesivas	83
4.3.1 Análisis de varianza (ANOVA)	85
4.3.2 Modelo de regresión del diseño factorial	88
4.3.3 Resultados de las pruebas de torsión	90
4.3.4 Evaluación de las probetas falladas en la prueba a torsión.....	93
4.4 Segunda parte de ensayos a torsión pura	97
5. Conclusiones y recomendaciones.....	101
5.1 Conclusiones	101
5.2 Recomendaciones	103
Bibliografía.....	105

Lista de figuras

Figura 1-1: Elementos estructurales que forman un ensamble de una unión adhesiva [27].	23
Figura 1-2: Disciplinas influyentes en el estudio de la junta adhesiva.	27
Figura 1-3: Fuerzas de unión en la junta adhesiva [27].	28
Figura 1-4: Modelo de adhesión mecánica [28].	29
Figura 1-5: Mecanismo de interdifusión de las moléculas de los planos superficiales [28].	30
Figura 1-6: Adhesión electrostática [28].	31
Figura 1-7: Relación entre la energía superficial de las fases del sólido y líquido en estado de equilibrio termodinámico de una gota de líquido en contacto con una superficie sólida.	32
Figura 1-8: Mecanismos de falla de las uniones adhesivas.	34
Figura 1-9: Grafica de Ra para la medición de acabado.	35
Figura 1-10: Vehículo monoplace go kart según la norma CIK/FIA [13].	36
Figura 1-11: Chasis de un go kart [13].	37
Figura 2-1: Resultado de esfuerzos en torsión en condiciones estáticas [15].	43
Figura 2-2: Resultado de esfuerzos para una condición dinámica con aceleración [15].	44
Figura 2-3: Estudio estático de chasis go kart evidenciando las porciones con mayores esfuerzos equivalentes de <i>Von Mises</i> [8].	44
Figura 2-4: Representación de esfuerzos para una condición de aceleración y deceleración en una trayectoria lineal.	45
Figura 2-5: Representación de los esfuerzos para una condición de movimiento con aceleración lateral por la derecha e izquierda.	46
Figura 2-6: Ensamble anillo-adhesivo eje de acero AISI 4140, niveles de rugosidad [22].	47
Figura 2-7: Etapas propuestas para el proceso del diseño óptimo de una junta de chasis tubular [40].	49
Figura 2-8: Parámetros geométricos, carga y condiciones de frontera del MEF propuesto por Labbe [40].	49
Figura 2-9: Ensamble de junta adhesiva tipo pasador- anillo utilizada por Gil [23].	51
Figura 2-10: Caracterización de las condiciones mínima y máxima de la junta adhesiva para evaluar el diseño de la unión adhesiva [23].	51
Figura 2-11: (a) Suspensión delantera de motocicleta con eje de dirección acoplada a la horquilla; (b) montaje acoplamiento para la prueba a tracción de la unión adhesiva [43].	53
Figura 2-12: Tendencia de la fuerza en desacoplamiento del ensamble acero-aluminio [43].	54

Figura 3-1: Diagrama bidimensional del kart para transferencia longitudinal de peso ...	56
Figura 3-2: Proceso para la realización de un análisis de esfuerzos mediante FEA.	59
Figura 3-3: Modelado CAD del chasis.	59
Figura 3-4: Metodología para la construcción y ensamble de un chasis vehicular con uniones híbridas [50].	60
Figura 3-5: Caracterización de los nodos seleccionados: 6 puntos en el chasis; diámetro de la tubería de 32 mm; espesor de la tubería de 3 mm; ángulos de diseño en zona delantera de 60.6°, en zona media de 66.9° y en zona trasera de 73.9°.	61
Figura 3-6: (a) planos de diseño de la unión 1; (b) unión 2; (c) la unión 3 sobre el chasis go kart.	63
Figura 3-7: Secuencia de fabricación de prototipos en impresora 3D previo al maquinado de la unión cilíndrica a utilizar en el diseño de la unión adhesiva.	65
Figura 3-8: Ubicación del bloque del polímero Nylon en el MS de la CNC.....	66
Figura 3-9: Mecanizado en CNC de la unión de material polímero Nylon para el ensamble adhesivo.	67
Figura 3-10: Preparación de extremos de tubería.....	67
Figura 3-11: Preparación de extremos de tubería para el ensamble.....	68
Figura 3-12: Ensamble de la tubería y la unión cilíndrica con el adhesivo anaeróbico...	69
Figura 3-13: Ensamble de uniones con soldadura.....	70
Figura 3-14: Diagrama identificación del diseño experimental estadístico ideal para la correlación de variables.....	71
Figura 3-15: Probetas de prueba para la unión adhesiva. Izquierda sustrato A: macho; Derecha sustrato B: hembra (tubería acero).....	74
Figura 3-16: Medición y control de los parámetros de rugosidad superficial en las probetas de la unión adhesiva con medición del sustrato macho.	75
Figura 3-17: Matriz de ensamble para las 12 probetas del diseño experimental $2k$, previo al proceso de curado de las uniones adhesivas.	76
Figura 3-18: Proceso de ensamble de las probetas. Se requiere de un espacio limpio, uso de guantes de látex para evitar suciedades en las probetas, una jeringa para medir y controlar el volumen del adhesivo anaeróbico comercial referencia Loctite 648.	77
Figura 3-19: Proceso de curado de las probetas. Se utiliza un horno eléctrico, se controla la temperatura de 80°C por 1 hora, y luego se deja en reposo por 24 horas a temperatura ambiente.	77
Figura 3-20: Sujeción de la probeta en el dispositivo para los ensayos de torsión.....	79
Figura 4-1: Resultado análisis estático del chasis.	80
Figura 4-2: CAD en <i>SolidWorks</i> y caracterización de los nodos seleccionados.....	81
Figura 4-3: Ensamble de unión con elementos de tubería, donde se proporciona dos grados de libertad de la tubería.	82
Figura 4-4: Prototipos de chasis ensamblados con uniones adhesivas.	83
Figura 4-5: Análisis de dispersión para los datos de resistencia mecánica a torsión a partir del diseño de experimentos factorial $2k$	85
Figura 4-6: Superficies de respuesta y de contorno para las interacciones significativas (material sustrato-volumen adhesivo) y su influencia en la resistencia mecánica.	89

Figura 4-7: Gráfica de probabilidad normal, histograma, valores predecibles y orden de observación de los residuos para validar los resultados del diseño factorial $2k$	89
Figura 4-8: Resistencia a la falla por torsión para ensambles con sustratos Acero-Acero y representación de su curva promedio.....	91
Figura 4-9: Comportamiento resistencia falla para combinación de Acero-Dura Aluminio.	92
Figura 4-10: Ensayos de torsión en probetas acero-adhesivo-acero con torque 40 ($N \cdot m$).	94
Figura 4-11: Fallas adhesivas sobre sustrato de Dura Aluminio en comparación con Acero durante pruebas de torsión.....	95
Figura 4-12: Fallas mixtas sobre sustratos de tubería estructural acero ASTM A-36.	95
Figura 4-13: Falla adhesiva en la superficie del sustrato Dura Aluminio con parámetro de rugosidad superficial $Ra = 1.5 \mu m$., aumento 60X.	97
Figura 4-14: Sustratos de acero (hembra) y de Dura Aluminio (macho) para el ensamble de probetas de torsión con parámetro $Ra = 3 \mu m$ y $Ra = 6 \mu m$	98
Figura 4-15: Torque de falla para uniones Acero-Dura Aluminio con valores del parámetro de rugosidad $Ra = 3 \mu m$ y $Ra = 6 \mu m$	100

Lista de tablas

Tabla 2-1: Fuerzas y distribución del peso en comportamiento estático [15].	42
Tabla 2-2: Fuerzas y distribución del peso con condición de aceleración lineal [15].	43
Tabla 3-1: Dimensiones generales chasis go kart.	55
Tabla 3-2: Propiedades mecánicas del acero ASTM-A36.	60
Tabla 3-3: Datos para la matriz de experimentos para el diseño de factorial 2^2 .	72
Tabla 3-4: Orden y combinación de las probetas obtenidas mediante el programa <i>Minitab</i> .	72
Tabla 3-5: Propiedades de los materiales de las probetas (sustrato A y sustrato B).	74
Tabla 3-6: Volumen de adhesivo a utilizar en el ensamble de las probetas.	76
Tabla 3-7: Características técnicas del dispositivo utilizado para los ensayos de torsión.	78
Tabla 4-1: Matriz de diseño experimental 2^k con resultados de resistencia mecánica a torsión pura para cada una de las 12 pruebas.	84
Tabla 4-2: Análisis de varianza ANOVA, coeficientes R^2 y R_{aj}^2 estimados e influencia en la resistencia por torsión según el “valor p”, para el factor significativo de material.	86
Tabla 4-3: Segundo análisis ANOVA, coeficientes R^2 y R_{aj}^2 estimados e influencia en la resistencia por torsión según el “valor p”, para el factor significativo de material.	87
Tabla 4-4: Torque de falla, desplazamiento angular y tiempo de prueba para un segundo diseño de experimentos con sustratos (Acero-Dura Aluminio) variando el parámetro de rugosidad $R_a = 3 \mu\text{m}$ y $R_a = 6 \mu\text{m}$.	99
Tabla 4-5: Torque de falla en la región experimental al variar el parámetro de rugosidad R_a de la unión adhesiva en sustratos Acero (hembra) y Dura Aluminio (macho).	99

Introducción

Es evidente el uso acelerado de ensambles adhesivos en múltiples aplicaciones de ingeniería para diferentes sectores industriales. En particular, en el sector automotriz se buscan vehículos eficientes, de bajo consumo energético, livianos, seguros, confiables, con buen comportamiento estructural en relación con algunas de las propiedades mecánicas como la rigidez y resistencia [1, 2, 3, 4]. Los requerimientos de diseño exigen el uso de diferentes tipos de materiales, en particular, se dispone de materiales compuestos con matriz polimérica de alta resistencia y baja densidad, aleaciones metálicas ligeras a base de aluminio y magnesio, aceros de alta resistencia mecánica [5], los cuales podrían cumplir con algunas características de diseño requeridas para mejorar el comportamiento mecánico de los sistemas de unión de los materiales. Esta investigación ha permitido incursionar en un campo poco explorado relacionado con el diseño de uniones adhesivas, dadas las exigencias de resistencia mecánica que requiere el diseño de las estructuras de vehículos de transporte ligero, sin embargo, se percibe un gran potencial de aplicación, debido a los avances tecnológicos. En particular, en este proyecto se pretende incursionar en el diseño de una junta adhesiva para el ensamble de un prototipo de chasis monoplaza serie kart con fines de aportar y fortalecer conocimientos en el área de uniones adhesivas con diferentes materiales.

Los vehículos monoplazas de la serie go kart caracterizados como vehículos de competencia de alta velocidad, según la normativa CIK/FIA, regulador de estas competencias, no permite el montaje de elementos tipo suspensión en el go kart; es decir, que se dispone de elementos con naturaleza elástica o de acoplamiento, durante la operación del vehículo. En este sentido, el diseño tradicional, para los chasis de estos vehículos, típicamente, utilizan uniones soldadas que caracterizan la naturaleza de la estructura como rígida, sometiendo los elementos de la unión a cargas y esfuerzos variables que se concentran en dichos puntos de unión [6, 7, 8, 9, 10, 11]. En consecuencia, las uniones de dichos elementos mecánicos carecen de sistemas de amortiguamiento y de absorción de energía de vibración e impacto, exponiéndolos a ciclos variables de carga y/o ciclos de fatiga mecánica [12], sometidos a esfuerzos de flexión y torsión combinados. En caso de considerarse en el diseño una menor rigidez para el chasis, se debe incrementar la capacidad de carga de los elementos y uniones para soportar los esfuerzos de flexión, mejorando la tracción con la superficie de contacto con el piso. Por el contrario, cuando

se tiene una mayor rigidez del chasis se disminuye la tracción con el piso [13, 14, 15] y la estructura tiene un comportamiento más elástico.

En caso de utilizar el proceso de soldadura como método principal de unión se requiere de altas temperaturas de fusión que, en la mayor parte de los casos, genera una región de concentración de esfuerzos, denominada Zona Afectada Térmicamente (ZAT) que modifica la microestructura del material y afecta las propiedades mecánicas. Becerra y Figueroa [16] evaluaron la disminución de la tenacidad en una unión de soldadura por efectos térmicos, mientras que Hoyos [17] propuso reducir el impacto negativo de esta zona mediante una nueva técnica de unión. Dichos estudios están direccionados a contrarrestar el efecto dañino que podría ocasionar un proceso de soldadura de alta energía. También, es evidente el uso limitado que se ha dado al proceso de soldadura en algunos diseños complejos con materiales disimiles y con bajos espesores [18, 19, 20]. Adicionalmente, es conocido que los métodos de unión tradicional por soldadura incrementan los costos de producción en las líneas de fabricación y ensamble, influyendo directamente en la generación de contaminación ambiental.

Dados estos efectos adversos que producen, generalmente, los procesos tradicionales de soldadura, es necesario el desarrollo e implementación de tecnologías alternativas de unión para los nuevos materiales. Justo en este sentido, hoy en día, los ensambles mecánicos utilizando adhesivos poliméricos, se proyectan como una posible alternativa de unión de componentes mecánicos, o de manera combinada con uniones híbridas, en las que la unión con adhesivos aporta algunas ventajas comparativas frente a otros sistemas de unión tradicional (uniones soldadas, remachadas, atornilladas). Se destacan las siguientes ventajas:

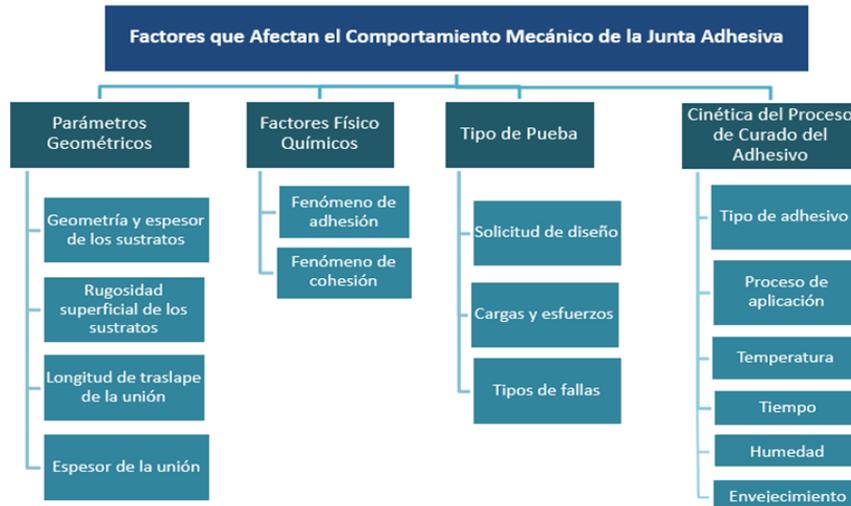
- Unión sencilla de materiales delgados (láminas) y disimiles que podrían presentar dificultades para unirse por otros medios [5].
- Posibilidad de eliminar sujetadores al contrarrestar zonas de concentración de esfuerzos asociados a elementos mecánicos que se utilizan en ensambles con chavetas sobre agujeros [5, 7].
- Mejora en la distribución de esfuerzos sobre los ensambles en amplias áreas, permitiendo montajes más livianos comparados con las uniones mecánicas convencionales.

- Optimización de la relación peso/resistencia y flexibilidad en la integridad de superficies para el ajuste dimensional de materiales anisotrópicos [13, 21].
- Aplicación de uniones adhesivas con bajas temperaturas de curado, típicas para una baja temperatura de transición vítrea, cercana a los (50°C), que contrarrestan el efecto negativo de la concentración de tensiones en los sustratos de metal [6, 21] y facilitan el ensamble de materiales sensibles al calor, sin modificación de las propiedades mecánicas de los materiales.
- Permite la realización de diseños resistentes a la fatiga y a cargas cíclicas, dadas las características de mejora en la resiliencia mecánica [6].
- Garantiza un buen sellado, el aislamiento térmico y eléctrico dadas sus características de disipar energía.
- Disminuye los ruidos y facilita el amortiguamiento de los niveles de vibraciones mecánicas [3, 8], posibilitando mejoras en el desempeño ergonómico de automóviles modernos.

Ante el posible potencial de aplicación de este método de unión con adhesivos, donde no se dispone de procedimientos detallados y normalizados para el diseño de uniones adhesivas en las diferentes aplicaciones de ingeniería, que aún requiere de innovación y desarrollo en metodologías de diseño experimental, dicha área de investigación aún sigue abierta. En esta dirección, este trabajo realiza una revisión de algunas investigaciones relacionadas con el proceso de diseño, caracterización y ensamble de uniones adhesivas, discutiendo la influencia de algunos parámetros geométricos y físicos que afectan el diseño y comportamiento mecánico de ensambles con adhesivos poliméricos.

En el diseño de uniones adhesivas influyen múltiples parámetros geométricos, físico-químicos de los adhesivos y los sustratos, de integridad de las superficies y el tipo de sollicitación mecánica, entre otros, que en ocasiones particularizan el diseño de la misma. Sin embargo, dado el interés y la necesidad creciente para desarrollar dicha área de investigación, algunos trabajos [22, 23, 24, 25, 26] se han concentrado en evaluar y discutir algunos de los factores relevantes que influyen en el comportamiento mecánico de la unión adhesiva que deben considerarse en su diseño mecánico. La Figura 1, presenta los factores relevantes que influyen en el comportamiento mecánico de la unión adhesiva, de acuerdo con los diferentes trabajos consultados.

Figura 1: Factores que influyen en el comportamiento mecánico de la unión adhesiva [22, 23, 24, 25, 26].



Las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas dependen de la naturaleza y de propiedades (mecánicas, físicas, químicas, estructurales, reológicas, entre otras) de los adhesivos y otros parámetros que influyen directamente en el comportamiento de estas uniones. Entre los parámetros geométricos más investigados para este tipo de aplicaciones y que han sido considerados en este estudio, se tienen: la rugosidad de superficie, la longitud de traslape, el espesor de la capa adhesiva, la naturaleza y diseño de los sustratos. Además, ha sido frecuente que en dichas investigaciones se estudie el efecto de una sola variable en el comportamiento mecánico de la junta adhesiva, limitando el estudio de posibles interacciones de factores simultáneos y la investigación de otros casos de discusión que conllevarían a nuevas aplicaciones. En este sentido, se encuentra un campo de estudio con gran potencial para la investigación, con información científica útil, pero aún limitada, debido a la complejidad en las interacciones que podrían establecerse para una condición específica de diseño de unión adhesiva, y en particular en este estudio para ensambles cilíndricos con geometrías específicas para el ensamble del chasis go kart.

Con frecuencia, muchos diseñadores, a nivel mundial en el campo automotriz, se han enfocado en el desarrollo e implementación de soluciones adhesivas estructurales (chasis y carrocería), mientras que en Colombia priman los diseños tradicionales de fabricación de estructuras con

uniones soldadas, pero la dependencia tecnológica, ha favorecido el uso de las uniones adhesivas en ensambles de componentes automotrices en vehículos particulares y de transporte de pasajeros.

Sin embargo, hay necesidades de investigación para evaluar el comportamiento mecánico de los ensambles en servicio, careciendo de una base técnico-científica alta que ha priorizado las aplicaciones mediante la experiencia. Esta carencia de un conocimiento científico sólido ha impulsado a algunas instituciones y grupos de investigación en las universidades a promover el desarrollo de conocimientos en el campo del diseño de uniones adhesivas como alternativas de fijación de componentes mecánicos.

Considerando las ventajas que aporta el diseño de una unión adhesiva frente a otro tipo de uniones mecánicas, se enfrenta este reto investigativo para explorar el ensamble de componentes estructurales en un chasis de un vehículo go kart como alternativa de diseño para reemplazar algunas uniones soldadas. Este reto investigativo, inicialmente de carácter exploratorio, por la ausencia de antecedentes en este campo, para diseñar uniones adhesivas sobre el chasis go kart, se considera altamente innovador para los procesos de planeación, diseño, construcción y realización de ensayos en las uniones adhesivas específicas utilizadas en este tipo de vehículos monoplazas. Adicionalmente, potencia otras opciones en la industria automotriz en general, debido a que los parámetros de diseño de la unión adhesiva a estudiar, podrían escalarse a nuevas aplicaciones en dicho campo. Por lo tanto, es motivo de investigación desarrollar proyectos que mejoren la base científica en relación al diseño de uniones adhesivas como alternativa de unión estructural en componentes de la industria automotriz.

En particular, esta investigación tiene como objetivo general *“evaluar el comportamiento mecánico de un diseño de junta adhesiva estructural cilíndrica tomando como referencia las uniones en un ensamble de chasis monoplaza de competencia de alta velocidad”*, y para desarrollar dicho objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- *Determinar los esfuerzos máximos en uniones de un chasis monoplaza mediante un análisis de elementos finitos como criterio de diseño.*

- *Construir un modelo experimental para un chasis monoplaza, según la norma CIK/FIA para la serie go kart, considerando en su diseño uniones adhesivas poliméricas como alternativa de ensamble para algunas uniones soldadas en zonas críticas del chasis.*
- *Implementar procedimientos experimentales para la toma de mediciones de variables dinámicas, ajustadas al tiempo real, con el propósito de evaluar su comportamiento mecánico, simulando algunas condiciones de operación real.*

Este estudio de diseño de uniones adhesivas poliméricas para integrarlas al ensamble de algunos de los elementos mecánicos del prototipo de chasis go kart, como alternativa de ensamble de algunas uniones soldadas se desarrolla en tres frentes de experimentación:

- El primero considera el diseño de la unión y su proceso de manufactura.
- El segundo abarca el proceso de construcción de componentes del prototipo de chasis del vehículo go kart.
- El tercero se concentra en evaluar la resistencia mecánica de la unión adhesiva someténdola a cargas de torsión.

Todo el proceso investigativo y experimental que se ha enfrentado en este trabajo ha sido fundamental para establecer una propuesta metodológica que contempla la construcción y ensamble de un prototipo de chasis de vehículo monoplaza go kart, utilizando uniones adhesivas en algunos puntos críticos de la estructura como alternativa de unión mecánica, y se ha evaluado el comportamiento mecánico de dichas uniones adhesivas mediante ensayos de torsión pura.

1. Marco teórico

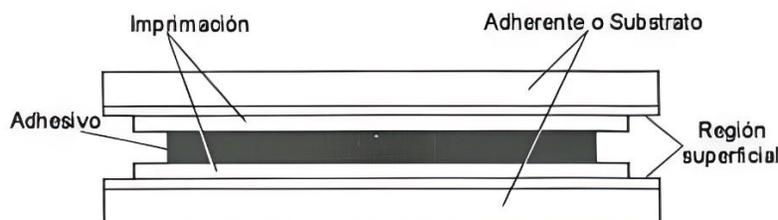
En un diseño de junta adhesiva es necesario establecer la fundamentación científica en relación a los parámetros de diseño geométricos, la manufactura y la integridad de las superficies, la compatibilidad del adhesivo con los sustratos a unir, la holgura o el espesor de la unión a cubrir con adhesivo, el proceso de curado del polímero, las características del área de contacto, la forma de aplicación del adhesivo, entre otras, las cuales podrían influir de manera significativa en el comportamiento mecánico de la unión adhesiva y en la confiabilidad de esta durante el servicio [21, 22, 23], motivo por el cual este capítulo presentará la contextualización de algunos conceptos relevantes.

1.1 Conceptos generales sobre uniones adhesivas

1.1.1 Definición de unión adhesiva

Una unión adhesiva es aquella que permite unir dos sustratos por medio de un adhesivo que se adhiere a las superficies en contacto, dadas sus características físico-químicas. La norma ASTM D907-15 establece los componentes estructurales de una junta adhesiva, de acuerdo con la función y/o característica que cada uno de ellos aporta al ensamble, según se ilustra en el esquema de la Figura 1-1.

Figura 1-1: Elementos estructurales que forman un ensamble de una unión adhesiva [27].



- *Adhesivo*: sustancia que se aplica a las superficies de contacto entre dos materiales para facilitar la adhesión entre ellos y resistir a la separación cuando se aplican esfuerzos mecánicos externos.
- *Sustratos o adherentes*: materiales que se requieren unir utilizando un adhesivo sobre las superficies de contacto.

- *Imprimación*: corresponde al revestimiento o película de activación delgada que se forma por las características físico-químicas de los sustratos o mediante la aplicación de una sustancia compatible químicamente con el adhesivo y con la superficie del sustrato. Se utiliza de manera previa a la aplicación de adhesivo con el fin de mejorar la adhesión.

1.1.2 Clasificación de los adhesivos

Una de las clasificaciones más empleadas, se fundamenta en el mecanismo de formación de la unión adhesiva y en la cinética de la reacción superficial como se da el proceso de adherencia. Se pueden identificar dos grandes grupos de adhesivos clasificados en adhesivos prepolimerizados y adhesivos reactivos.

I. Adhesivos prepolimerizados

a) En fase líquida

i. Soluciones acuosas de origen natural:

- Origen mineral: cementos.
- Origen animal: caseína, colas.
- Origen vegetal: celulosa, almidón, colofonia.

ii. Soluciones acuosas de origen sintético:

- PVP (polivinilpirrolidona).
- PEG
- PAV

iii. Soluciones orgánicas:

- Caucho natural.
- Polienos.
- Polidienos.
- Elastómeros termoplásticos (SBR).

iv. Emulsiones o líquidas:

- PVC
- Polietileno
- Poliacetato de vinilo
- Poliacrílicos (acrilatos y metacrilatos).

b) En fase sólida

i. Adhesivos sensibles a la presión o piezosensibles (PSA).

- Adhesivos de contacto.
- Películas y cintas autoadhesivas.
- Adhesivos reposicionables.
- Adhesivos reactivos a la temperatura.

ii. Adhesivos termofusibles o *hot melts*:

- Polietileno.
- EVA.
- Poliamidas.
- Poliésteres.

II. Adhesivos reactivos:

a. Mediante poliadición:

- Anaeróbicos.
- Acrílicos.
- Cianocrilatos.
- Siliconas de poliadición.
- Poliésteres.
- Polisulfuros.

b. Mediante policondensación:

- Poliuretanos.
- Epóxicos.
- Siliconas de policondensación.
- Fenólicos.

Los adhesivos también se pueden clasificar según su función; es decir, si es de tipo estructural o no estructural. Dentro de esta clasificación se encuentran las familias de los cianoacrilatos, poliuretanos y epóxicos.

1.1.3 Características de las uniones adhesivas

Los adhesivos se componen, principalmente, de polímeros o macromoléculas, los cuales pueden aplicarse directamente sobre los materiales a unir (cuando están en su fase líquida) o bien formarse *in situ* mediante la reacción de polimerización.

Se consideran tres disciplinas básicas que influyen en el estudio de la adhesión de una junta adhesiva, en las cuales se clasifican los fenómenos físicos, químicos y de diseño mecánico de unión.

- Mecánica de la unión adhesiva.
- Química de los adhesivos.
- Ciencia de superficies.

En la Figura 1-2 se ilustra la interacción de estas tres disciplinas detallando algunos de los factores y/o objetos de estudio propios de una junta adhesiva.

En esta investigación, se hará énfasis en la disciplina de la ciencia de la adhesión que permite caracterizar parámetros importantes como el área de contacto, espesor de la película del adhesivo, tiempo y proceso de curado, tipos de falla del sistema sustrato-adhesivo, entre otros. Los parámetros mencionados, son transversales a las tres disciplinas dado que se relacionan con el tipo de adhesivo (parámetro químico), la forma de la unión (parámetro físico) y la resistencia de los materiales a unir (comportamiento mecánico). También se abordan conceptos y/o parámetros relacionados con la ciencia de superficies como son la rugosidad, capacidad de absorción de energía y el diseño de la unión adhesiva que está asociada con la geometría de la unión (parámetro físico), y con su comportamiento mecánico en términos de propiedades de la resistencia a torsión, compresión, tracción y/o cargas combinadas.

Figura 1-2: Disciplinas influyentes en el estudio de la junta adhesiva.



En la ciencia de la adhesión, el término adhesivo está definido como aquella sustancia que, aplicada entre las superficies de dos materiales, permite una unión resistente a la separación. El sustrato o adherente identifica a los materiales que se unen entre sí por medio del adhesivo. Al conjunto de interacciones físicas y químicas que tienen lugar en la intercara entre el adhesivo y el adherente recibe el nombre de adhesión. [22, 23].

1.1.4 ¿Cómo se forma la unión?

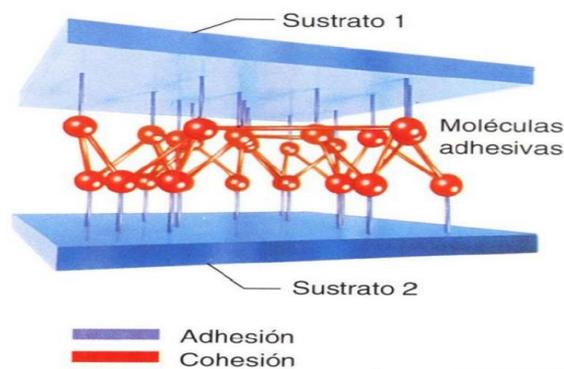
Para entender el proceso de unión con adhesivos es importante comprender los conceptos de *adhesivo*, *curado*, *adhesión* y *cohesión*.

El **adhesivo** es aquella sustancia que aplicada en las superficies de dos materiales forma una unión resistente a la separación. El **curado** es el proceso mediante el cual el adhesivo adquiere propiedades físicas y químicas para desarrollar su fuerza de cohesión y adhesión. En la norma UNE-EN 923 se define la **adhesión** como el estado en que dos superficies son mantenidas juntas mediante uniones en la intercara, es decir se relaciona con la fuerza que mantienen unido el adhesivo a la superficie del sustrato. El concepto de **cohesión** se refiere a la unión de moléculas de un mismo cuerpo dentro del volumen de adhesivo. Puede describirse como la acción de las fuerzas internas que se oponen a la separación de las moléculas adhesivas de un cuerpo heterogéneo.

El mecanismo de unión depende de la fuerza de unión del adhesivo al sustrato, llamada adhesión y de la fuerza interna entre las moléculas del adhesivo o cohesión [21, 22].

En la Figura 1-3 se ilustra la interacción de las fuerzas de adhesión y cohesión en el mecanismo de formación de una unión adhesiva.

Figura 1-3: Fuerzas de unión en la junta adhesiva [27].



Por lo tanto, la adhesión como la cohesión se define por las relaciones existentes entre las moléculas: moléculas de distintos cuerpos para la adhesión y moléculas de un mismo cuerpo para la cohesión. Como ejemplo, si se toman dos pedazos de caucho natural y se amasan hasta formar un cuerpo único, se está llevando a cabo un proceso de cohesión de la masa; mientras que, si esos dos pedazos se aplican el uno sobre el otro, el concepto tratado corresponde al concepto de adhesión.

1.2 Teorías de la adhesión

Durante el proceso de unión adhesiva está presente un fenómeno superficial de naturaleza físico-química, denominado el "fenómeno de adhesión" que explica las causas por las cuales se produce la adhesión entre dos materiales. Este concepto ha sido ampliamente discutido con fines de entender el comportamiento de los adhesivos durante el proceso de unión. Sin embargo, no existe una única teoría que explique el fenómeno de adhesión en su totalidad; por el contrario, existen diferentes modelos o teorías de adhesión que fundamentan cada caso particular de estudio, y donde cada una enfatiza más en algunos factores que en otros para explicar el

fenómeno de la adhesión, siendo necesaria la combinación de diferentes teorías. Típicamente, se presentan dos tipos de fenómenos en la intercara sustrato-adhesivo, los cuales son de naturaleza física y química.

Las diferentes teorías (o modelos) de adhesión que se presentan en la literatura corresponden a las siguientes dos categorías de fenómenos:

Fenómenos físicos:

- Relacionados con el modelo de adhesión mecánica.

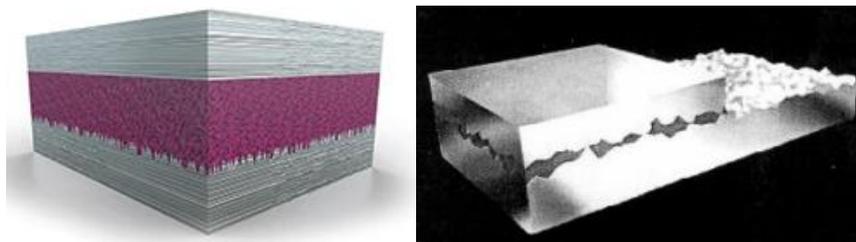
Fenómenos químicos:

- Relacionados con la teoría de la adsorción termodinámica o de mojado superficial.

1.2.1 El modelo de adhesión mecánica

Explica que la adhesión se debe a un anclaje o interbloqueo mecánico del polímero (adhesivo) en las superficies del sustrato, debido a la rugosidad, haciendo que la zona real de contacto entre los dos materiales (sustratos) sea mayor que la correspondiente a la superficie aparente de contacto. Por lo tanto, la rugosidad es un factor importante que influye sobre el fenómeno de adhesión. Cabe mencionar que una buena mojabilidad del sustrato por el adhesivo reduciría puntos potenciales de iniciación de falla de la unión adhesiva. En particular, cuando los adhesivos se aplican en su fase líquida fluyen fácilmente al aplicarlos sobre el sustrato antes del proceso de curado, ver Figura 1-4.

Figura 1-4: Modelo de adhesión mecánica [28].



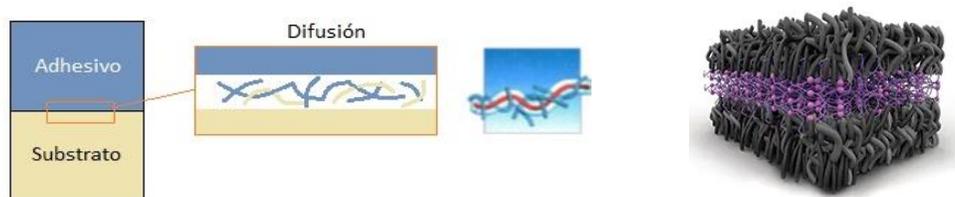
Este modelo explica la adhesión de materiales porosos como la madera, los tejidos, las fibras textiles, el papel, entre otros. También, podría explicarse las siguientes uniones adhesivas:

- *Metalizado de plásticos:* los plásticos por su naturaleza no tienen afinidad por los metales, por lo tanto, para favorecer la interacción con ellos se deben crear heterogeneidades en la superficie del plástico para conseguir el anclaje necesario con un recubrimiento metálico.
- *Tratamiento de metales por abrasión mecánica:* se realiza este proceso de modificación superficial antes de aplicar tratamientos químicos, con el fin de incrementar la superficie de unión del adhesivo con el metal. Durante este tratamiento, se genera una topografía superficial adecuada y se eliminan sustancias antiadherentes de la superficie como contaminantes o grasas.

1.2.2 Teoría de la difusión

Explica la adhesión de sustratos de polímeros entre sí y plantea la adhesión como resultado de un proceso de interdifusión de las moléculas de los planos superficiales. Esta teoría considera la existencia de una zona de transición entre el adhesivo y el sustrato, formando una intercara delgada sin espesor por la noción de una intercara densa [28]. En otras palabras, la difusión se produce cuando un polímero es capaz de penetrar en un sustrato de otro polímero y entrecruzarse con él, formando una intercara con las cadenas de polímeros que unen el adhesivo y el sustrato, como se ilustra de manera esquemática en la Figura 1-5.

Figura 1-5: Mecanismo de interdifusión de las moléculas de los planos superficiales [28].



Para que se produzca una difusión óptima, los polímeros deben ser miscibles, es decir, solubles entre sí. La miscibilidad de los polímeros se cuantifica a partir de los parámetros de solubilidad. Los valores de estos parámetros dependen del grado de interacciones intermoleculares en el disolvente o polímero. Las sustancias apolares presentan fuerzas de interacción superficial débiles, de naturaleza de *Van der Waals*. Por lo tanto, presenta parámetros de solubilidad pequeños, mientras que las sustancias que forman enlaces de hidrógeno o grupos polares poseen parámetros de solubilidad superiores, dada su mayor capacidad de fuerza intermolecular.

El modelo de difusión se caracteriza por:

- La pobre adhesión de las poliolefinas (polietileno, polipropileno).
- La pobre visibilidad de la mayoría de los polímeros en agua.
- Los polímeros que presentan una gran diferencia en sus parámetros de solubilidad no poseen adhesión.
- La autoadhesión de plásticos mediante soldadura por aplicación de calor o con disolventes.

Además, presentan las siguientes limitaciones:

- No considera la disipación de energía visco-elástica que se produce cuando se realiza un ensayo mecánico de adhesión.
- Los efectos debidos al tiempo de contacto y peso molecular de los polímeros pueden explicarse considerando variaciones en el proceso de mojabilidad de los sustratos.

1.2.3 Teoría eléctrica

La adhesión electrostática se produce cuando la superficie cargada del adhesivo es atraída hacia el sustrato de carga opuesta, las cargas de signo opuesto se atraen entre sí. En las uniones metal-adhesivo, la diferencia entre la naturaleza polar de ambos materiales facilita la transferencia de electrones del metal al adhesivo. Esto produce una doble capa eléctrica en la intercara, ver Figura 1-6.

Figura 1-6: Adhesión electrostática [28].



Las limitaciones que presenta el modelo eléctrico son las siguientes:

- La presencia de impurezas y contaminantes en la superficie de los sustratos disminuye tanto la adhesión como la posibilidad de formar una doble capa eléctrica. Por lo tanto, las fuerzas eléctricas deberían mantenerse en niveles superiores.
- La contribución a la intercara debida a las fuerzas de *Van der Waals* es en algunos casos superior a la de las fuerzas electrostáticas.

1.2.4 Teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial

Explica el fenómeno de la reacción química que se produce entre las moléculas del adhesivo y el sustrato. Al poner en contacto dos superficies no importa que exista o no difusión del adhesivo, porque se crean fuerzas intermoleculares en la intercara suficientes para garantizar la adhesión. Estas fuerzas son llamadas de humectación o de mojabilidad, porque al formar una unión se pasa por una fase de contacto entre el líquido y el sustrato sólido. Cuando mayor sea la mojabilidad, es decir, el contacto entre las caras mejor será la adhesión termodinámica. Esta teoría es útil para explicar el uso y efectividad de agentes compatibles existentes entre el sustrato y el adhesivo.

En general, se distinguen diferentes tipos de fuerzas involucradas en el fenómeno de adsorción:

Enlaces primarios:

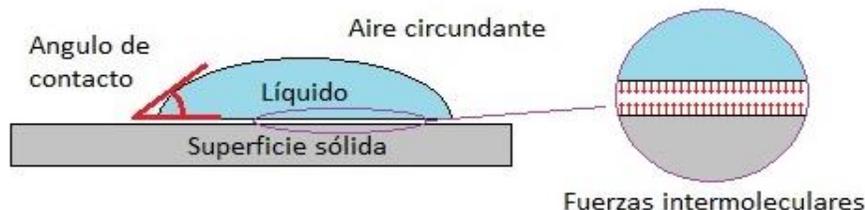
- Enlace iónico.
- Enlace covalente.

Enlaces secundarios:

- Fuerzas de *Van der Waals*.
- Puentes de hidrógeno.

Por lo tanto, la adhesión mediante el modelo termodinámico se produce cuando el adhesivo moja al sustrato. La mojabilidad se mide a través del ángulo de contacto θ , formado por el adhesivo en su fase líquida y el sustrato, según la ilustración de la Figura 1-7. Se considera óptima la mojabilidad cuando el ángulo de contacto es bajo. Se produce una adecuada adhesión si la energía superficial del sustrato es mayor a la energía interfacial (tensión interfacial) del adhesivo.

Figura 1-7: Relación entre la energía superficial de las fases del sólido y líquido en estado de equilibrio termodinámico de una gota de líquido en contacto con una superficie sólida.



En la figura anterior el ángulo de contacto (θ) es menor a 90° y por tanto se considera que el líquido moja a la superficie sólida [23].

Niveles de mojado:

- Ángulo $\theta = 180^\circ$: no moja.
- $90^\circ < \theta < 180^\circ$: mojado deficiente o mínimo.
- $\theta = 90^\circ$: mojado parcial o suficiente.
- $\theta < 45^\circ$: el líquido moja al sólido.

Las capas de cohesión débiles se producen por los siguientes motivos:

Las capas de cohesión débiles se producen por los siguientes motivos:

- Contaminación sobre la superficie del sustrato antes de realizar la unión adhesiva, la cual es común en los metales por impurezas formadas.
- Sustancias de bajo peso molecular o aditivas que migran a la intercara una vez formada la unión.
- Reacciones no deseadas en las superficies del sustrato y el adhesivo, provocando la formación de nuevas estructuras con propiedades diferentes a las de la intercara. Como ejemplos se podrían citar los siguientes casos:
 - Unión de polietileno con aluminio: una vez formada la unión adhesiva, se crea una capa transcristalina en la superficie del sustrato, de naturaleza diferente a la del polietileno. Esta capa proporciona rigidez a la intercara y se produce el deterioro de la adhesión.
 - Unión entre fibra de carbono y matriz epóxica: una vez realizada la unión, se crea una estructura cristalina en la intercara en la zona de contacto con la fibra, la cual deteriora el anclaje del matriz epóxica.
 - Unión entre caucho SBR y aluminio: durante el ensayo de pelado se produce una rotura cohesiva en el caucho debida a la sobrereticulación que sufre el caucho en la superficie de aluminio fosfatado.
- Tratamiento superficial inadecuado o excesivo que puede producir un debilitamiento del material favoreciendo la falla prematura en la unión adhesiva.

1.3 Mecanismos de falla en uniones adhesivas

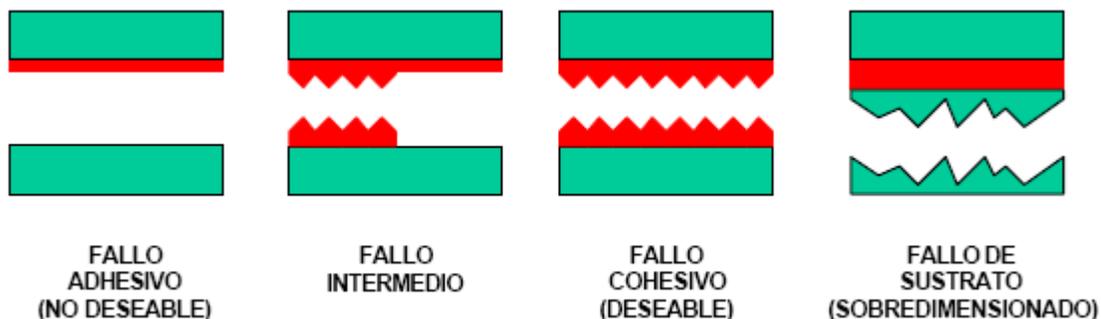
Una vez presentados los conceptos de adhesión y sus diferentes modelos que la sustentan, se hace importante introducir los mecanismos de falla presentes en la unión adhesiva con fines de comprender mejor el comportamiento mecánico de una unión adhesiva en servicio.

La unión adhesiva puede fallar por tres modos o mecanismos:

- Separación por adhesión o falla adhesiva: ocurre cuando hay una separación en la intercara del sustrato y el adhesivo, dejando limpia la superficie de uno de los sustratos. Puede ocurrir por causas de deficiente preparación superficial, fallas en el curado del adhesivo, falta de humectabilidad de la superficie, irregular distribución del adhesivo sobre la superficie, entre otras.
- Separación por cohesión o falla cohesiva: cuando se produce ruptura en el volumen del adhesivo, quedando parte de este adherido a cada uno de los sustratos. Situación que se presenta debido a que las fuerzas intermoleculares del adhesivo son débiles para soportar la carga y esfuerzos a la que es sometida la unión adhesiva y se fracturan.
- Falla en los sustratos: cuando se fractura el sustrato antes de que el adhesivo falle, bien sea por adhesión o por cohesión.

En la Figura 1-8 se ilustran los mecanismos de falla más comunes en una unión adhesiva, con los cuales los investigadores inician el análisis de fallas.

Figura 1-8: Mecanismos de falla de las uniones adhesivas.



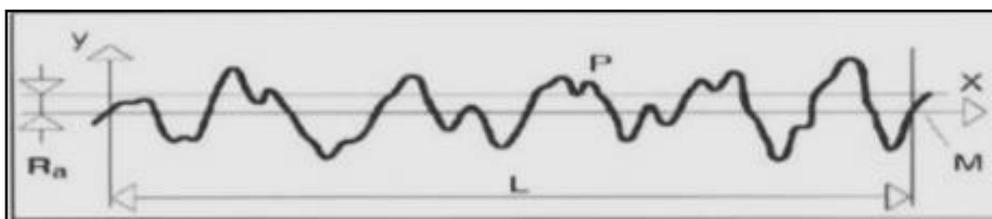
La falla de una junta adhesiva depende del mecanismo de adhesión-cohesión que se presente, ligado a la secuencia e influencia de los parámetros operacionales utilizados en la unión que se contrastan con su diseño.

1.4 Rugosidad media y parámetro de medida

Las superficies de los materiales normalmente presentan irregularidades repetitivas y/o aleatorias con respecto a la superficie nominal que dependen del proceso de manufactura y de preparación de las mismas antes de someterse a un proceso de unión con adhesivos. Se identifican las siguientes cuatro características sobre el perfil de las superficies de los sustratos: rugosidad, ondulación, orientación y defectos; en gran parte generadas durante el proceso de maquinado, el tipo de herramienta de corte utilizada, los parámetros de corte utilizados, la vibración de la herramienta, la temperatura generada durante el proceso, entre otros; que afectan directamente la capacidad de adherencia de la adhesión y su posterior resistencia mecánica durante el sometimiento a cargas de trabajo y/o de ensayos mecánicos.

Todos los parámetros de rugosidad en el plano (2D) se definen con la letra R seguida de un subíndice que indica la fórmula para el cálculo del parámetro medio que se utilizó. Para este trabajo se tiene en cuenta el parámetro de rugosidad promedio R_a , que es uno de los más comúnmente utilizado para medir el acabado promedio de una superficie. Una gráfica de R_a representa un conjunto de picos y valles de una superficie rugosa a lo largo de una longitud determinada. El parámetro R_a representa la media aritmética del perfil de rugosidad, y un esquema de la misma, se ilustra en la Figura 1-9.

Figura 1-9: Grafica de R_a para la medición de acabado.



1.5 Generalidades de un vehículo monoplaza go kart

Un kart es un vehículo a motor terrestre para uso unipersonal (monoplaza) sin techo, sin suspensiones, con o sin elementos de carrocería, con cuatro ruedas no alineadas que están en contacto con el suelo. Las dos ruedas delanteras ejercen el control de la dirección, y las dos traseras son conectadas por un eje que transmiten la potencia que reciben de un motor de combustión interna de gasolina. La norma CIK/FIA (Comisión Internacional de Karting de la

Federación Internacional de Automovilismo) regula la construcción de estos vehículos de competencia [13].

Sus partes principales corresponden al chasis (estructura que soporta la carrocería, en caso de tenerla), el sistema de neumáticos y el motor de combustión. (Ver Figura 1-10).

Figura 1-10: Vehículo monoplaza go kart según la norma CIK/FIA [13].



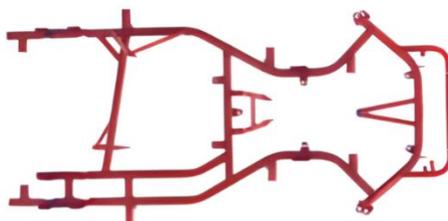
1.5.1 Chasis

El chasis es la estructura principal del vehículo, su finalidad es soportar todas las partes y sistemas mecánicos. Su diseño corresponde a un conjunto de perfiles cilíndricos de acero unidos entre sí mediante soldadura para conformar una estructura rígida, como se ilustra en la Figura 1-11. Se diseña para soportar los esfuerzos de torsión, flexión, compresión y/o combinación de los diferentes esfuerzos que se generan debido a la distribución dinámica de sus propias cargas en diferentes condiciones de servicio y topografías de la pista de competencia [14]. Las dimensiones geométricas de los tubos comúnmente utilizadas corresponden a 30 o 32 mm de diámetro.

El diseño del chasis es fundamental y de este dependerá la eficiencia del vehículo en pista, por consiguiente, factores relacionados con la rigidez, la distribución del peso y el diseño del chasis; son importantes para considerar en el desempeño en servicio del vehículo. Por ejemplo, un chasis con bajo peso se traduce en optimización de potencia y reducción del consumo de

combustible, siendo clave encontrar un equilibrio entre el peso y la resistencia mecánica en el diseño de una estructura liviana con alta confiabilidad.

Figura 1-11: Chasis de un go kart [13].



La rigidez de un chasis se evidencia con la facilidad en la conducción en curvas y con la estabilidad al suelo en presencia de defectos en la pista. Dado que no se dispone de un sistema de suspensión este factor aumenta, lo que se traduce en una pérdida de tracción con el suelo en los momentos de giro, por lo cual el piloto debe disminuir su velocidad al tomar la curva. Cuando un piloto opera un vehículo con un chasis menos rígido con una mayor tracción sobre el piso, podría generar un mayor esfuerzo de flexión y en las curvas podrá girar con una mayor velocidad; características importantes en competencia cuando el que gana es quien más rápido viaja por las diferentes condiciones de la pista.

1.5.2 Fuerzas presentes en el chasis

La rigidez es la capacidad que tiene el chasis para soportar diferentes esfuerzos sin sufrir deformaciones permanentes (en la zona elástica). Según el tipo de esfuerzo que experimente el chasis, pueden existir dos tipos de rigidez: la rigidez a flexión y la rigidez a torsión [15].

La rigidez se define como:

$$K = \frac{F}{d}$$

Donde K : rigidez (N/m)

F : esfuerzo o carga que experimenta el chasis (N)

d : Desplazamiento a torsión (m)

La rigidez es directamente proporcional al módulo de elasticidad del material (E), al momento de inercia (I) y al área de la sección transversal de los tubos (A).

$$K \propto E * I; K \propto E * A$$

Dónde:

E : *módulo de elasticidad* (N/m^2)

I : *momento de inercia* ($Kg * m^2$); A = *área de la sección* (m^2)

- *Rigidez por flexión*: debido a la fuerza de gravedad en el sistema inercial, todas las masas que soporta el chasis originan cargas distribuidas sobre un plano perpendicular al plano de la estructura generando sobre la misma un momento flector que podría dar lugar a una flecha vertical en determinados puntos, y representarse con un modelo de rigidez por flexión:

$$K = \frac{M}{\theta} = \frac{E * I}{L}$$

Dónde:

K : *rigidez por flexión* [$N * m/grados$]

M = *momento flector* [N/m]

θ = *ángulo de deformación* [$grados$]

E = *módulo de elasticidad* [N/m^2]

I = *momento de inercia* [$kg * m^2$]

L = *longitud* [m]

- *Rigidez por torsión*: debido a la presencia de cargas asimétricas espaciales que producen un momento de torsión sobre el chasis, cuyas componentes de carga verticales y horizontales se pueden determinar mediante el modelo característico de rigidez por torsión:

$$K = \frac{T}{\theta} = \frac{G * J}{L}$$

Dónde:

K : rigidez de torsión [$N \cdot m/\text{grados}$]

M : momento flector [N/m]

θ : ángulo de deformación [grados]

G : módulo de cizallamiento [N/m^2]

J : módulo de torsión [N/m^2]

L : longitud [m]

1.6 Reglamentación CIK/FIA-2022

La normativa emitida por la CIK/FIA vigente para el año 2022, contempla características, especificaciones, definiciones, recomendaciones y parámetros técnicos que deben cumplir los vehículos de competencia go kart para participar en las competencias de karting. En particular, para el diseño y la construcción del prototipo del chasis go kart en este proyecto de investigación, se consideraron algunos lineamientos explícitos en la normatividad CIK/FIA relacionados con la construcción de vehículos de competencia go kart [29]. Los siguientes puntos son un breve resumen del anuario redactado por la CIK/FIA:

- **Chasis:** sus piezas principales deben ensamblarse sólidamente unas sobre las otras sin conexiones articuladas, a no ser que el sistema de dirección este ubicado en la punta del eje de dirección. El material del chasis tubular es construido en acero, y a la fecha está prohibido la utilización de titanio.
 - **Dispositivos de amortiguación:** está prohibido la utilización de sistemas de amortiguamiento, como por ejemplo el grupo resorte-amortiguador que disponen los vehículos particulares y públicos.
 - **Especificaciones técnicas:** distancia entre ejes mínima 101 *cm* y 127 *cm* como máxima; Longitud total 182 *cm* máxima. Para competencia en circuitos largos una longitud total de 210 *cm*, un ancho promedio 140 *cm* y una altura máxima con respecto al suelo con exclusión de la silla de conducción de 65 *cm*.
 - **Paragolpes (parachoques):** una protección delantera, trasera y lateral con altura máxima con respecto al suelo de 20 *cm*.

- *Transmisión:* se ha de efectuar siempre sobre las ruedas traseras, el diseño es libre, sin embargo, cualquier tipo de diferencial está prohibido.
- *Dirección:* accionada mecánicamente por un volante de geometría completamente circular.
- *Utilización de materiales compuestos:* está totalmente prohibido su utilización en la construcción de sus partes con excepción del asiento del piloto.
- *Amortiguamiento:* se encuentra completamente prohibido el uso de cualquier tipo de dispositivo hidráulico o neumático que absorba algún tipo de oscilaciones.

1.7 Metodología general de análisis mecánico mediante FEA (Análisis Elementos Finitos)

Mediante el método de los elementos finitos se construye una malla de geometría triangular o cuadrangular que considera la división en pequeños fragmentos de la estructura tridimensional para analizar cada fragmento de manera independiente. La secuencia de pasos fundamentales que se consideran en dicho análisis incluye: pre-procesamiento, procesamiento y pos-procesamiento.

1.7.1 Pre-procesamiento

El primer paso consiste en crear el modelo de la estructura a ser analizada en este caso el chasis, un modelo 3D que replica todos los parámetros geométricos y características de la estructura real. procedimiento consiste en definir y dividir el modelo en pequeños elementos, lo que se conoce como modelo de elementos finitos que está definido por una malla conformada por estos elementos y nodos.

1.7.2 Procesamiento

En esta etapa se lleva a cabo el proceso de análisis de elementos finitos mediante procesos computacionales aplicando cargas específicas a algunos puntos de la estructura con el fin de determinar las deformaciones y esfuerzos debido a esas cargas iniciales.

1.7.3 Post- procesamiento

Esta etapa permite la visualización de los resultados mediante herramientas numéricas y graficas que ubican de manera precisa la información de esfuerzos y deformaciones.

2. Estado del arte

En este capítulo se revisan los alcances logrados y las metodologías elaboradas por diferentes investigadores, en orden cronológico relacionados con el uso de uniones adhesivas y parámetros geométricos que influyen en el comportamiento mecánico de diferentes configuraciones de junta adhesiva, enfocando las aplicaciones en estructuras de chasis, y en particular en las uniones adhesivas cilíndricas concéntricas. El capítulo se divide en dos partes fundamentales: la primera parte considera un análisis de estudios realizados para determinar los esfuerzos máximos que se presentan en una estructura de chasis monoplaza; mientras que, la segunda parte aborda una revisión de los factores y variables geométricas que comúnmente afectan la resistencia mecánica de la unión adhesiva bajo la acción de diferentes cargas.

2.1 Comportamiento mecánico de un chasis monoplaza

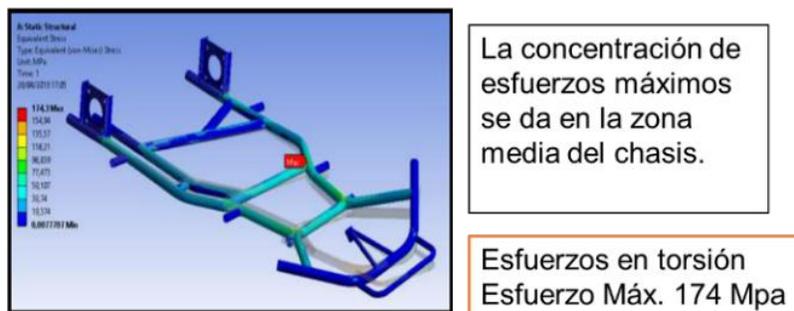
Se presentan algunos estudios relacionados con la dinámica de operación de un go kart con fines de identificar y comprender la naturaleza de los esfuerzos que soportan la estructura del monoplaza en servicio. La mayoría de los estudios relacionados con el cálculo de esfuerzos de chasis sobre el monoplaza, indican que las zonas de mayor esfuerzo se presentan en los puntos de apoyo cercanos con el suelo [30, 31, 32, 33, 34]. En el trabajo de Quezada [15], se presentan algunos análisis tanto estáticos como dinámicos para un chasis go kart que tradicionalmente utiliza diseño estructural con uniones soldadas, las cuales fueron tomadas como referencia para el diseño de las uniones adhesivas que se proponen en este trabajo de investigación. El caso *estático*, se considera cuando el vehículo no experimenta cambios en su aceleración y en su velocidad, utilizando parámetros para la aceleración del centro de masa: $a = 0 \text{ m/s}^2$ y de velocidad lineal del centro de masa: $v = 0 \text{ m/s}$. Los valores de fuerza normal sobre el piso tanto en el eje delantero como en eje trasero, se presentan en la Tabla 2-1 [15].

Tabla 2-1: Fuerzas y distribución del peso en comportamiento estático [15].

Tipo de elemento	Fuerza Normal [N]	Transferencia del peso [%]
Eje delantero	543.58	41.04
Eje trasero	780.77	58.95

La Tabla 2-1 presenta las fuerzas normales en cada eje y su porcentaje de transferencia de peso dado por las cargas del piloto (70 kg) y el kart (65 kg). También, se presenta un estudio de los esfuerzos de torsión generados sobre puntos del chasis sometido a estas cargas, según la ilustración de la Figura 2-1, que reporta un valor máximo para el esfuerzo de torsión de 174 MPa concentrado en la zona media del chasis, cercana al centro de masa del go kart.

Figura 2-1: Resultado de esfuerzos en torsión en condiciones estáticas [15].



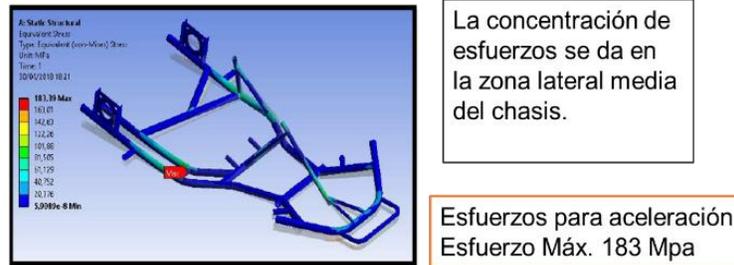
En el caso *dinámico* con aceleración, de acuerdo con el reporte de la Tabla 2-2, se produce una transferencia de peso desde el eje delantero del kart hacia el eje trasero, proporcional a la magnitud de la aceleración que experimenta el vehículo en ese instante. De manera similar, en la Figura 2-2, el esfuerzo máximo de torsión ilustrado tiene un incremento a un valor de 183 MPa, situación que exige una mayor capacidad de carga por torsión en la unión adhesiva.

También se reporta que, los esfuerzos máximos por torsión se presentan sobre la zona media del chasis, trasladándose a la zona lateral, evidenciando nuevamente que la zona media del chasis es la de mayor exigencia tanto para el comportamiento estático como para el dinámico; sin embargo, en el caso dinámico existe una mayor transferencia del peso hacia el eje trasero, siendo este el de mayor exigencia, dada la mayor tracción que se genera sobre el piso por efecto de la fuerza normal que evidentemente sufre un incremento de carga en dicho eje trasero.

Tabla 2-2: Fuerzas y distribución del peso con condición de aceleración lineal [15].

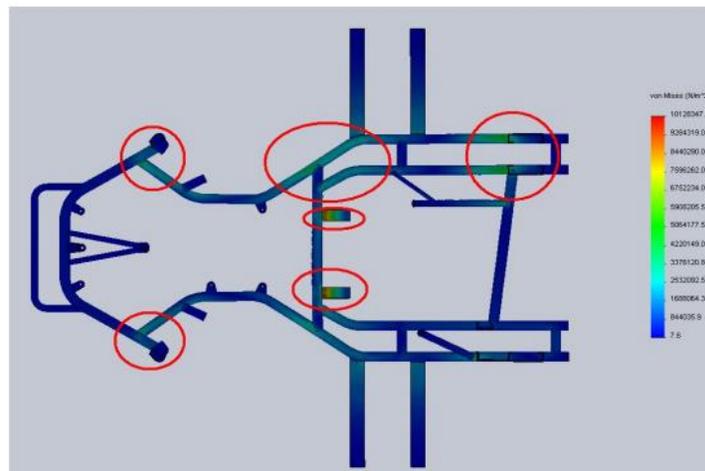
Tipo de elemento	Fuerza Normal [N]	Transferencia del peso [%]
Eje delantero	350.85	26.49
Eje trasero	973.50	73.51

Figura 2-2: Resultado de esfuerzos para una condición dinámica con aceleración [15].



En el estudio de Ramírez y Zaruma [8] para un chasis de go kart, con diseño de uniones soldadas, se reporta un valor para el esfuerzo máximo de torsión de 101 MPa , mientras que las zonas con un mayor valor de esfuerzo se concentraron en la parte trasera del chasis, justamente, donde las cargas tienen mayor contacto con la estructura del chasis, sumado a la transferencia de carga hacia el eje trasero, ver Figura 2-3.

Figura 2-3: Estudio estático de chasis go kart evidenciando las porciones con mayores esfuerzos equivalentes de *Von Mises* [8].

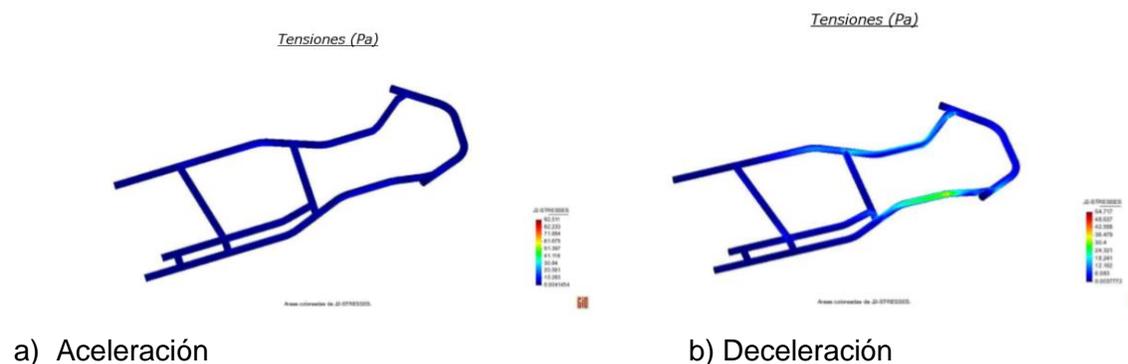


El trabajo de Anadón y Pabón [13] evalúa los esfuerzos presentes en un chasis de geometría similar al chasis de estudio de este trabajo de investigación, por lo que sus resultados han sido de gran interés y base para comprender el comportamiento del chasis go kart bajo condiciones de carga durante la operación normal en pistas de competencia. La Figura 2-4, que representa condiciones de aceleración o desaceleración, reportadas por Anadón y Pabón [13], se verifica

que los esfuerzos varían con la condición de frenado o de aceleración del vehículo. Similar a como se reportó en las Tablas 2-1 y 2-2 las distribuciones de peso en el chasis varían para cada situación, y por lo tanto también existe variación en los esfuerzos.

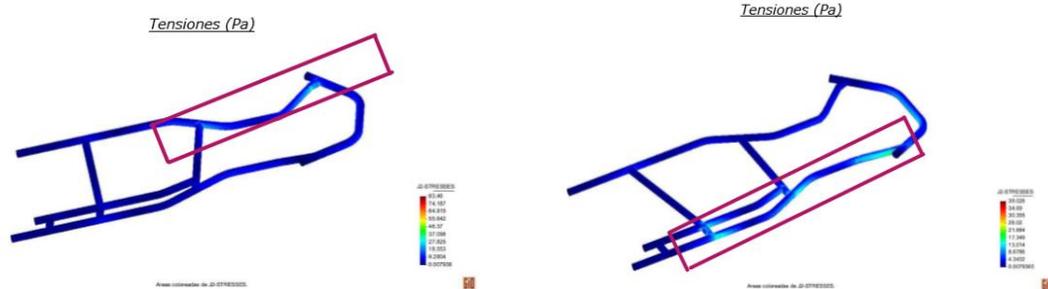
Para la condición de aceleración sobre el eje trasero, se presentan los mayores esfuerzos, pero debido a su geometría (mayor diámetro y área transversal para soportar esfuerzos), los valores son casi nulos comparados con la situación de frenado. Mientras que para el eje delantero se concentran las mayores tensiones, dada la geometría (menor área para soportar esfuerzos) en esta zona, evidenciando mayores valores para los esfuerzos, alrededor de 54.7 MPa . Esta situación confirma los resultados encontrados por Quezada que es afectada por las condiciones de diseño geométrico relacionada con los diámetros y áreas en la zona de unión.

Figura 2-4: Representación de esfuerzos para una condición de aceleración y deceleración en una trayectoria lineal.



Para otra condición en la que se representa al vehículo tomando una curva, a diferencia de la condición de trayectoria lineal representada en la Figura 2-4, en la Figura 2-5, se representa una condición de aceleración con curva hacia la derecha o hacia la izquierda, que evidencia que los esfuerzos son mayores cuando existe aceleración por la izquierda debido a la ubicación del motor (en la izquierda) que influye en el mayor esfuerzo obtenido; sin embargo, los mayores esfuerzos se concentran en la zona de apoyo de los ejes al chasis, dada la restricción de movimiento y la tendencia a una mayor concentración de los esfuerzos.

Figura 2-5: Representación de los esfuerzos para una condición de movimiento con aceleración lateral por la derecha e izquierda.



(a) Aceleración por la derecha

(b) Aceleración por la izquierda

2.2 Parámetros geométricos que influyen en la resistencia mecánica de la unión adhesiva

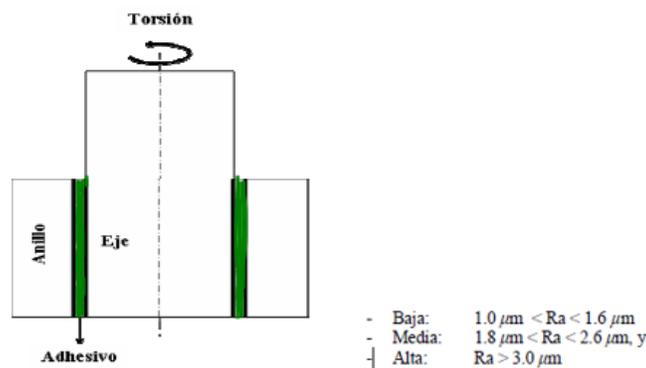
Durante los últimos 60 años, varios investigadores han evaluado constantemente la resistencia mecánica de las juntas adhesivas. Los estudios de Bermejo, Oñoro y García [35] evalúan comportamiento a fatiga en una unión adhesiva a solape simple; Goland y Reissner [36] reportan evaluación de esfuerzos; Lubkin y Reissner [37], reportan distribución de esfuerzos en geometrías tubulares circulares; y Hart-Smith [38] caracterizan uniones planas traslapadas. Ledesma [3, 26] reportaron comportamiento mecánico de uniones estructurales incluyendo parámetros operacionales. A principios de los años de 1970, el método de elementos finitos (MFE) fue utilizado para los cálculos de predicción de la resistencia mecánica de las uniones adhesivas [38, 39, 40].

Adicionalmente, se tiene evidencia de estudios en los que se utilizaron ensayos mecánicos para pruebas destructivas y no destructivas en la evaluación del comportamiento mecánico de uniones cilíndricas bajo diferentes cargas que generan esfuerzos de tensión, compresión, flexión, torsión, térmicos y residuales, incluso en algunos casos, se emplearon métodos numéricos y computacionales para su análisis. Otros estudios consultados, reportaron evaluación de uniones adhesivas utilizando ensayos mecánicos convencionales [39], optimización de juntas en tensión con apoyo de análisis numérico [41], utilización de técnicas experimentales para la evaluación de resistencia estática [42], aplicación de uniones adhesivas

en la industria naval [28], influencia de parámetros de diseño en el comportamiento de uniones adhesivas estructurales [3, 19, 22, 23, 25, 26, 31], y otros con evaluación del comportamiento no lineal de las uniones adhesivas [44]. Sin embargo, los resultados de dichos estudios, en su mayor parte, presentan altos índices de dispersión y no ha sido reportado hasta el momento un modelo general que relacione todos los parámetros químicos, físicos y mecánicos que influyen en la resistencia mecánica de las uniones adhesivas, dada la complejidad de factores que influyen en el comportamiento mecánico de una unión adhesiva [22]; y en particular esta situación aplica para el caso del proyecto que se desarrolla en esta investigación relacionado con el diseño de uniones adhesivas para un ensamble de chasis go kart con elementos cilíndricos.

Con el propósito de optimizar el comportamiento mecánico y garantizar la resistencia de la junta adhesiva a una sollicitación mecánica particular, es común evaluar los parámetros geométricos de la misma de manera experimental. Según García [22], los principales factores de diseño de la unión que influyen en dicho comportamiento están relacionados con las siguientes variables: el tipo y espesor del adhesivo, la longitud de traslape de la unión, el tipo de materiales a unir, la rugosidad superficial y el espesor de los sustratos, entre otros. En particular, García [22], evaluó algunos parámetros geométricos relacionados con la influencia del acabado superficial sobre la resistencia a torsión pura de juntas adhesivas para fijación de elementos cilíndricos mediante la utilización de ensayos destructivos de torsión en diferentes uniones adhesivas de diseño geométrico cilíndrico. La resistencia mecánica a torsión fue reportada en función del nivel de rugosidad (bajo, medio y alto), según el diseño de ensamble cilíndrico reportado en la Figura 2-6, utilizando dos adhesivos anaeróbicos comerciales y mejorando la mojabilidad del sustrato mediante un activador de superficie.

Figura 2-6: Ensamble anillo-adhesivo eje de acero AISI 4140, niveles de rugosidad [22].



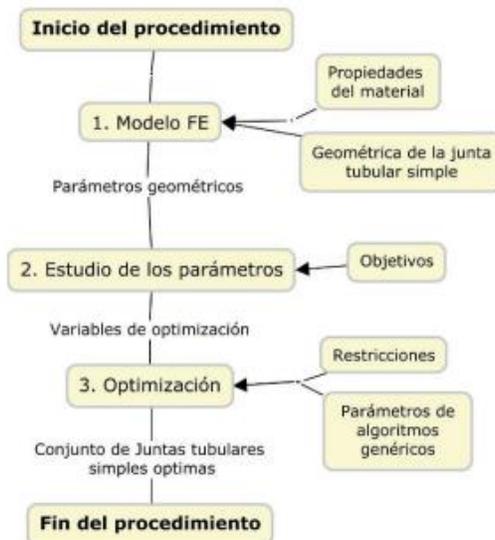
Los resultados obtenidos reportan que la mayor resistencia a la torsión de las juntas se obtiene para los casos en que los ejes de las uniones cilíndricas correspondían con los niveles extremos de rugosidad, ($1.8 \mu m < Ra < 2.6 \mu m$) estudiados.

También se resalta que, la utilización del activador es necesaria para garantizar la mojabilidad de los sustratos y a la vez favorecer la adherencia, mejorando así la resistencia a torsión. Además, el estudio de las uniones sometidas a torsión mostró la presencia simultánea de fallas adhesivas, cohesivas y mixtas. Resaltando que el acabado superficial corresponde a una de las variables más importantes en el desempeño final de la unión adhesiva cilíndrica con ensamble de elementos concéntricos, en este caso en condiciones de ensayo por cargas de torsión pura.

Lin [42], utilizando una técnica de experimentos de tipo factorial para ensayos a solape por tracción en uniones adhesivas epóxicas con sustratos de acero SAE 1006 galvanizado, con geometrías rectangulares, encontró correlaciones de cinco factores influyentes en la resistencia mecánica de la junta, considerando el contenido de humedad durante el proceso de curado. Estos factores están asociados con: la temperatura y el tiempo de curado, la humedad ambiental, la temperatura ambiente y el tiempo. Reportó que la temperatura de curado es el factor más influyente que afecta la resistencia de las uniones de acero SAE1006 galvanizadas unidas con adhesivo. A temperatura de $180^{\circ}C$ y 20 minutos de curado se alcanza la mayor resistencia mecánica independientemente de la variación de los demás factores alcanzando un valor de 220 *psi* a tracción.

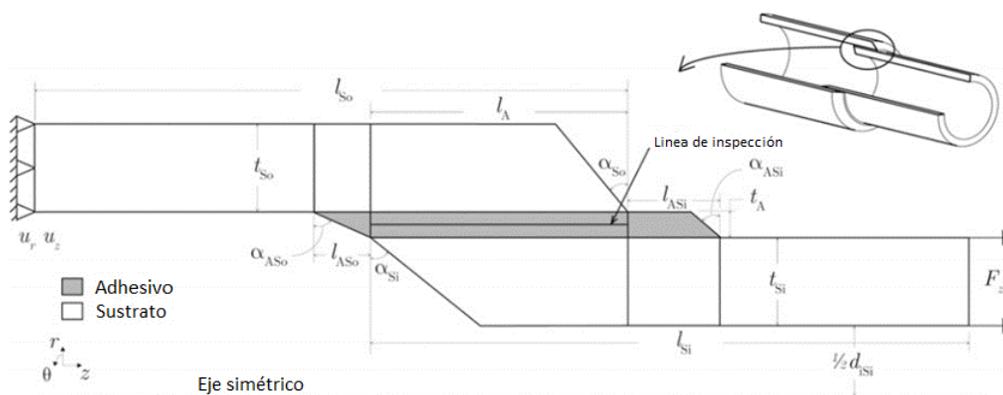
Labbé-Drouet [40], tomó como referencia un chasis tubular genérico de un vehículo de transporte terrestre como estructura de ensayo y propuso un procedimiento de diseño óptimo para identificar algunas configuraciones de juntas adhesivas cilíndricas a solape simple (TSL) sometidas a carga axial, usando como herramienta de cálculo el método de elementos finitos bidimensional para evaluar el comportamiento mecánico de la junta y un método de optimización dimensional multi-objetivo combinado con algoritmos evolutivos que es importante considerar como referencia para el desarrollo de la metodología para el diseño de la junta adhesiva cilíndrica, que se ha llevado a cabo en este proyecto. El procedimiento de diseño óptimo propuesto por Labbé-Drouet [40] en el estudio consistió en desarrollar las tres etapas que se ilustran en el esquema de la Figura 2-7 y que se describen a continuación:

Figura 2-7: Etapas propuestas para el proceso del diseño óptimo de una junta de chasis tubular [40].



Etapa 1: inicia con la construcción del Modelo de Elementos Finitos (MEF) considerando los parámetros de: propiedades mecánicas y masa del material (sustrato); geometría de la junta tubular simple y establecimiento de los parámetros geométricos (espesor de adhesivo, espesor de sustrato, longitud de traslape), según el esquema de la Figura 2-8, en la cual se resalta una línea de distribución y concentración de esfuerzos ubicada sobre el plano medio de la junta adhesiva.

Figura 2-8: Parámetros geométricos, carga y condiciones de frontera del MEF propuesto por Labbe [40].

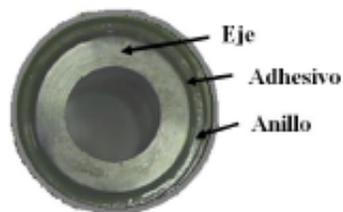


Etapa 2: consistió en realizar un estudio paramétrico para evaluar la influencia de cada parámetro geométrico (variables y/o factores de entrada) sobre la resistencia mecánica de la unión (variable de salida) y establecer el intervalo sobre el cual existe esta influencia, definiendo las variables del proceso para la optimización (variables de entrada) y el rango de valores (niveles del factor y/o de las variables de entrada) que se utilizan para dicho proceso de optimización.

Etapa 3: consistió en definir el problema de optimización y de ejecución de los procesos para la optimización. Con las variables de salida definidas en los pasos anteriores del proceso de optimización, sólo las restricciones requeridas se dejan para establecidas en esta etapa. Una vez ajustados los parámetros del algoritmo genérico, se ejecuta el proceso de optimización para encontrar las configuraciones óptimas. El estudio paramétrico reportó que todas las variables dimensionales tienen una influencia significativa en el perfil de esfuerzos del adhesivo (representados por la distribución de esfuerzos sobre la línea en el plano medio), con la excepción del extremo cónico de los sustratos en el intervalo de valores de $0^\circ - 45^\circ$. Los resultados del estudio de optimización que se llevaron a cabo mostraron una influencia significativa entre la masa de la junta y su resistencia mecánica. La configuración (diseño geométrico) de junta óptima se caracterizó por tener una longitud considerable de unión adhesiva, una capa delgada de adhesivo y un diámetro interno considerable del sustrato. También, se encontró una relación de tipo lineal entre los espesores de los sustratos.

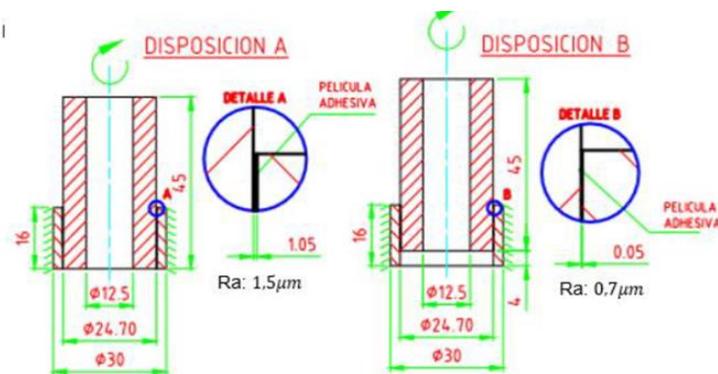
La investigación realizada por Gil [23], evalúa la influencia de algunos parámetros de diseño (rugosidad, área de contacto, longitud, espesor) en la resistencia mecánica a torsión de una junta adhesiva cilíndrica utilizando un adhesivo anaeróbico comercial. En dicho estudio, se plantea un ensamble tipo pasador-anillo (ver Figura 2-9), con ajuste deslizante utilizando un sustrato de acero SAE 4140 y un adhesivo anaeróbico comercial, marca Loctite, referencia 648. Para el diseño y construcción de la junta adhesiva utilizada en algunos puntos de la estructura del chasis go kart, en este proyecto de investigación, se han considerado los parámetros geométricos de la unión obtenidos por Gil [23], sumado a los resultados previos, obtenidos en la investigación de García [22], para el parámetro de rugosidad superficial, considerando un diseño de unión adhesiva cilíndrica con adhesivos estructurales de naturaleza anaeróbica.

Figura 2-9: Ensamble de junta adhesiva tipo pasador- anillo utilizada por Gil [23].



Para el diseño de la junta adhesiva cilíndrica a implementar en esta investigación, se tomaron los niveles de ($0.7 \mu m$ y $1.5 \mu m$) para el factor de rugosidad superficial Ra , los niveles de ($12 mm$ y $16 mm$) para la longitud de la unión y los niveles de ($0.1 mm$ y $0.3 mm$) para el factor de espesor de la unión. Se determinaron las combinaciones estadísticas para estas variables que generen los mayores y menores valores de resistencia a la falla por torsión, utilizando la metodología del diseño experimental 2^k . Se consideraron dos arreglos geométricos de diseño para la unión adhesiva; Disposición A: (longitud de traslape: $16 mm$, rugosidad superficial: $1.5 \mu m$, espesor de adhesivo: $0.15 mm$). Disposición B: (longitud de traslape: $12 mm$, rugosidad superficial: $0.7 \mu m$, espesor de adhesivo: $0.05 mm$). Ver Figura 2-10.

Figura 2-10: Caracterización de las condiciones mínima y máxima de la junta adhesiva para evaluar el diseño de la unión adhesiva [23].



Se evaluaron la fuerza y el desplazamiento de la unión cargada estáticamente a torsión pura. Además, se resalta que los tres factores evaluados (longitud, rugosidad y espesor) influyen en la resistencia última a la falla por torsión, en donde el factor de longitud de traslape tuvo la mayor

influencia, se le atribuyó la mejor distribución de esfuerzos cortantes sin incidencia significativa en la concentración de los esfuerzos en los extremos de la unión.

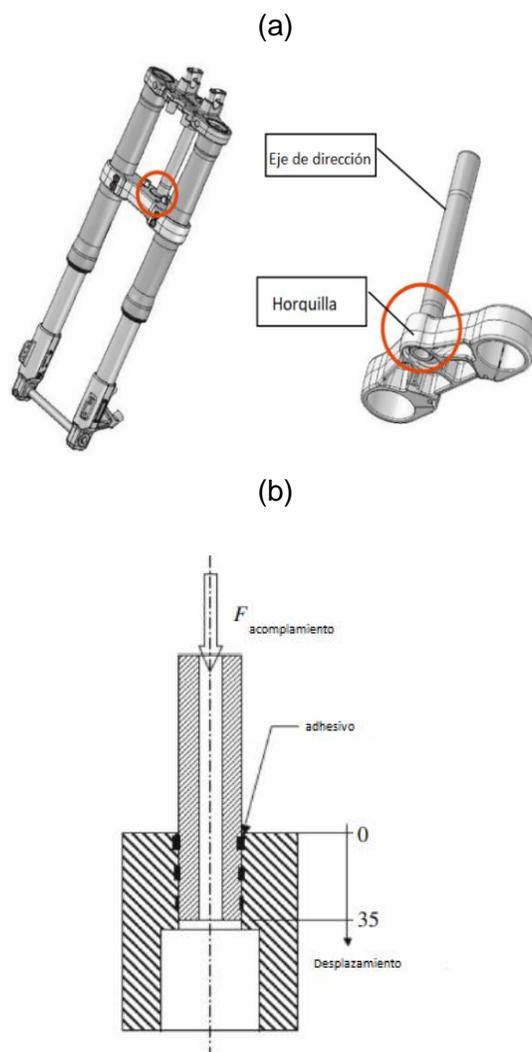
Se resalta de dicho estudio, que el incremento del área y superficie de contacto dada por la interacción espesor-longitud y rugosidad-longitud en el diseño de la unión con la condición de diseño máxima, influyeron en la deformación plástica favoreciendo el comportamiento dúctil caracterizado por una distribución más uniforme de los esfuerzos. Mientras que la interacción espesor-longitud y rugosidad-longitud para el diseño de la unión con la condición mínima de diseño, favoreció el incremento de la rigidez que caracterizó el comportamiento mecánico frágil de la unión adhesiva.

Ledesma [3], en su investigación sobre el diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas pone a prueba cuatro tipos de adhesivos para el análisis de la resistencia mecánica. La resistencia a la rotura se ha determinado mediante ensayos de cizalladura por tracción a solape simple, sometiendo las uniones adhesivas a un desplazamiento constante. En su estudio, se discutió la influencia del tipo de adhesivo sobre la resistencia mecánica de la unión adhesiva, considerando cuatro familias de adhesivos. En particular, la familia del cianoacrilato (CN) mostró los mayores valores de resistencia mecánica, seguidos de cerca por los del tipo epóxico (EPO), mientras que los que presentaron los menores valores de resistencia mecánica fueron del tipo poliuretano (PUR) y aún más bajos los del tipo silano modificado (MS). También se resalta que un incremento en el valor de la rugosidad superficial obtenido mediante un proceso manual de lijado mejora alrededor de un 13% los valores de resistencia mecánica.

Se destaca la metodología del diseño de experimentos utilizados en los diferentes trabajos de influencia de parámetros, en particular el *diseño factorial*, por su uso práctico en las etapas exploratorias para identificar factores altamente influyentes. Sin embargo, estas metodologías han sido poco exploradas en el diseño de uniones adhesivas cilíndricas, consideraciones importantes que se tuvieron en cuenta en este trabajo experimental exploratorio para aplicar al diseño de las uniones adhesivas en el ensamble del chasis go kart (tubular), aunado a una alta resistencia mecánica de los sustratos en la dirección radial cuando las uniones cilíndricas se someten a esfuerzos de corte y pelado en ensambles a solape simple.

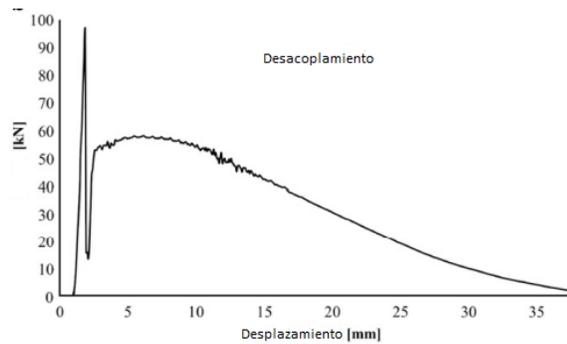
Croccolo et al., [43] evaluaron la resistencia estática y dinámica de una junta adhesiva cilíndrica aplicada a la horquilla de la suspensión delantera de una motocicleta con dos tipos de acoplamientos acero-acero y acero-aluminio, de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 2-11. En dicho experimento, cada acoplamiento fue sometido a 106 *ciclos* sucesivos en ensayos de fatiga por tensión-tensión para evaluar la resistencia residual de la unión adhesiva. Una vez, cumplidos los 106 ciclos de ensayo establecidos, se determinó la fuerza de desacoplamiento y el esfuerzo cortante.

Figura 2-11: (a) Suspensión delantera de motocicleta con eje de dirección acoplada a la horquilla; (b) montaje acoplamiento para la prueba a tracción de la unión adhesiva [43].



El comportamiento mecánico de la unión para el desacoplamiento se ilustra en la Figura 2-12 para una fuerza máxima aplicada de 98 kN y un valor de esfuerzo cortante de 29.7 MPa , que representa la resistencia máxima de la unión antes de fallar, caracterizada en su parte inicial por el almacenamiento proporcional y en su parte final por la liberación forzada de energía elástica.

Figura 2-12: Tendencia de la fuerza en desacoplamiento del ensamble acero-aluminio [43].



Además, deduce que: “*el comportamiento mecánico de los ensambles acero-acero es significativamente diferente al de los ensambles acero-aluminio dada la diferencia de elasticidad y dureza del aluminio con respecto al acero*” [43].

3. Materiales y métodos

Este capítulo consta de tres partes, la **primera** consiste en determinar las cargas presentes en el chasis y los esfuerzos a los cuales está sometido, mediante un estudio teórico y simulación por elementos finitos; la **segunda** describe el procedimiento de construcción y ensamble de un prototipo de chasis monoplace go kart utilizando el diseño de uniones adhesivas cilíndricas; la **tercera** parte se concentró en la evaluación del comportamiento mecánico de las uniones adhesivas apoyado en un diseño experimental 2^k con realización de pruebas destructivas de torsión pura en las uniones adhesivas diseñadas. También se describe con detalle el proceso de montaje y curado de las uniones adhesivas diseñadas sobre el chasis go kart, que utilizaron un adhesivo de la familia anaeróbica, de referencia comercial Loctite 648, de uso frecuente en ensambles y fijación de elementos cilíndricos.

3.1 Cálculo de los esfuerzos sobre el chasis

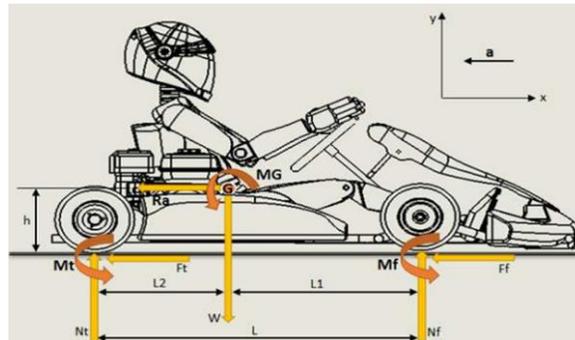
Como referencia para este estudio, se tomó el vehículo go kart adquirido por el grupo de investigación DIMEC, vehículo de competencia que cumple con la normativa CIK/FIA, con las características generales que se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Dimensiones generales chasis go kart.

Dimensiones generales [mm]		Masas [kg]	
Largo total	1550	Chasis	11.44
Ancho total	860	Piloto	75
Altura total	345.7	Motor	25
Distancia entre ejes	1050		
Diámetro de tubería	32		

Es importante establecer un diagrama del cuerpo rígido del chasis para calcular la distribución de peso en cada eje motriz considerando un movimiento uniforme sobre un plano horizontal. Como se ilustra en la figura 3-1, un diagrama bidimensional del kart con las fuerzas normales, fuerzas de fricción, cargas permanentes y variables.

Figura 3-1: Diagrama bidimensional del kart para transferencia longitudinal de peso



Las fuerzas presentes son las siguientes:

N_f : Fuerza normal eje delantero en Newton (N) .

F_f : Fuerza de fricción neumático delantero, (N)

N_t : Fuerza normal eje trasero en Newton.

F_t : Fuerza de fricción neumático trasero, (N)

W : Carga total, peso del kart más piloto, (N)

r_a = Resistencia aerodinámica al avance.

M_f : Momentum frontal de resistencia a la rodadura (Nm)

M_t : Momentum trasero de resistencia a la rodadura (Nm)

MG : Momentum sobre el centro de masa o centro de gravedad (Nm)

L : Distancia entre ejes (m)

L_1 : Distancia del centro de gravedad respecto al eje delantero (m)

L_2 : Distancia del centro de gravedad respecto al eje trasero (m)

h : Altura del centro de gravedad respecto al suelo (m)

A continuación, se determinaron los valores de las cargas a los que está sometido el chasis y posteriormente utilizando el método de análisis por elementos finitos se evaluaron los esfuerzos

mecánicos de los elementos de la estructura sometidos a las cargas combinadas con el propósito de identificar y caracterizar algunas zonas críticas para las uniones adhesivas en condiciones de operación real del chasis. Es importante resaltar que de acuerdo con los resultados de algunas investigaciones tomadas como referencia para este proyecto [8, 13, 17, 18, 19, 30, 32], se ha considerado que los esfuerzos de *flexión* y de *torsión* corresponden a *esfuerzos críticos* a los que está expuesta la estructura (chasis). También, se ha identificado que las zonas críticas con mayor sollicitación mecánica son las cercanas a los puntos de apoyo con el suelo.

3.1.1 Determinación de cargas

Para el chasis se consideraron dos tipos de carga, las cargas permanentes (G), debidas al peso de los componentes del vehículo, peso del conductor y de la misma estructura; y las cargas variables (Q) debidas a las cargas dinámicas generadas por la aceleración, frenado y giros del vehículo simulando condiciones de operación.

Las cargas permanentes (G) corresponden a la sumatoria de todos los pesos que soporta y constituye la propia estructura. Mediante la ecuación (1) se determina la fuerza aplicada.

$$F = w * g \quad (1)$$

- Motor: aproximadamente un peso de 25 kg (245 N)
- Conductor: 75 kg (735 N)
- Chasis: el material de fabricación de la estructura fabricada corresponde a un acero estructural ASTM-A36 (tubería comercial) y tiene un peso total de 11.44 kg (112.1 N)

$$G = \sum F$$

$$G = 245N + 735N + 112,1N$$

$$G = 1092,1N$$

Las cargas variables (Q) se determinaron para situaciones de frenado, aceleración brusca y cargas durante el giro en curvas.

- Carga en el frenado ($F_{frenado}$): es considerada normalmente como el peso de toda la estructura del vehículo, en condiciones de aceleración o desaceleración, tomado de la norma INEN 2313, $a = 4 m/s^2$.

$$F_{frenado} = M_{total} * a$$

$$F_{frenado} = 165 kg * (-4 \frac{m}{s^2})$$

$$F_{frenado} = -660N$$

- Carga en aceleración: se considera cuando hay aumento súbito de velocidad, con aceleración positiva. Por lo tanto, este valor es positivo a diferencia de la fuerza de frenado.

$$F_{aceleración} = 660 N$$

- Carga de giro: generadas en situaciones de curva en pista a determinada velocidad. Para determinar esta carga se toma una velocidad promedio de $25 m/s$ y un radio promedio para las curvas de $350 m$.

$$G = (M_{total}) * \frac{v^2}{r}$$

$$G = (165 kg) * \frac{(25 \frac{m}{s})^2}{350 m}$$

$$G = 294.6 N$$

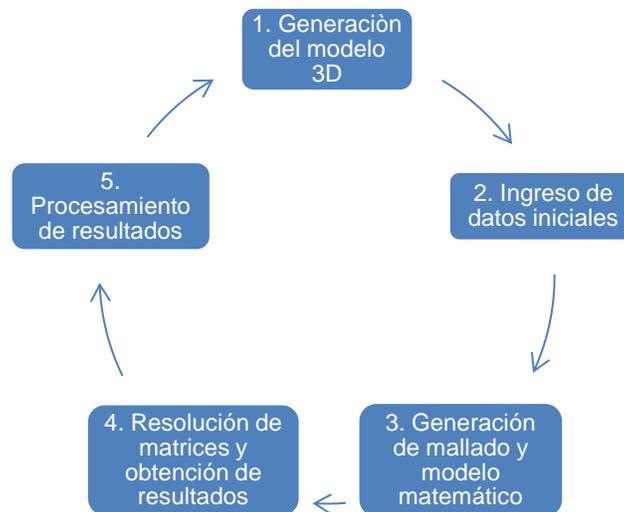
Los puntos de aplicación de las cargas se ubican en los apoyos del motor, del asiento del conductor y las correspondientes reacciones en los apoyos sobre con el suelo.

3.1.2 Análisis estructural del chasis mediante FEA

Se utilizó el método de elementos finitos (FEA) para pronosticar la respuesta de la estructura del chasis go kart para soportar las fuerzas que se presentan frente a algunas condiciones de operación, considerando los parámetros reportados en la literatura [15] y que se han utilizado en

este estudio. Las etapas del procedimiento general que se ha llevado a cabo para dicho análisis FEA, se sintetizan en el esquema de la Figura 3-2.

Figura 3-2: Proceso para la realización de un análisis de esfuerzos mediante FEA.



Para el caso de estudio el *modelo CAD* del chasis se elabora en el programa *SolidWorks*, según la Figura 3-3 y el análisis de los nodos en los puntos de la unión adhesiva se realiza en el programa *ANSYS Workbench*. Teniendo en cuenta las condiciones y las cargas reportadas por Quezada [15].

Figura 3-3: Modelado CAD del chasis.



Selección de material: acero estructural ASTM-A36. En la Tabla 3-2 se presentan las propiedades mecánicas del acero estructural, utilizadas en el proceso de simulación por elementos finitos, tomadas de la base de datos del *software ANSYS Workbench*.

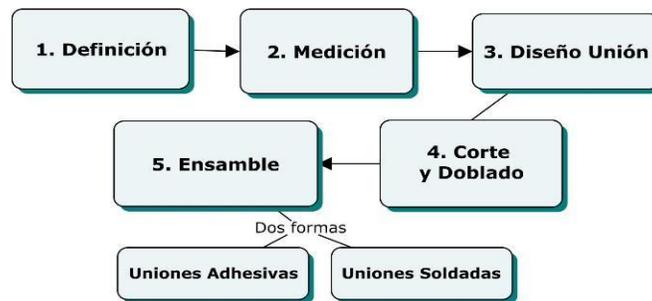
Tabla 3-2: Propiedades mecánicas del acero ASTM-A36.

Propiedad	Valor	Unidad
Modulo elástico	2000000	N/mm^2
Coefficiente de Poisson	0.26	Adimensional
Densidad de masa	7850	kg/m^3
Resistencia tracción	399.9	MPa

3.2 Metodología para la construcción y ensamble del chasis con uniones adhesivas

El diseño de la metodología se basa en un procedimiento secuencial descrito en cinco etapas que incluyen la selección de los puntos críticos de la estructura del chasis go kart donde se ubican las uniones adhesivas, hasta llevar a cabo el proceso de ensamble. La Figura 3-4 ilustra un diagrama general de la propuesta metodológica que se desarrolló en este trabajo para la construcción y ensamble del chasis monoplaza, según la norma CIK/FIA.

Figura 3-4: Metodología para la construcción y ensamble de un chasis vehicular con uniones híbridas [50].



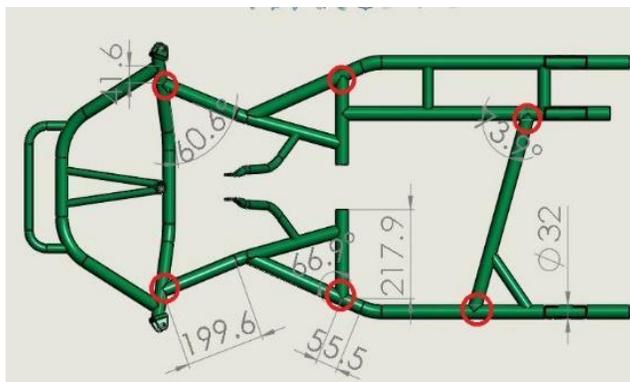
3.2.1 Etapa de definición

Esta etapa consiste en identificar los nodos de la estructura (chasis) del go kart, los cuales reemplazarán las uniones originalmente soldadas con uniones adhesivas. Apoyados con los resultados del estudio de evaluación de esfuerzos sobre el chasis original (con uniones soldadas), se selecciona los puntos críticos con los mayores valores de esfuerzos y se determina el tipo de comportamiento rígido o flexible, dado que en este estudio se quiere poner a prueba la unión adhesiva en condiciones extremas y determinar su comportamiento mecánico.

3.2.2 Etapa de medición

En esta etapa se identifican las variables geométricas de la unión más relevantes para el diseño de la junta adhesiva, las cuales buscan garantizar una alta resistencia mecánica, particularmente en términos de esfuerzos de torsión y flexión. Es necesario la elaboración de planos de los nodos y de los elementos rígidos a ensamblar con uniones adhesivas. Considerando la normativa CIK/FIA, se determinan los diámetros internos y externos de los componentes estructurales involucrados en el nodo; el ángulo de la unión de los elementos cilíndricos (tubería) a ensamblar de acuerdo con la geometría de la estructura, y el espesor de la tubería, como se ilustra en la Figura 3-5.

Figura 3-5: Caracterización de los nodos seleccionados: 6 puntos en el chasis; diámetro de la tubería de 32 mm; espesor de la tubería de 3 mm; ángulos de diseño en zona delantera de 60.6° , en zona media de 66.9° y en zona trasera de 73.9° .

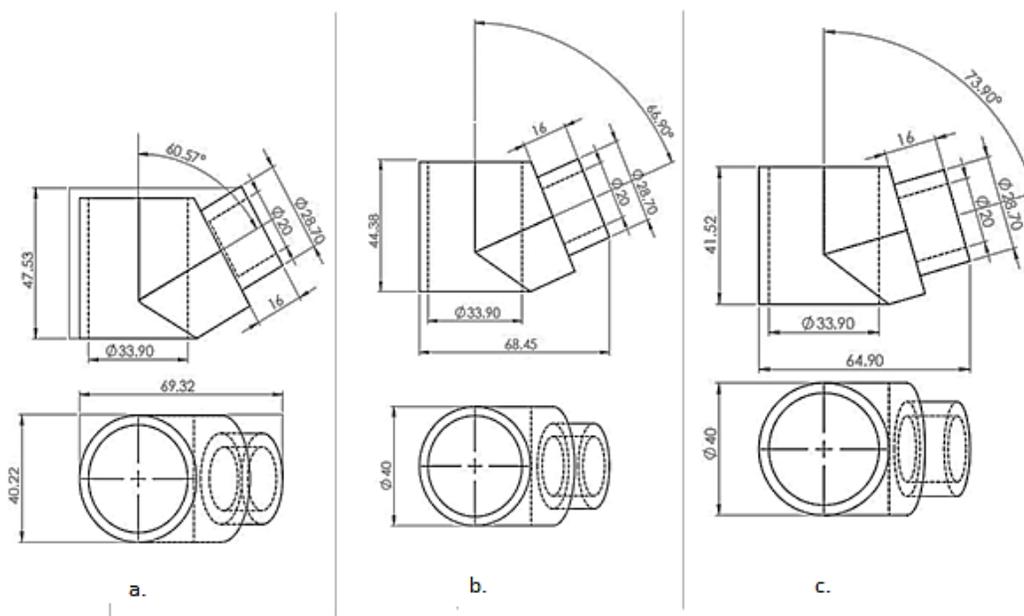


3.2.3 Etapa de diseño de la unión adhesiva sobre el chasis

Se utilizó el sistema de junta adhesiva cilíndrica tipo macho-hembra, debido a que los elementos a unir son tubería cilíndrica en acero. Los parámetros geométricos fueron estudiados previamente por García [22] y Gil [23], utilizando diseños de experimentos sometidos a torsión pura en geometrías cilíndricas. Por tal motivo, en este trabajo se consideraron estos parámetros geométricos para los diseños de las juntas adhesivas con geometría cilíndrica, incluyendo en su diseño la geometría angular específica que requiere el go kart, según la Figura 3-5. Estos ensambles diseñados en cada nodo de unión fueron sometidos a pruebas de resistencia mecánica a torsión. En este proyecto, los parámetros considerados para el diseño de la unión fueron: longitud de traslape de 16 mm; espesor de la película de adhesivo de 0.3 mm; y parámetro de rugosidad superficial de 1.8 μm - 2.6 μm . El diseño de la junta adhesiva se soporta con la herramienta de *software* de diseño *SolidWorks*, la cual permitió el modelado mecánico en 3D de las uniones de la estructura go kart. Con esta herramienta se evaluaron los prototipos de diseño de las uniones antes de su fabricación final, facilitando la identificación y/o corrección de posibles puntos y/o zonas de fallas y sus causas.

En la Figura 3-6 (a) se ilustra el modelo CAD de la unión uno, en donde dos modelos similares se ubicaron en la zona delantera del chasis. En la Figura 3-6 (b), se ilustra el diseño de la unión dos, la cual se ubica en la zona central del chasis, y en la Figura 3-6 (c) se ilustra el diseño de la unión tres, que se ubica en la parte trasera del chasis.

Figura 3-6: (a) planos de diseño de la unión 1; (b) unión 2; (c) la unión 3 sobre el chasis go kart.



Los diámetros de las uniones a obtener mediante procesos de mecanizado para las zonas de ensamble de las tuberías estructurales sobre el chasis, considerando el ángulo de la unión en cada zona, son de especial cuidado durante el proceso de manufactura y de diseño. De esta cota geométrica depende que la unión funcione correctamente durante el ensamble del chasis. Por esta razón, fue necesario realizar un prototipo de unión en cada una de las zonas: delantera, media y trasera; para verificar que el diseño fuera adecuado y para corregir y/o mejorar los ajustes a las cotas de posición.

a. Material para la fabricación de la unión adhesiva

El material seleccionado para realizar la manufactura de la unión fue el al duraluminio que corresponde a una aleación de aluminio y cobre, creada por primera vez en 1909 por Wilm en Alemania. La composición química fundamental de dicha aleación es cobre (2.5-4.5%); silicio (0.3-0.9%); magnesio (0.3-1.0%); manganeso (0.5-0.8%), el resto es aluminio y se obtiene comercialmente.

Entre las propiedades físicas y mecánicas principales de esta aleación se tienen: punto de

fusión entre 503-540°C; peso específico entre 8.75 kg/dm³; carga de rotura en estado bonificado entre 31-50 kg/mm²; carga de debilitación entre 17-44 kg/mm²; porcentaje de alargamiento a la rotura entre 8-37%; resiliencia entre 8.8 kg/cm² y dureza Brinell entre 85-142 kg/mm² [9]. Estas propiedades indican que el duraluminio es un material dúctil, maleable, liviano, de alta resistencia mecánica con bajo peso, con buena maquinabilidad, con especificaciones mecánicas que cumplen con las solicitaciones mecánicas de la unión soldada original en el chasis. Además, es un material comercial y se obtiene a un costo razonable.

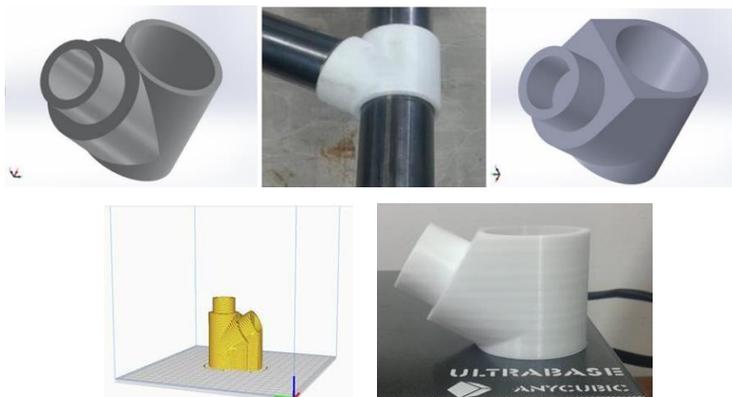
Las anteriores consideraciones se tuvieron en cuenta para la selección del material duraluminio a utilizar en el diseño y construcción de las uniones adhesivas tubulares a implementar en el ensamble estructural de algunas uniones del chasis go kart, las cuales se utilizarán con un adhesivo anaeróbico para la adhesión de los sustratos. Adicionalmente, como el proyecto experimental correspondió a un diseño exploratorio de junta adhesiva sobre un chasis de go kart, sin mayores antecedentes en la literatura, con estructura de acero (estructura del chasis go kart), parte de esta exploración, consistió en la utilización de este tipo de material duraluminio, en particular por sus propiedades mecánicas.

b. Prototipado mediante impresión 3D

Se realizaron prototipos previos de acuerdo a los planos de la Figura 3-6, utilizando un proceso de manufactura aditiva por FDM empleando Poliácido Láctico (PLA, por sus siglas en inglés) como material de aporte. Los parámetros de impresión se programaron mediante el *software Repetier-Host*; el tiempo promedio de impresión para cada pieza fue de dos horas con una calidad superficial aceptable, una densidad del material aportado del 10% y un consumo de 48 gramos de material en promedio.

Los prototipos permitieron verificar las dimensiones, ángulos y geometría de las piezas con respecto al chasis, además, de realizar algunas adecuaciones geométricas exteriores al modelo inicial que permitieron reducir el tiempo de mecanizado CNC, optimizar el sistema sujeción de la pieza y hacer más eficiente los procesos de remoción de material reduciendo zonas agudas y/o “*concentradores de esfuerzos*”. También, se logró optimizar el proceso de montaje y la cantidad de herramientas requeridas para el maquinado de las superficies en CNC. Este proceso se esquematiza de manera secuencial, en las imágenes ilustradas en la Figura 3-7.

Figura 3-7: Secuencia de fabricación de prototipos en impresora 3D previo al maquinado de la unión cilíndrica a utilizar en el diseño de la unión adhesiva.



(a) prototipo CAD inicial; (b) verificación del ensamblaje del primer prototipo impreso mediante FDM para optimizar el diseño; (c) evolución geométrica del CAD modificando geometría externa; (d) vista previa de la impresión mediante *Repetier-Host*; (e) prototipo del diseño final impreso en cama base de la impresora 3D *Anycubic I3 Mega* que contiene las modificaciones y ajustes al diseño inicial.

c. Proceso de mecanizado en máquina CNC HASS UMC-750 5 ejes

Una vez, realizada la programación de maquinado en CNC, mediante el *software SprutCAM*, se procede a realizar la manufactura de la unión, proceso que se llevó a cabo en una máquina herramienta CNC HAAS UMC-750 5 ejes, con fresas de acero rápido y diámetros de 8 mm y 16 mm. La fresa de diámetro 16 mm se utilizó para la etapa uno, dos, tres y cinco del proceso de mecanizado; mientras que la fresa de diámetro 8 mm se utilizó en la etapa cuatro del proceso, en donde se debe mecanizar una zona de menor tamaño.

Dado que, con frecuencia, los códigos para el maquinado CNC, pueden conllevar a errores que ocasionen a algún daño en el proceso de maquinado (en la máquina CNC), o en el material (duraluminio), o en las herramientas de corte (fresas utilizadas en el corte CNC), se buscó eliminar estos posibles errores. Por lo tanto, se ensayó inicialmente el código CNC en un polímero de ingeniería que exige menos esfuerzo al arranque de viruta en la máquina, antes de realizarse el maquinado sobre el material final el duraluminio, también, previendo posibles daños

en la herramienta o una mayor generación de desperdicio de material. Para este propósito, se utilizó el polímero Nylon para realizar esta prueba.

Durante el proceso de mecanizado del material duraluminio, se toma el material con un sobredimensionado para fijarlo en el MS de trabajo de la CNC con un buen ajuste. A continuación, se ubica el material correctamente en la máquina, utilizando un palpador de bola de rubí que permitió relacionar el cero de la máquina con el cero del material. Luego, se ejecuta el código "G" de la primera etapa que mecaniza la zona superior de la unión para evitar un sobrecalentamiento entre la pieza y la herramienta de corte, se activa el líquido refrigerante con un flujo constante para evitar que la viruta se adhiera a la superficie de la herramienta. El montaje inicial del material en bruto para el maquinado de la unión, se observa en la Figura 3-8.

Figura 3-8: Ubicación del bloque del polímero Nylon en el MS de la CNC.



Una vez culminada la primera etapa de desbaste por capas en la zona superior, se procede a ejecutar la segunda etapa de desbaste en la zona cilíndrica. En el MS de la CNC se realiza la respectiva inclinación dependiendo del diseño de unión seleccionada en los planos de la Figura 3-6 que se requiera para el proceso de manufactura. Este proceso de mecanizado de la unión, se observa en la Figura 3-9, ilustrando que durante el proceso de corte se utilizó el fluido refrigerante. Este procedimiento se llevó a cabo durante la primera y segunda etapa del proceso de desbaste en la zona superior y la zona cilíndrica de la unión.

Figura 3-9: Mecanizado en CNC de la unión de material polímero Nylon para el ensamble adhesivo.

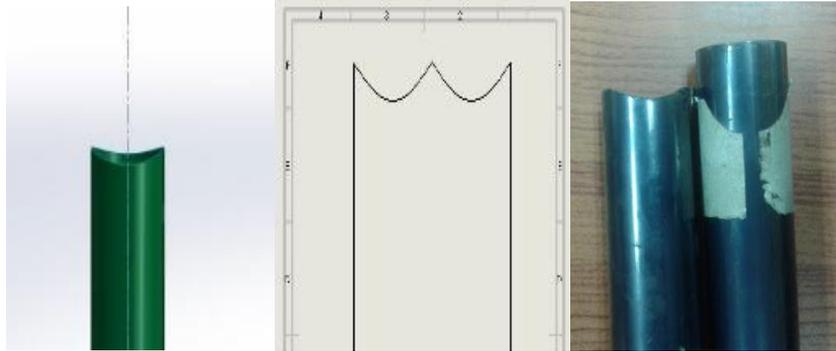


Estas dos etapas previas de maquinado sobre material Nylon, arrojaron buenos resultados, logrando un balance adecuado entre el tiempo de mecanizado y la calidad del proceso. Adicionalmente, no se presentaron sobre esfuerzos en la herramienta, ni en la máquina.

3.2.4 Etapa de corte y doblado

Consistió en fabricar todos los componentes del chasis (dirección, soportes de motor, de tracción, entre otros), una vez seleccionada la tubería, considerando los planos de diseño de las uniones para la manufactura CNC se verificó que cada elemento previo al maquinado garantizara las dimensiones generales contenidas en dichos planos. Un paso importante consistió en preparar los extremos de la tubería a unir, tanto con soldadura como con adhesivo. Los nodos del chasis que se unieron con soldadura, deben considerar la geometría en los extremos (boca de pescado), correspondiente a un corte de la tubería en forma angular para que se acople de manera suave a la superficie del tubo. En este proyecto, se consideró el uso de plantillas obtenidas mediante *software* CAD, las cuales se utilizaron para el mecanizado de la tubería en los extremos, como se ilustra en el esquema de la Figura 3-10.

Figura 3-10: Preparación de extremos de tubería.



En los extremos de la tubería, correspondiente a la zona de ubicación de la unión mecanizada, ver Figura 3-11, que forman parte de la junta adhesiva se verificó el diámetro interior y exterior de la unión, para garantizar la tolerancia dimensional del ajuste deslizante y controlar el espesor de adhesivo en la junta durante el proceso unión, teniendo presente las especificaciones de holgura diametral para el adhesivo seleccionado, según el fabricante de los adhesivos [8] para un tipo general de unión cilíndrica.

Figura 3-11: Preparación de extremos de tubería para el ensamble.



Adicionalmente, se resalta que el maquinado interior del tubo estructural que hace parte de la estructura del chasis en alguna de las zonas (delantera, media o trasera) considera un parámetro de longitud y/o traslape de la unión adhesiva, según su diseño, y el diámetro interior corresponde al diámetro exterior del ensamble de la Figura 3-6, cuya diferencia corresponde a la holgura diametral donde se aloja el volumen del adhesivo durante el proceso de formación de la unión adhesiva.

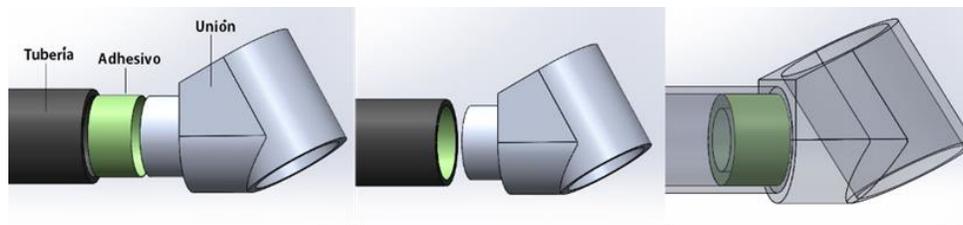
3.2.5 Etapa de ensamble

Durante el proceso de ensamble del chasis del go kart, que incluye la combinación de uniones soldadas con las uniones adhesivas en las tres zonas caracterizadas (delantera, media y trasera), el procedimiento establece que las uniones adhesivas se realizan en primer lugar y luego se procede con las juntas soldadas, dada la configuración del chasis y la ubicación de los puntos con unión adhesiva.

I. Ensamble de uniones adhesivas

En primer lugar, se realiza un proceso de limpieza de las superficies a unir, con alcohol de alta pureza como limpiador y/o con producto recomendado por el fabricante del adhesivo. Luego se aplica el adhesivo a los elementos cilíndricos de la misma en cada zona de unión. Finalmente, se deja secar y/o curar la unión adhesiva a temperatura ambiente y si se requiere acelerar el proceso de curado se somete a un gradiente de temperatura. Cada elemento del chasis se ubica en su posición con respecto a los planos, utilizando una matriz de soldadura diseñada para facilitar el proceso de montaje. El diseño de la matriz garantiza la concentricidad de la tubería con la unión diseñada (ver Figura 3-12). Por otro lado, el chasis debe cumplir con las especificaciones en los planos de referencia. Se resalta que el mecanismo físico-químico de capilaridad del adhesivo líquido sobre las superficies a unir, le permite desplazarse al interior de los poros superficiales llenando los espacios vacíos entre los sustratos (materiales a unir con adhesivos).

Figura 3-12: Ensamble de la tubería y la unión cilíndrica con el adhesivo anaeróbico.



II. Ensamble de uniones soldadas

Para los nodos del chasis que no se seleccionan para utilizar las uniones adhesivas se emplea uniones fijas con soldadura tipo TIG/MAG, que consiste en un proceso de soldadura con electrodo, en el cual, es probable la aparición de fisuras y/o deformaciones superficiales

dependiendo del tipo de material. Con la utilización de la matriz de soldadura diseñada para tal fin, se garantiza la correcta unión de todos los elementos del chasis y se evita la concentración de esfuerzos residuales sobre las uniones adhesivas, por diferentes razones de alineamiento y posicionamiento de los componentes dado que el ensamble sobre el chasis se realiza sobre un volumen que requieren control de las tres dimensiones, según puede apreciarse en los montajes que se ilustran en la Figura 3-13.

Figura 3-13: Ensamble de uniones con soldadura.



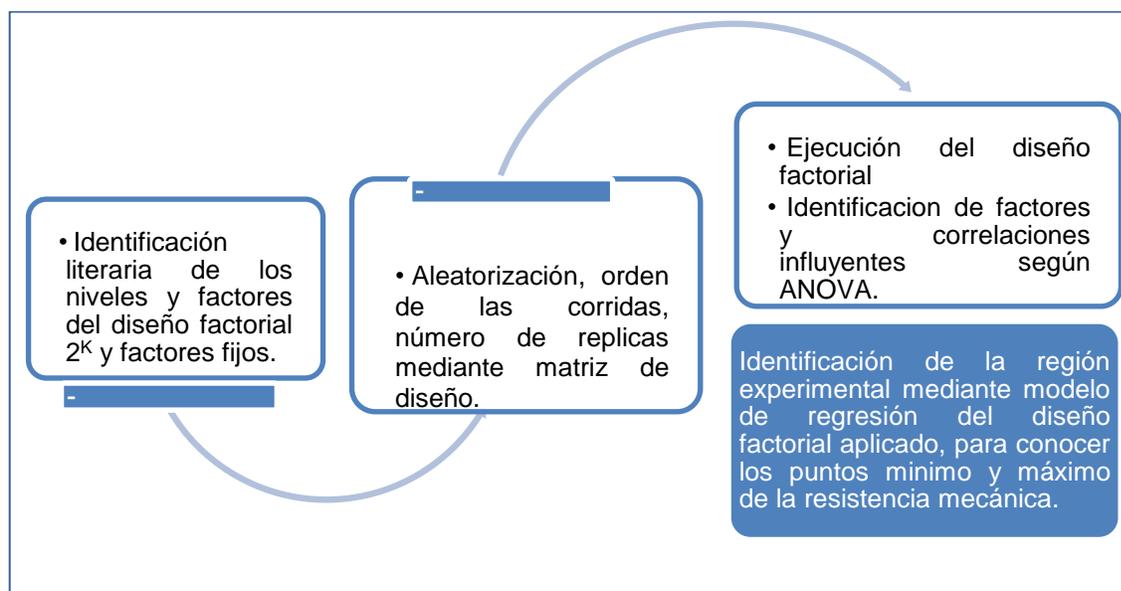
3.3 Parte experimental

Para la evaluación de la resistencia mecánica de la unión adhesiva utilizada para el ensamble del chasis, se realizó la construcción de probetas con los mismos parámetros geométricos de la unión diseñada, con el fin de realizar los ensayos destructivos a torsión y determinar las propiedades mecánicas de la unión. Los ensayos a torsión del diseño de junta adhesiva se llevaron a cabo mediante un diseño de experimentos 2^k , apoyados con la herramienta *Minitab*, programa diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas, mediante el cual se realizó el análisis de varianza (ANOVA), con el fin de optimizar los factores de diseño de la unión que influyen en la resistencia mecánica de la junta adhesiva. Para los ensayos destructivos se utilizó un equipo de pruebas a torsión, diseñado con mecanismos electromecánicos rotativo (servomotor-reductor) y un sistema de control que proporciona la información de la prueba fuerza-desplazamiento angular.

El procedimiento metodológico para el diseño experimental y su análisis respectivo se basó en la propuesta realizada por Gil [23], empleada para su investigación de influencia de parámetros

geométricos en el comportamiento mecánico de juntas adhesivas cilíndricas, según el procedimiento que se ilustra en el esquema de la Figura 3-14.

Figura 3-14: Diagrama identificación del diseño experimental estadístico ideal para la correlación de variables.



3.3.1 Diseño experimental

Dado el carácter experimental que caracterizó la investigación para el diseño de la unión adhesiva, según un diseño de experimentos 2^k (con k : factores independientes), se han considerado entre los factores experimentales el tipo de material de los sustratos y el volumen del adhesivo. Estas variables independientes para el estudio de influencia sobre el comportamiento mecánico de la unión (variable respuesta) se establecieron con dos diferentes niveles durante la fase experimental. La variable dependiente, variable respuesta o variable de salida para el diseño de experimentos 2^k , corresponde a la resistencia a la falla por torsión que caracteriza el comportamiento mecánico de la unión adhesiva. Los factores fijos que no varían durante el experimento, y que se han considerado para esta investigación, corresponden a la rugosidad, la holgura entre sustratos, el tipo de adhesivo, la temperatura, el tiempo de curado y la longitud de traslape.

Para efectos de esta investigación exploratoria y basados en un criterio de experiencia en los procesos de curado de uniones adhesivas, se selecciona como factor experimental el volumen

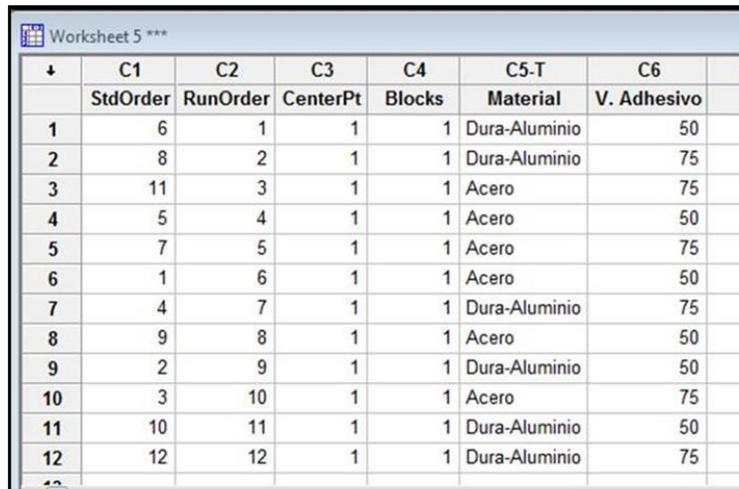
de adhesivo para la unión, y se toman dos niveles uno al 50% del volumen total y otro al 75% del volumen total. El otro factor corresponde al tipo de material de los sustratos y se seleccionan el acero y el duraluminio para efectos de comparación del comportamiento a la falla por torsión. La matriz de experimentos para el diseño de factorial 2^2 se presenta en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3:Datos para la matriz de experimentos para el diseño de factorial 2^2 .

Factores	Dominio experimental	
	Nivel mínimo (-)	Nivel máximo (+)
X1: Material sustrato	Acero	Duraluminio
X2: Volumen adhesivo (ml)	50%	75%

Como parte del procedimiento experimental, se obtienen cuatro combinaciones posibles y se establecen tres repeticiones, para un total de 12 pruebas. Mediante el *software Minitab* se obtiene de forma aleatoria las posibles combinaciones (orden de combinaciones casilla C1) y el orden de corrida de las pruebas (casilla C2), como se reporta en la imagen de la Tabla 3-4, tomada directamente del *software*.

Tabla 3-4:Orden y combinación de las probetas obtenidas mediante el programa *Minitab*.



	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Material	V. Adhesivo
1	6	1	1	1	Dura-Aluminio	50
2	8	2	1	1	Dura-Aluminio	75
3	11	3	1	1	Acero	75
4	5	4	1	1	Acero	50
5	7	5	1	1	Acero	75
6	1	6	1	1	Acero	50
7	4	7	1	1	Dura-Aluminio	75
8	9	8	1	1	Acero	50
9	2	9	1	1	Dura-Aluminio	50
10	3	10	1	1	Acero	75
11	10	11	1	1	Dura-Aluminio	50
12	12	12	1	1	Dura-Aluminio	75

Las respuestas del modelo factorial 2^k , están sintetizadas en una variable de respuesta o salida, la resistencia a la torsión. El análisis ANOVA y el modelo de regresión lineal e identificación de la región experimental para la resistencia mecánica de la junta permiten optimizar el diseño

experimental de la junta adhesiva mejorando ciertos parámetros de acuerdo con los factores considerados.

A continuación, se describe la preparación de las probetas de experimentación; el mecanizado de los sustratos de la unión adhesiva, el control de rugosidad superficial sobre los sustratos, el proceso de ensamble de la unión, el proceso de curado de la unión adhesiva y el procedimiento llevado a cabo para la realización de las pruebas de torsión.

3.3.2 Proceso de manufactura de probetas

La manufactura de las probetas se llevó a cabo en el Laboratorio de Procesos de Manufactura, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. La unión adhesiva (probetas de prueba) se conformaron mediante el ensamble de tubería-adhesivo-cilindro, de acuerdo con el numeral 3.2.5 y Figura 3-12, considerando un ajuste deslizante de las uniones cilíndricas. Tanto el diámetro interno de la tubería como el diámetro exterior del cilindro fueron maquinados considerando los parámetros de corte con el fin de controlar el parámetro (Ra) de rugosidad superficial.

En la Figura 3-15 se ilustran los componentes (macho y hembra) de la unión cilíndrica anaeróbica utilizada para los ensayos de torsión: se identifica la tubería en acero (elemento estructural del chasis) como el sustrato hembra y el sustrato macho que representa el cilindro utilizado en el ensamble del chasis monoplaza. En los sustratos se pueden identificar dos zonas: la zona de sujeción para manipulación y la zona de traslape para el alojamiento del adhesivo. Para el sustrato hembra (tubería) se realiza un mecanizado hexagonal con fines de facilitar la sujeción de la probeta con el eje del dispositivo de torsión en el banco de pruebas.

Figura 3-15: Probetas de prueba para la unión adhesiva. Izquierda sustrato A: macho; Derecha sustrato B: hembra (tubería acero).



De acuerdo con el diseño de experimentos, se fabricaron 12 sustratos de tubería de acero (sustrato A tipo hembra) y 12 sustratos cilíndricos (sustratos B tipo macho), 6 en material acero y 6 en material duraluminio con dimensiones a escala. En Tabla 3-5 se presentan las propiedades de los dos materiales utilizados para el ensamble de las probetas de torsión. De acuerdo con el diseño experimental, se mantuvo constante los parámetros de rugosidad y espesor del adhesivo, mientras que se controló experimentalmente la longitud de traslape y el volumen del adhesivo, según los parámetros geométricos mencionados anteriormente en esta fase experimental.

Tabla 3-5: Propiedades de los materiales de las probetas (sustrato A y sustrato B).

Tipo de Material		Módulo de Young E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Esfuerzo de fluencia S_y [MPa]	Esfuerzo Último S_U [MPa]	Elongación A [%]
Sustrato A	Acero	207	0.29	900	1050	3
Sustrato B	Aluminio 7075 T6	68	0.32	460	540	9

La rugosidad superficial de los sustratos se midió con un equipo rugosímetro portátil marca Tesa-Rugosurf-10G, dotado de un palpador punta de diamante que recorre una longitud determinada de superficie (*cut-off*) del material y entrega un reporte de los parámetros de integridad superficial de manera estadística. El montaje experimental de las probetas incluyendo el posicionamiento del equipo de medición de rugosidad sobre la muestra, se ilustra en la Figura 3-16.

Figura 3-16: Medición y control de los parámetros de rugosidad superficial en las probetas de la unión adhesiva con medición del sustrato macho.



En el diseño experimental, se consideró el parámetro de rugosidad superficial $R_a = 1.5 \mu m$ constante para todas las probetas, valor que ha sido considerado en este proyecto, debido a investigaciones previas reportadas [22,23]. Posterior al del proceso de mecanizado se verifico la rugosidad superficial (parámetro R_a) y los diámetros de cada sustrato para garantizar la tolerancia dimensional diametral del ensamble cilíndrico. La tolerancia considerada obedece a la recomendación del fabricante del adhesivo para el tipo de ensamble, y se encuentra en el intervalo de 0.01 mm a 0.030 mm ($10 \mu m$ a $30 \mu m$).

3.3.3 Ensamble unión adhesiva

El ensamble y fijación de los sustratos en la junta adhesiva se realiza mediante el adhesivo anaeróbico comercial de referencia 648 de la marca Loctite. En el proceso de curado, se toma como guía la propuesta metodológica para la construcción y ensamble de un prototipo de chasis go kart [50]. Para facilitar el proceso de ensamble de los sustratos cilíndricos, como accesorio de montaje, se diseñó una matriz rectangular compuesta por 12 probetas, que corresponden a los 12 tratamientos estadísticos obtenidos, establecidos en el diseño experimental 2^k , con el fin de llevar a cabo las uniones de manera simultánea y controlar las variables del proceso de curado. También se diseñó y fabricó mediante impresión 3D una matriz de ensamble para las probetas, con el fin de garantizar la concetricidad de los sustratos durante el ensamble con el adhesivo en el proceso de curado. La matriz de ensamble para concetricidad de los sustratos, se ilustra en la Figura 3-17.

Figura 3-17: Matriz de ensamble para las 12 probetas del diseño experimental 2^k , previo al proceso de curado de las uniones adhesivas.



Acorde con el proceso de ensamble llevado a cabo al momento de aplicar el adhesivo, previamente preparadas las superficies de los sustratos, se considera la información de la Tabla 3-6, para cuantificar el volumen de adhesivo según los diámetros de los sustratos (macho y hembra) y garantizar el espesor seleccionado de 0.30 mm .

En la Tabla 3-6, se indica las características de las probetas y los volúmenes determinados para el ensamble.

Tabla 3-6: Volumen de adhesivo a utilizar en el ensamble de las probetas.

Especificaciones geométricas	Volumen de adhesivo mm^3		
	100%	75%	50%
Radio externo (R_{ex}): 29 mm			
Radio interno (r_{in}): 28.7 mm	870.1	652.6	435
Longitud de traslape (L): 16 mm	0.87	0.65	0.44

El proceso de ensamble (ver Figura 3-18) se realizó de forma manual mediante las siguientes etapas: 1. *Aplicación del adhesivo*: se aplica el adhesivo sobre las superficies de los sustratos con ayuda de una jeringa dosificadora. 2. *Proceso de curado*: se llevó a cabo mediante una atmosfera controlada de temperatura a (80°C) en horno eléctrico por un tiempo de exposición de 1 hora, y luego de 24 horas a temperatura ambiente.

Figura 3-18: Proceso de ensamble de las probetas. Se requiere de un espacio limpio, uso de guantes de látex para evitar suciedades en las probetas, una jeringa para medir y controlar el volumen del adhesivo anaeróbico comercial referencia Loctite 648.



Las fases llevadas a cabo para el proceso completo de ensamble y curado de las uniones adhesivas se sintetizan en los siguientes pasos: 1. Medir el volumen de adhesivo; 2. Adicionar el adhesivo sobre las caras de los sustratos a unir; 3. Ensamblar las probetas; 4. Llevar a cabo el proceso de curado de las probetas.

En la Figura 3-19, se ilustra la disposición de las probetas hembra en la matriz de ensamble que posteriormente son sometidas al proceso de curado en horno a 80°C por 1 hora.

Figura 3-19: Proceso de curado de las probetas. Se utiliza un horno eléctrico, se controla la temperatura de 80°C por 1 hora, y luego se deja en reposo por 24 horas a temperatura ambiente.



3.3.4 Realización de pruebas de torsión

Las probetas fueron sometidas a torsión pura mediante pruebas de torsión, en un banco de pruebas que consta de un equipo servo-motorreductor controlado electrónicamente, de marca *SEW-Eurodrive* y *Hardware* (HMI) que permite la programación de algunas variables para el ensayo y el posterior registro de algunos parámetros de las probetas (ensambles) sometidas a los ensayos de torsión: torque aplicado sobre el ensamble adhesivo, velocidad de rotación angular en el eje del servo-motorreductor, desplazamiento angular que sufre el ensamble una vez se realiza la prueba de torsión y el tiempo de prueba, entre otros. En la Tabla 3-7, se reportan algunas características técnicas del dispositivo de prueba utilizados para los ensayos de torsión.

Tabla 3-7: Características técnicas del dispositivo utilizado para los ensayos de torsión.

Velocidad de aplicación de torque	0.133 <i>mA/s</i> (aprox. 6 <i>N m/s</i>)
Torque máximo	450 <i>N m</i>
Torque mínimo	0.3 <i>N m</i>
Corriente máxima del servo	13.20 <i>A</i>
Rango de ajuste de posición	0 – 360°
Resolución del rango de posición	1°
Temperatura de operación	20 °C
Dimensiones generales	1500 <i>mm</i> x 700 <i>mm</i> x 600 <i>mm</i>

Los datos de entrada utilizados para los ensayos de torsión cuasi-estáticos fueron los siguientes:

Datos de la prueba:

- Duración de la prueba: un (1) minuto.
- Velocidad: 5 *rpm*
- Aceleración: 0.5 mm/s^2
- Torque: 40 *N m*
- Dirección de rotación: izquierda (contrario a las manecillas del reloj).

En la Figura 3-20 se ilustra el sistema de acople mecánico utilizado para la sujeción de las probetas, durante las pruebas destructivas de torsión.

Figura 3-20: Sujeción de la probeta en el dispositivo para los ensayos de torsión.



Las probetas de ensayo se fijan con dos boquillas concéntricas, una se ubica sobre el eje de rotación del Servomotorreductor y la otra se fija a un soporte externo fijo. El movimiento del eje del Servomotorreductor hace rotar la probeta hembra (de mayor diámetro interior) junto con la boquilla que la mantiene fija, mientras que la probeta macho (de menor diámetro exterior) se mantiene fija al soporte externo.

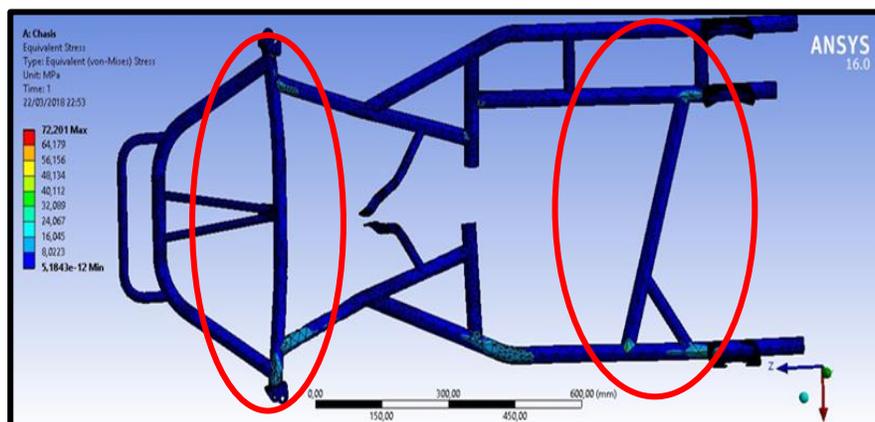
4. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados de los esfuerzos mecánicos sobre el chasis que fueron obtenidos mediante el análisis de elementos finitos con el fin de identificar las uniones críticas y las cargas sobre dichos elementos considerando algunas condiciones operativas durante el movimiento. También, se presentan los análisis del comportamiento mecánico del chasis considerando el diseño de experimentos 2^k utilizado para tal fin, adicionalmente se evalúa la región experimental y la superficie de respuesta donde se identifican los puntos de máximo y mínimo del valor de resistencia mecánica predecibles en el mismo diseño experimental.

4.1 Estudio elementos finitos para evaluación de cargas en el chasis

Este estudio permitió identificar las zonas o puntos donde se presentan los mayores valores de esfuerzos generados sobre el chasis. Del análisis estático por elementos finitos y de acuerdo con la literatura evaluada, se encontró que las zonas con mayor concentración de esfuerzos se obtienen en los puntos cercanos a los ejes delantero y trasero del vehículo, según se ilustra en la Figura 4-1.

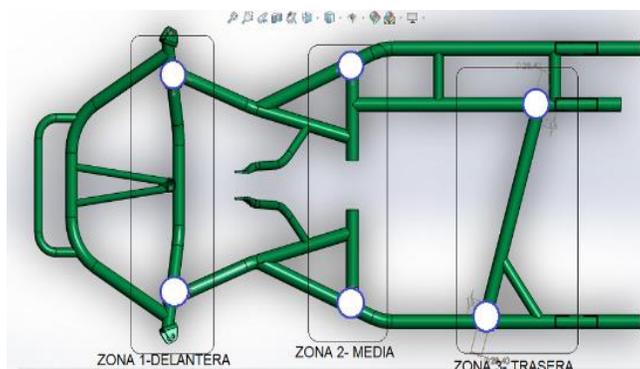
Figura 4-1: Resultado análisis estático del chasis.



Los esfuerzos máximos obtenidos reportaron una magnitud de 72.2 Mpa en la zona delantera. Según la distribución de pesos en la estructura y las condiciones de operación a las que está sometido el vehículo, se evidencia que el eje delantero está expuesto a sufrir más daños debido a los esfuerzos generados por las cargas permanentes.

Mediante el análisis de esfuerzos, se seleccionaron seis puntos en el chasis para el ensamble con uniones adhesivas, distribuidos entre la zona delantera y la zona trasera del chasis, tal como se ilustra en la Figura 4-2. En este sentido, los ensambles de las uniones adhesivas diseñadas fueron ubicadas en las zonas en las que presentaron los mayores esfuerzos, según el análisis de elementos finitos.

Figura 4-2: CAD en *SolidWorks* y caracterización de los nodos seleccionados.



Estos puntos críticos identificados para cada una de las zonas de la estructura (delantera, media y trasera), son vitales para considerar en el diseño de las uniones adhesivas en el chasis. Como propósito de esta investigación, se considera que el diseño de la unión adhesiva debe aportar algunas mejoras al desempeño de la estructura, en lo relacionado con disminución de la rigidez y la capacidad para absorber vibraciones durante su desplazamiento por la pista. El diseño de la unión adhesiva proporciona dos grados de libertad en rotación a ciertos elementos, considerando que se presentan pequeños desplazamientos angulares sin perder tracción con el piso en condiciones de movimiento lineal sobre curvas a altas velocidades, según se ilustra en la Figura 4-3, a diferencia de las uniones rígidas soldadas las cuales no permiten grados de libertad, dada su rigidez.

Figura 4-3: Ensamble de unión con elementos de tubería, donde se proporciona dos grados de libertad de la tubería.



4.2 Prototipo de chasis

Como parte de los resultados de este proyecto de investigación se obtuvo dos modelos experimentales de chasis monoplaza, con similares diseños de uniones adhesivas variando los materiales en algunos los elementos estructurales en la zona delantera, media y trasera. Un primer prototipo de chasis para la unión adhesiva permitió validar el diseño geométrico de la misma. También, fue necesario establecer un protocolo para el ensamble de la unión adhesiva al chasis. Adicionalmente, se realizaron algunos ajustes para mejorar el proceso de manufactura de los elementos de la unión, el de ensamble de las uniones con soldadura y simultáneamente, el de ensamble de las uniones adhesivas. Como consecuencia de estos ajustes y mejoras se realizó un segundo ensamble mejorado de las uniones adhesivas a un chasis, según se ilustra en la Figura 4-4.

Figura 4-4: Prototipos de chasis ensamblados con uniones adhesivas.



4.3 Resultados de las pruebas de torsión pura sobre las uniones adhesivas

En esta sección se presentan los resultados del comportamiento mecánico de la unión adhesiva, de acuerdo con el diseño de experimentos 2^k . Se evaluó la región experimental y la superficie de respuesta, que establecen las zonas con los valores de resistencia mínimos y máximos de resistencia a la torsión pura para la unión adhesiva. También se presentaron los principales mecanismos de falla en las probetas sometidas a torsión pura con propósitos de identificar posibles causas, efectos y su influencia en el comportamiento mecánico, discutiendo algunos parámetros geométricos y físico-químicos que pudieran influir en el comportamiento mecánicos.

En la Tabla 4-1, se presenta la matriz del diseño experimental 2^k con los resultados de los 12 tratamientos estadísticos correspondientes a cada una de las combinaciones de los factores experimentales y sus niveles, relacionados con el tipo de material de los sustratos y el volumen del adhesivo. La columna (C7) en la Tabla 4-1, presenta los resultados obtenidos para la resistencia mecánica a las pruebas de torsión pura para cada probeta.

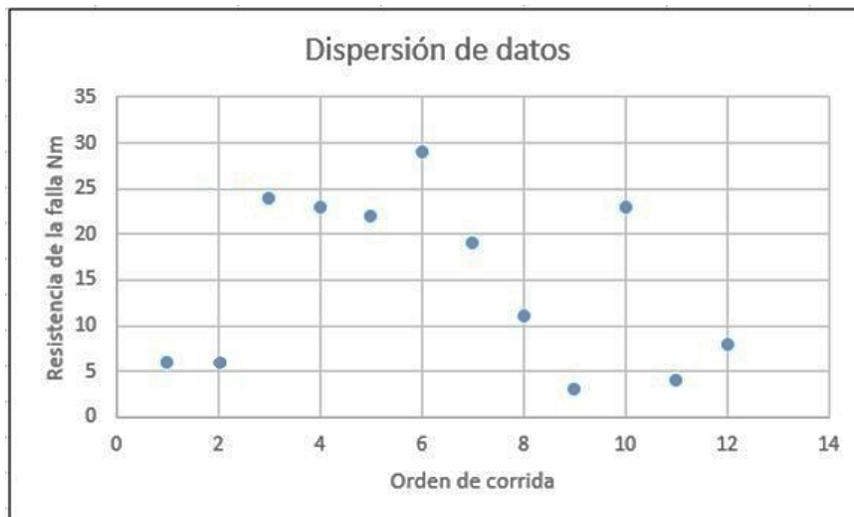
Tabla 4-1: Matriz de diseño experimental 2^k con resultados de resistencia mecánica a torsión pura para cada una de las 12 pruebas.

↓	C1	C2	C3	C4	C5.T	C6	C7
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Material	V. Adhesivo	Resist. Nm
1	6	1	1	1	Dura-Aluminio	50	6
2	8	2	1	1	Dura-Aluminio	75	6
3	11	3	1	1	Acero	75	24
4	5	4	1	1	Acero	50	23
5	7	5	1	1	Acero	75	22
6	1	6	1	1	Acero	50	29
7	4	7	1	1	Dura-Aluminio	75	19
8	9	8	1	1	Acero	50	11
9	2	9	1	1	Dura-Aluminio	50	3
10	3	10	1	1	Acero	75	23
11	10	11	1	1	Dura-Aluminio	50	4
12	12	12	1	1	Dura-Aluminio	75	8
13							

En la Tabla 4-1, se evidencia que la combinación del factor de material (Dura-Aluminio) y del factor volumen del adhesivo (al 50 y 75%) presentan los valores más bajos de la resistencia a la torsión en comparación con las otras combinaciones de factor material (Acero) y sus respectivas combinaciones de volumen de adhesivo (al 50 y 75%).

Los resultados de la variable respuesta comportamiento mecánico a las pruebas de torsión pura para este diseño experimental 2^k , cuya medida se realiza en ($N m$), acorde con la Figura 4-5 presentan una alta dispersión para los dos niveles del factor material (Acero y Dura-Aluminio), con valor máximo de 29 ($N m$) y mínimo de 3 ($N m$).

Figura 4-5: Análisis de dispersión para los datos de resistencia mecánica a torsión a partir del diseño de experimentos factorial 2^k .



Esta dispersión debida a la posible combinación de los factores (material del sustrato y volumen del adhesivo) y sus niveles (2 para materiales: Acero y Dura-Aluminio y 2 para el volumen de adhesivo: 50% y 75%) determinan un diseño de unión adhesiva que tiene correspondencia con un valor de torsión para un comportamiento mecánico determinado. Se resalta que para todos los arreglos aleatorios y experimentales se establecieron variables fijas como la rugosidad y la longitud de traslape; sin embargo, existe un posible porcentaje de error para el parámetro del espesor del adhesivo debido a que el sustrato “hembra” correspondiente a la tubería de acero estructural no presentó una geometría completamente concéntrica con el sustrato “macho” correspondiente a la unión cilíndrica y como consecuencia se presenta la posibilidad de que el adhesivo no alcanzó a rellenar completamente el espacio entre los sustratos y allí las consecuencias en el valor de resistencia a la torsión como medida del comportamiento mecánico de la unión adhesiva.

4.3.1 Análisis de varianza (ANOVA)

Mediante el análisis de varianza se determinó el factor experimental más influyente en la variable de salida o variable respuesta (resistencia a la falla por torsión). El valor p (p -value) correspondiente a la significancia estadística de cada factor de influencia sobre la variable de salida (variable respuesta: resistencia a la falla por torsión). En este sentido, los mínimos valores

indican la mínima probabilidad de que el efecto sea aleatorio, por lo tanto, se comporta como el factor más significativo.

Del análisis ANOVA presentado en la Tabla 4-2, se tiene que el factor correspondiente al material del sustrato presenta significancia estadística, dada por el valor de p (p -value) menor al 0.05, es decir el 5%, en este caso la probabilidad observada ($p = 0.019$) es menor que el valor p (valor $p = 0.05$).

Tabla 4-2: Análisis de varianza ANOVA, coeficientes R^2 y R_{aj}^2 estimados e influencia en la resistencia por torsión según el “valor p ”, para el factor significativo de material.

Two-way ANOVA: Resistencia Nm versus Material. Vol. Adhesive						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Material	1	363,000	363,000	8,56	0,019	
Vol. Adhesivo	1	176,333	176,333	4,16	0,076	
Interaction	1	96,333	96,333	2,27	0,170	
Error	8	339,333	42,417			
Total	11	975,000				

S = 6,513	R-Sq = 65, 20%	R-Sq (adj) = 52, 15%
-----------	----------------	----------------------

Analysis of Variance						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	2	34,667	34,667	17,333	0,165899	0,849664
Vol. Adhesivo	1	1,333	1,333	1,333	0,012761	0,912537
Material	1	33,333	33,333	33,333	0,319036	0,585989
Error	9	940,333	940,333	104,481		
Lack-of-Fit	1	0,333	0,333	0,333	0,002837	0,958829
Pure Error	8	940,000	940,000	117,500		
Total	11	975,000				

Se interpreta que el factor de material influye directamente en el resultado de la resistencia a la torsión pura del ensamble, concordante con las propiedades físico-químicas superficiales del material, que indican que la naturaleza de los sustratos en términos de su energía libre de superficie podría tener una mayor afinidad físico-química con el adhesivo anaeróbico utilizado en los ensambles y por lo tanto podría influir en su resistencia mecánica. Para esta investigación, el material Acero presentó los mayores valores de resistencia a la torsión en comparación con el material Dura-Aluminio, que indica también que hay una mayor afinidad físico-química del adhesivo anaeróbico con el acero y menor con el duraluminio, incluso la influencia del adhesivo al 75% aunque se encuentra por encima del 7% (en el valor p) está indicando que también

mantiene una mayor influencia en la resistencia mecánica a la torsión y justamente con las uniones ensambladas con el material de acero.

En la Tabla 4-2, el valor estadístico para el coeficiente (R^2) o ($R - Sq$) y su valor ajustado (R^2 ajustado) o ($R - Sq\ adj$) para el diseño de experimentos 2^k utilizado, corresponden a valores relativamente bajos en comparación con otros análisis, en este caso con un 65.2% de confiabilidad de los resultados. Con fines de mejorar este porcentaje de confiabilidad se recomendó realizar un análisis ANOVA sin considerar la interacción simultánea (material y volumen del adhesivo), dado que el valor de p ($p\text{-value} = 0.170$ o 17%) considerando ambos factores es mayor al 0.05 (5%) y no presenta significancia estadística.

El segundo análisis ANOVA, sin considerar el efecto simultáneo del factor material y volumen del adhesivo, según la Tabla 4.3, con la finalidad de enviar la interacción entre estos dos factores al error residual por no ser significativa dicha interacción, mejoró los resultados del estadístico de prueba ($p\text{-value}$) para los factores, pero no de manera notoria.

Tabla 4-3: Segundo análisis ANOVA, coeficientes R^2 y R^2_{aj} estimados e influencia en la resistencia por torsión según el “valor p”, para el factor significativo de material

Two-way ANOVA: Resistencia Nm versus Material. Vol. Adhesive						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Material	1	363,000	363,000	8,56	0,018	
Vol. Adhesivo	1	176,333	176,333	4,18	0,067	
Error	8	339,333	42,417			
Total	11	878,666				

S = 6,27	R-Sq = 67, 20%	R-Sq (adj) = 59, 15%
----------	----------------	----------------------

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	2	34,667	34,667	17,333	0,165899	0,849664
Vol. Adhesivo	1	1,000	1,000	1,000	0,012761	0,912537
Material	1	33,333	33,333	33,333	0,319036	0,585989
Error	9	940,333	940,333	104,481		
Lack-of-Fit	1	0,333	0,333	0,333	0,002837	0,958829
Pure Error	8	940,000	940,000	117,500		
Total	11	878,666				

De esta manera, los coeficientes R^2 y R^2_{aj} presentaron un leve incremento, explicando en un 67.20% la variabilidad de los datos, el cual se considera un porcentaje aceptable para este tipo

de experimentos de diseño de junta adhesiva con pocos precedentes, que aún no está estandarizado y que sigue en proceso de exploración y de optimización de parámetros, dada la variabilidad y la falta de control experimental que pueden presentarse en algunas variables, las cuales continúan en procesos de discusión.

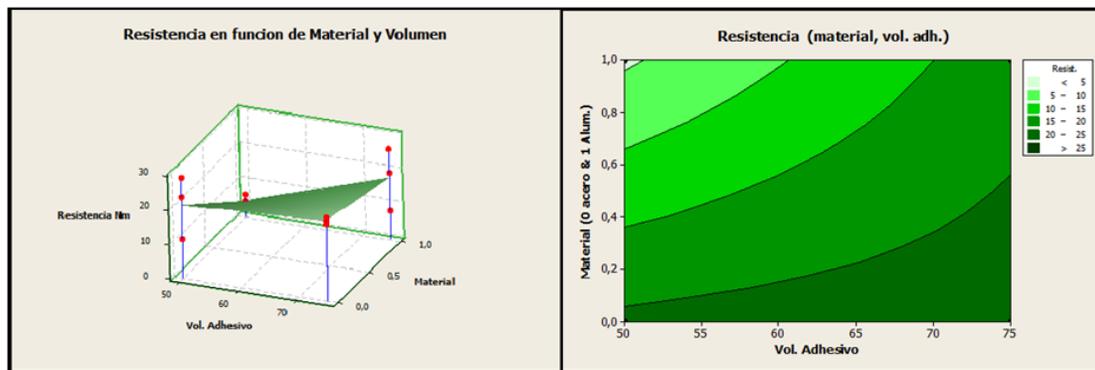
Este segundo análisis ANOVA, similar al caso anterior que consideraba la interacción “NO” significativa de los factores material y volumen del adhesivo, nuevamente ilustra que el factor material y el factor volumen del adhesivo, de manera independiente tienen significancia estadística en los resultados del comportamiento de resistencia mecánica en las pruebas de torsión.

4.3.2 Modelo de regresión del diseño factorial

La Figura 4 - 6, que representa la superficie de respuesta (izquierda), ilustra la región óptima del proceso y permite optimizar los valores de la variable de respuesta (resistencia a la torsión). Por otro lado, la Figura 4 - 6 (derecha) ilustra las curvas de contorno que dividen la superficie de respuesta en curvas de nivel, representando con un valor constante la respuesta del diseño. Para las divisiones establecidas por las curvas de nivel, las áreas representan las zonas donde existe interacción entre los factores. Por ejemplo, se observa que para las combinaciones de factores (acero - volumen de adhesivo 75%) y (acero - volumen de adhesivo 50%) se presentan los mayores valores para la resistencia a la torsión de la unión adhesiva, con un vértice superior que representa la combinación de factores (acero - volumen de adhesivo 75%) que, para este caso de la investigación, *se considera el mejor diseño de junta adhesiva*.

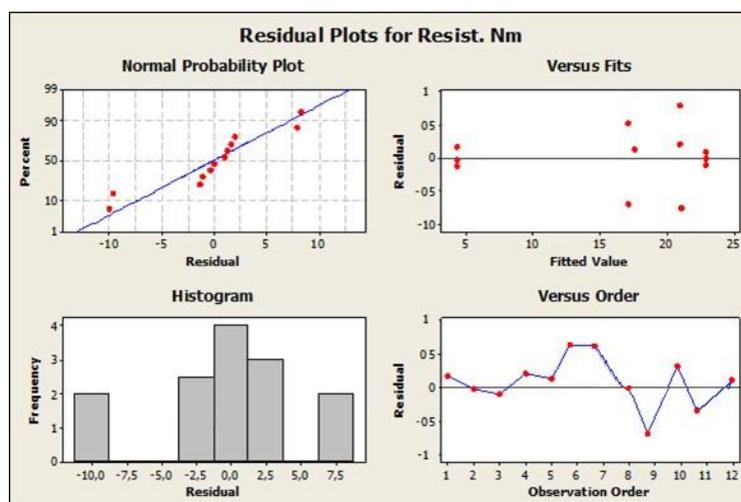
Para la curva de contorno considerando la interacción del factor (acero - volumen de adhesivo 75%) se presentan la mayor extensión y los valores más altos de resistencia a la torsión, con un valor máximo de 29 ($N m$). Sin embargo, la zona también aplica para la combinación del factor (acero – volumen de adhesivo 50%) pero para una menor área, lo que significa que el *factor material acero es más significativo en la resistencia a la torsión de la junta adhesiva*, independiente de la cantidad de volumen de adhesivo. En este sentido, las curvas de superficie de respuesta ratifican la mayor influencia de los factores material y volumen del adhesivo de manera independiente como los de mayor influencia en el comportamiento mecánico, medido en las pruebas de torsión pura.

Figura 4-6: Superficies de respuesta y de contorno para las interacciones significativas (material sustrato-volumen adhesivo) y su influencia en la resistencia mecánica.



Con el fin de validar los resultados estadísticos sobre el comportamiento de la resistencia mecánica por torsión se requiere revisar la Figura 4-7, que de manera visual proporciona información útil sobre la efectividad del modelo. En este caso, la prueba de residuos normalizados oscilan cerca al eje cero y un rango entre $(-0.5$ y $0.5)$, rango cercano al ideal y por lo tanto se considera que no es necesario recurrir a un método analítico.

Figura 4-7: Gráfica de probabilidad normal, histograma, valores predecibles y orden de observación de los residuos para validar los resultados del diseño factorial 2^k .



Comparando el comportamiento de resistencia mecánica a la torsión considerando los factores de interacción del tipo de material Acero y Dura-Aluminio en la gráfica de superficie, se puede

interpretar que a pesar de que los parámetros geométricos son los mismos, la naturaleza del material del sustrato macho (Acero) influye significativamente más en la resistencia mecánica, comparado con el sustrato de material Dura-Aluminio. Dada esta pregunta de investigación que surge, es necesario determinar la razón del porque se presenta esta diferencia. Un análisis del mecanismo de falla en las superficies una vez realizada la prueba de torsión, es una buena técnica para buscar causas posibles.

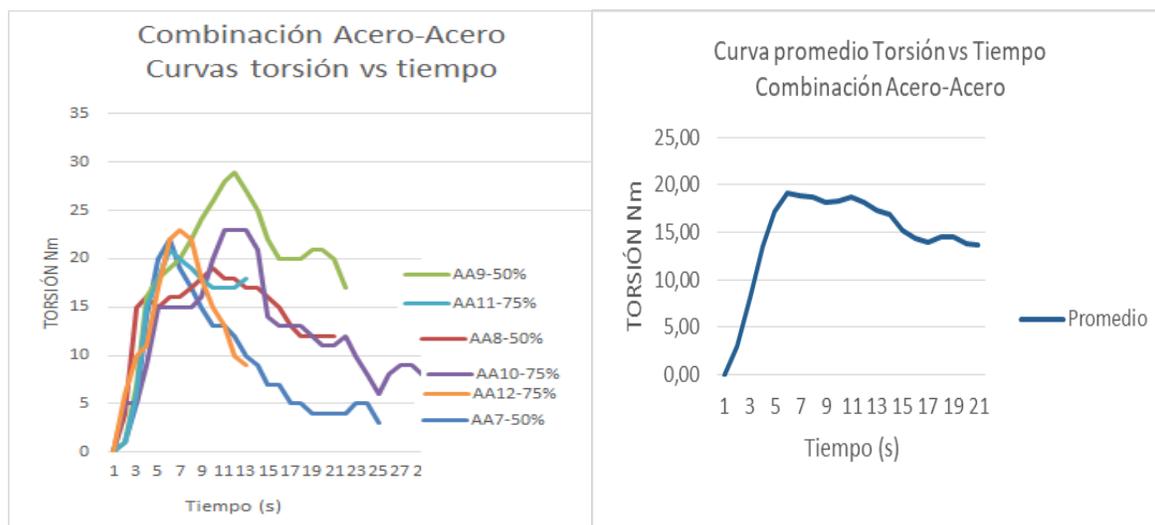
Es importante considerar, que a partir de los resultados encontrados en las superficies de respuesta y de contorno presentadas en la Figura 4-6, sumados a los resultados de confiabilidad que se han reportado mediante los análisis ANOVA de la Tabla 4-2 y 4-3, es necesario encontrar una región óptima que ofrezca las mejores garantías de diseño de la unión adhesiva. Sumado a una alta dispersión de los valores de las pruebas de torsión y los valores bajos que se presentan es importante seguir en la búsqueda y combinación de factores que mejoren la resistencia mecánica que exige la aplicación en el sistema estructural go kart. En lo relacionado con el material de duraluminio, tratándose de una primera investigación exploratoria, sin mayores antecedentes queda la inquietud del porqué la resistencia mecánica no superó la del sustrato de acero, siendo parte de la respuesta la *no compatibilidad* del material duraluminio con el adhesivo, sin embargo, se tienen otras preguntas por resolver como cuál debe ser la preparación ideal del material duraluminio para mejorar dicha compatibilidad?, acaso, es necesario cambiar el adhesivo para una mejor compatibilidad?, y justamente, en este sentido, es que nuevas investigaciones que surjan con la combinación de estos materiales requieren de una detallada caracterización físico-química de los sustratos y de posibles modificaciones a la integridad superficial, dado que no todas las combinaciones geométricas presentan resultados favorables con los mismos sustratos y similares adhesivos.

4.3.3 Resultados de las pruebas de torsión

Se presentan las gráficas para los resultados de las pruebas de torsión consideradas en el diseño de experimentos 2^k , con el fin de caracterizar un posible comportamiento elástico o zona elástica durante los primeros segundos de la prueba, antes de que la junta adhesiva se fracture y rompa las cadenas poliméricas que mantienen la cohesión-adhesión del adhesivo y en consecuencia se produzca la falla por torsión.

Los resultados para la combinación de sustratos en los dos elementos de la unión adhesiva (sustrato macho y sustrato hembra) considerando ambos materiales del tipo Acero-Acero, según el diseño de experimentos 2^k se ilustran en la Figura 4-8, incluyendo seis probetas variando el volumen de adhesivo (entre el 50% y el 75%). En este caso, se intuye un comportamiento elástico, lineal y similar para todos los ensambles, durante los primeros segundos a los que son sometidos los ensambles en las pruebas de torsión, independiente del volumen de adhesivo. Este comportamiento mecánico evidencia la significancia estadística que representa el tipo de material de los sustratos (Acero-Acero) y la compatibilidad físico-química del adhesivo con los mismos sustratos. De nuevo, es evidente la mayor confiabilidad que presenta el diseño de la unión adhesiva con elementos de acero, los cuales son más compatibles con el adhesivo anaeróbico utilizado y a la vez con el sustrato de acero estructural del chasis go kart.

Figura 4-8: Resistencia a la falla por torsión para ensambles con sustratos Acero-Acero y representación de su curva promedio.

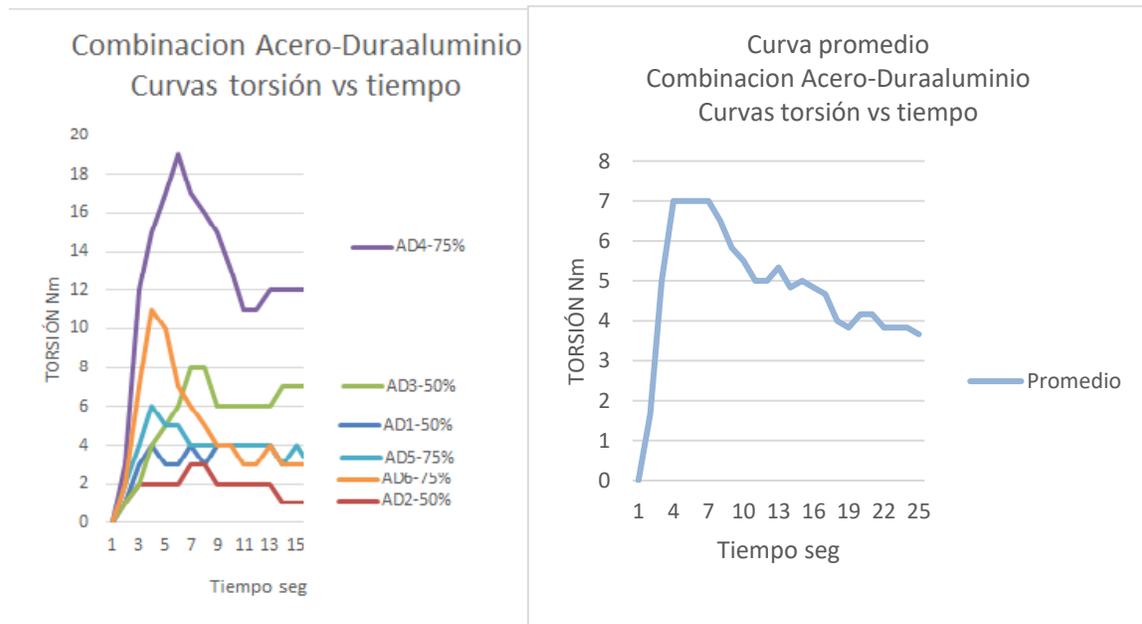


En este grupo de probetas se presentaron los mayores valores de resistencia a la falla por torsión en todo el experimento. También, se percibe en la Figura 4-8 que en el comportamiento plástico una vez, la unión alcanza un esfuerzo máximo por torsión, se presenta una caída brusca dado que la unión falla y el adhesivo como medio de fijación de los sustratos se fractura y no alcanza a reacomodar sus cadenas poliméricas, presentando limitaciones para absorber la energía plástica. La experiencia práctica mostró que una vez la unión se rompe, durante la prueba de

torsión, los sustratos comienzan a rotar relativamente uno con relación al otro y el adhesivo falla presentando diferentes mecanismos de falla según se analizará más adelante. Incluso, desde el diseño mismo de la unión adhesiva, es posible que sea necesario la utilización de un adhesivo con mayor capacidad de adsorber las cargas plásticas, en este caso un adhesivo, menos rígido y probablemente en vez de utilizar un adhesivo anaeróbico y/o epóxico, es posible la utilización de un adhesivo estructural de naturaleza acrílica, por ejemplo.

En la Figura 4-9 se presenta el comportamiento de la resistencia a torsión para la combinación sustratos Acero-Dura Aluminio (hembra y macho respectivamente) en la unión adhesiva, con notable interés en caracterizar el comportamiento a torsión de la unión adhesiva y en particular de establecer la influencia del factor experimental tipo de material Dura Aluminio en dicho comportamiento. Los valores obtenidos para el diseño experimental 2^k fueron inferiores a los de la combinación Acero-Acero, con un 35% menor al valor límite de resistencia a la torsión obtenida para la combinación Acero-Acero, ratificando nuevamente, la poca efectividad que presenta la combinación Acero-Duraluminio con el adhesivo anaeróbico referencia 648 utilizado.

Figura 4-9: Comportamiento resistencia falla para combinación de Acero-Dura Aluminio.



Adicionalmente, los resultados ilustrados en la Figura 4-9, presentan gran dispersión comparativamente con los obtenidos para la combinación Acero-Acero. Sin embargo, para este experimento el otro factor experimental relacionado con el volumen del adhesivo, ha mostrado influencia significativa sobre la resistencia a la falla por torsión y el valor máximo encontrado correspondió a 18 ($N m$) para la combinación del volumen de adhesivo al 75%. Nuevamente, se mantiene abierta la posibilidad de optimizar el proceso experimental para el diseño de la unión adhesiva, tratándose de un estudio que arrojó unos primeros resultados, tanto para un diseño de junta complejo, según los diseños planteados en los planos de la Figura 3-5, y para la aplicación particular de ensambles estructurales en el vehículo go kart, por un lado. Por otro lado, como se mencionó anteriormente, es importante optimizar los factores de diseño de la junta adhesiva para soportar las exigencias mecánicas que requieren las uniones adhesivas en el go kart, motivo por el cual, es probable que se requieran nuevos diseños geométricos de juntas adhesivas y/o combinación de otros factores de manera simultánea que puedan afectar su comportamiento mecánico y/o como se discutió previamente el cambio de adhesivo por uno de la familia estructural de naturaleza acrílico y/o de procesos de preparación superficial de sustratos que requieren previamente de otros procesos de caracterización y/o de modificación de la integridad superficial, entre otras posibilidades de mejoramiento de la energía superficial de los sustratos y de mejora de la compatibilidad físico-química de los sustratos con los adhesivos.

4.3.4 Evaluación de las probetas falladas en la prueba a torsión

Con el fin de explicar y validar los resultados obtenidos sobre el comportamiento de resistencia mecánica a torsión, se realizó un análisis superficial de las probetas falladas para identificar el mecanismo de falla adhesiva-cohesiva y correlacionar con los parámetros de diseño empleados para la junta adhesiva utilizada en esta investigación.

En las Figuras 4-10 a 4-13, se presentan evidencia de fallas superficiales en los sustratos una vez realizadas las pruebas de torsión, para el ensamble “tubería de acero-adhesivo-macho de acero” considerando los resultados del ensayo a torsión.

En la Figura 4-10, se presenta evidencia de probetas que fueron sometidas a cargas de torsión de 40 ($N m$), llevando a la falla el ensamble en el cual se observa la pulverización del adhesivo

debido al rompimiento de las cadenas poliméricas durante el ensayo, que se manifiesta en forma de polvillo blanco, incluso puede evidenciarse la fragilidad del adhesivo anaeróbico para soportar este tipo de esfuerzos por torsión. Adicionalmente, sobre la superficie del cilindro se observa la falta de adherencia que conlleva al tipo de falla adhesiva y se pone de manifiesto la falta de preparación en la superficie del duraluminio y/o la poca compatibilidad físico-química que se presenta con el adhesivo anaeróbico utilizado.

Figura 4-10: Ensayos de torsión en probetas acero-adhesivo-acero con torque 40 ($N \cdot m$).



En la Figura 4-11, se presenta de manera comparativa la apariencia superficial entre dos sustratos machos de diferente material. El sustrato de la izquierda corresponde al material Dura Aluminio, mientras que el de la derecha corresponde al material Acero. Comparativamente, se observa que el sustrato de Acero presenta mayores zonas de adherencia que el material de Dura Aluminio que evidencia fallas adhesivas y falta de adhesivo. Esta situación es coherente con los menores valores de torsión encontrados durante las pruebas de torsión para ambos materiales y donde el mejor desempeño y significancia estadística a la torsión la evidenció el material de Acero.

Figura 4-11: Fallas adhesivas sobre sustrato de Dura Aluminio en comparación con Acero durante pruebas de torsión.



En la Figura 4-12 se presentan sustratos hembra de material tubería estructural (ASTM A-36), con evidencia que el adhesivo al fracturarse durante el ensayo de torsión queda adherido en diferentes zonas sobre la superficie del sustrato, presentando mecanismos combinados de fallas adhesivos y cohesivos a diferencia de los sustratos de Dura Aluminio donde las fallas presentadas fueron completamente de tipo adhesivo y con evidencia de que al adhesivo poco se adhirió al sustrato.

Figura 4-12: Fallas mixtas sobre sustratos de tubería estructural acero ASTM A-36.



De manera general, se encontró para los diferentes materiales de Acero, Acero estructural y Dura Aluminio que la mayor parte de las fallas son de naturaleza adhesiva y solo para la tubería estructural se presentan un área con fallas cohesivas. Estos mecanismos, en particular de fallas adhesivas afectan de manera directa los resultados de los ensayos de torsión, debido a que las

cargas de torsión no tienen una distribución homogénea sobre el volumen del adhesivo en el ensamble.

Dada la necesidad de optimización de los parámetros de diseño de la junta adhesiva para alcanzar valores más altos de desempeño en las pruebas de torsión, también es necesario evaluar posibles mecanismos físico-químicos que están afectando el proceso de formación de la unión adhesiva, dado la adherencia del adhesivo al sustrato, evidenciado en los mecanismos de falla presentes.

En la Figura 4-13, se ilustra la falla adhesiva que se presentó sobre un sustrato de material Dura Aluminio con un parámetro de rugosidad superficial $R_a = 1.5 \mu m$. Nuevamente, se resalta la aparición frecuente de las fallas adhesivas para esta combinación de sustratos Acero-Dura Aluminio, que posiblemente podrían tener alguna combinación de las siguientes causas:

- Una baja rugosidad asociada con el factor R_a , que podría afectar la humectabilidad de los sustratos.
- Un área superficial no óptima asociada con una insuficiente longitud de traslape capaz de soportar las fuerzas de corte durante el ensayo de torsión.
- Una deficiente compatibilidad físico-química del adhesivo con las superficies de los sustratos (Acero y Aluminio), asociada con una deficiente energía libre de superficie y/o tensión interfacial y/o deficiencias en la preparación superficial [22, 24, 26].
- A factores relacionados con el proceso de mecanizado, la preparación adecuada de las superficies de unión, dificultades durante el proceso de ensamble y/o en el proceso de curado de la unión adhesiva, falta de control en las condiciones del ensayo de torsión y/o fallas en el montaje de las probetas durante el ensayo de torsión. En general, múltiples factores que podrían atribuirse a un error humano.
- La baja resistencia mecánica a las pruebas de torsión pura y la naturaleza rígida del adhesivo anaeróbico, posiblemente requieren de un cambio de adhesivo por otro de naturaleza acrílica de aplicación estructural que permita una mayor absorción de energía plástica de deformación, durante las pruebas destructivas y en servicio de la junta adhesiva.

Figura 4-13: Falla adhesiva en la superficie del sustrato Dura Aluminio con parámetro de rugosidad superficial $R_a = 1.5 \mu m.$, aumento 60X.



4.4 Segunda parte de ensayos a torsión pura

Se realizó un segundo experimento, donde se fabricaron nuevas probetas para la unión adhesiva, considerando el mismo procedimiento de fabricación, ensamble y prueba de torsión para el diseño de experimentos 2^k implementado para el desarrollo de esta investigación.

La combinación de factores influyentes que se estableció para este segundo experimento que utilizó sustrato de Acero-Dura Aluminio, con sustrato macho fabricado en material Dura Aluminio. Se realiza la elección del nuevo material Dura Aluminio porque hay interés investigativo en caracterizar el comportamiento mecánico de la junta adhesiva, dadas las características apropiadas de dicho material para soportar los esfuerzos sobre la estructura del chasis. Para el nuevo diseño experimental que se propone, se mantienen los parámetros geométricos de los sustratos de la unión, sin embargo, se incrementa el parámetro de rugosidad superficial del sustrato R_a , con el fin de mejorar la falta de adhesión reportadas anteriormente.

En la Figura 4-14, se ilustran los sustratos (sustrato hembra de material Acero) y (sustrato macho cilíndrico de material Dura Aluminio) fabricados para el ensamble de las seis probetas, con parámetros de rugosidad superficial $R_a = 3 \mu m$ para tres probetas y de $R_a = 6 \mu m$ para las

restantes tres probetas. Los seis ensambles realizados fueron sometidos a las pruebas de torsión pura, siguiendo el mismo procedimiento llevado a cabo para los anteriores ensayos.

Figura 4-14: Sustratos de acero (hembra) y de Dura Aluminio (macho) para el ensamble de probetas de torsión con parámetro $R_a = 3 \mu m$ y $R_a = 6 \mu m$.



Los resultados para el comportamiento a la torsión de los nuevos ensambles se presentan en la Tabla 4-4, resaltando el valor promedio de resistencia a la falla (torque de falla) y del desplazamiento angular máximo ($^\circ$) que sufre la unión una vez se ha deformado plásticamente. Evidentemente el valor de la resistencia a la falla por torsión (torque de falla) mejora incrementando la rugosidad del sustrato Dura Aluminio del valor $R_a = 3 \mu m$ al valor $R_a = 6 \mu m$, incluso superando el valor promedio del primer diseño de experimentos 2^k para valores de rugosidad $R_a = 1.5 \mu m$, cuyo valor promedio de resistencia a la falla por torsión (torque de falla) fue de $7 N m$, (ver Figura 4.9) para el mismo grupo de materiales. En este sentido, se valida que, aun manteniendo los mismos materiales, pero variando algunos parámetros de superficie, en este caso de rugosidad superficial, mejora la resistencia mecánica de la unión adhesiva en los ensayos de torsión pura.

Tabla 4-4: Torque de falla, desplazamiento angular y tiempo de prueba para un segundo diseño de experimentos con sustratos (Acero-Dura Aluminio) variando el parámetro de rugosidad $R_a = 3 \mu m$ y $R_a = 6 \mu m$.

Réplica No Probetas	1	2	3	Valor Promedio	4	5	6	Valor Promedio
Parámetros de diseño	Rugosidad superficial: $3 \mu m$ Longitud de traslape: $16 mm$ Espesor de adhesivo: $0.3 mm$					Rugosidad superficial: $6 \mu m$ Longitud de traslape: $16 mm$ Espesor de adhesivo: $0.3 mm$		
Torque de falla ($N m$)	10	11	14	11	15	18	14	15.6
Desplazamiento angular ($^{\circ}$)	191	210	65	188	165	150	180	165
Tiempo prueba (s)	60	60	24	--	60	60	60	--

En la Tabla 4-5, se reporta la variación del torque de falla promedio al variar el parámetro de rugosidad superficial $R_a = 3 \mu m$ de $R_a = 6 \mu m$ y su correspondiente valor promedio del torque de falla sobre la nueva región experimental para los sustratos de Acero (hembra) y Dura Aluminio (macho).

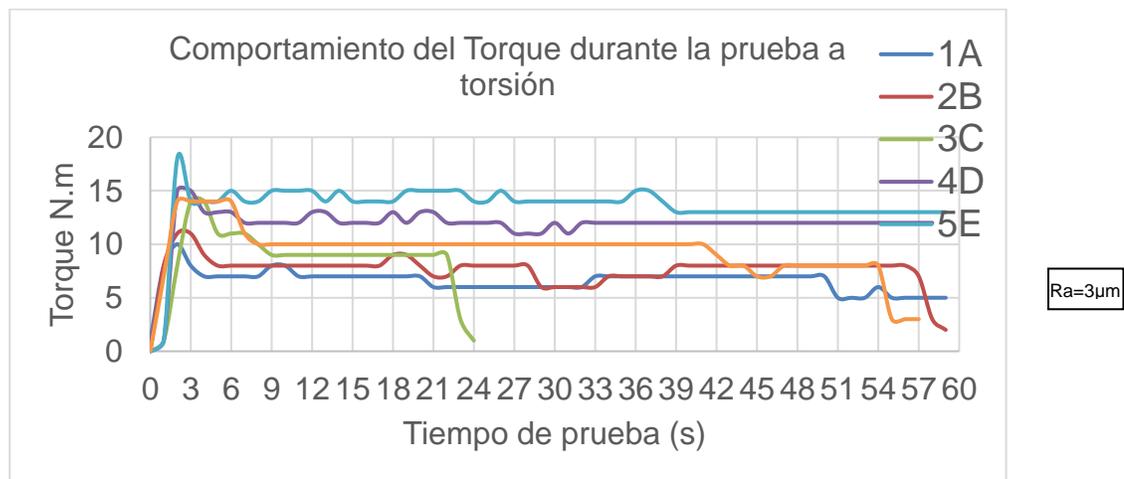
Tabla 4-5: Torque de falla en la región experimental al variar el parámetro de rugosidad R_a de la unión adhesiva en sustratos Acero (hembra) y Dura Aluminio (macho).

Ensayos	$R_a = 3 \mu m$	$R_a = 5 \mu m$	Región experimental
Torque de falla promedio ($N m$)	11	15.6	7.6

Nuevamente, se encontró que este comportamiento a la falla es consistente con la baja adherencia observada en los ensambles sometidos a las pruebas de torsión y en particular en la intercara Dura Aluminio-adhesivo, dada las múltiples causas posibles que han afectado la adherencia del adhesivo al sustrato, sin embargo, la variación del parámetro R_a mejoró la adherencia.

La Figura 4-15 presenta los resultados de las pruebas de torsión de las seis probetas, del nuevo diseño experimental variando el parámetro de rugosidad R_a . Los valores máximos del torque de falla obtenidos para los ensambles adhesivos fueron de 18 N m para los ensambles con $R_a = 6 \mu\text{m}$. Por otro lado, también se observó un comportamiento lineal elástico en los primeros 3 segundos de ensayo, seguido de una caída brusca del valor de resistencia mecánica a torsión, una vez se inicia el proceso de rotura de la unión adhesiva.

Figura 4-15: Torque de falla para uniones Acero-Dura Aluminio con valores del parámetro de rugosidad $R_a = 3 \mu\text{m}$ y $R_a = 6 \mu\text{m}$.



Es importante resaltar que, aunque la resistencia a la torsión ha mejorado con relación a los ensambles de menor parámetro $R_a = 1.5 \mu\text{m}$, existe una gran influencia del parámetro de rugosidad en el incremento de la resistencia mecánica, sin embargo, no es posible garantizar la confiabilidad de los resultados con un número reducido de ensayos. Por lo tanto, para establecer una relación de influencia significativa con el incremento en el parámetro R_a , se requiere de un mayor número de ensayos. Finalmente, se considera que los resultados siguen siendo teniendo alta variabilidad y el valor de resistencia mecánica es baja para el tipo de aplicación que se pretende realizar.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Mediante el análisis de elementos finitos, se estableció que los esfuerzos críticos que soporta la estructura del chasis del vehículo monoplace go kart son una combinación de torsión y flexión, y las regiones críticas, de mayor concentración de esfuerzos, se presentan sobre los ejes delanteros y traseros en puntos de apoyo cercanos con el suelo.

También, se estableció con el análisis de elementos finitos que los esfuerzos máximos que soportan los elementos estructurales de la estructura del go kart se incrementan con las condiciones dinámicas de operación del vehículo, en particular con los incrementos en la aceleración y/o desaceleración, en particular sobre las curvas de la trayectoria, características que han sido validadas en la literatura consultada.

Del diseño de experimentos factorial 2^k , con $k = 2$ empleado para esta investigación, el análisis de la ANOVA estableció que el factor experimental material del sustrato, tuvo la mayor significancia estadística medida en términos del valor de probabilidad "p" ($p - value = 0.05$ o 5%), siendo este factor el que afecta significativamente la resistencia a torsión de la unión adhesiva, para este tipo específico de diseño geométrico.

Mediante las curvas de superficie de respuesta y de contorno experimental para los factores explorados (material del sustrato y volumen del adhesivo), así como los intervalos para los niveles del factor, y sus interacciones, se resalta que es necesario la búsqueda de una región óptima para las condiciones de diseño de la unión adhesiva, que ofrezca un comportamiento mecánico a la torsión más óptimo, que seguramente redundará en variaciones en el diseño geométrico de la unión adhesiva (longitud/área de traslape, sustratos más compatibles), entre otros factores.

El diseño, construcción e implementación de la matriz de soldadura utilizada para el ensamble de los componentes estructurales de la unión adhesiva y para llevar a cabo el

proceso de soldadura de las demás uniones rígidas estructurales del chasis go kart facilitó la ubicación correcta de los elementos estructurales y la realización del proceso de ensamble con uniones adhesivas, según los planos de diseño. Además, evitó posibles distorsiones de las uniones adhesivas durante el proceso inicial de curado a las condiciones ambientales, dado que no permitió movimientos relativos de rotación de los elementos ensamblados.

El reto propuesto en esta investigación, a pesar de la falta de antecedentes en diseño específico de este tipo de uniones adhesivas complejas en sistemas de transporte go kart con altas solicitaciones de esfuerzos, evidenció la potencial aplicación de procedimientos alternativos de unión híbridas (uniones soldadas + uniones adhesivas) en componentes estructurales de un chasis go kart. Sin embargo, los resultados aún son incipientes para garantizar la confiabilidad de las uniones dadas las variaciones encontradas y la dispersión de los datos por múltiples factores que afectaron el diseño particular de la unión adhesiva propuesta.

Sumado a los factores experimentales estudiados, los sustratos de la unión como el volumen del adhesivo, se evidenciaron algunos procesos críticos durante el proceso de obtención de una unión adhesiva óptima, relacionados con el proceso de curado en el horno dado el tamaño del chasis ensamblado, el control del adhesivo en el ensamble, la concentricidad de los sustratos ensamblados, la preparación de las superficies, la compatibilidad de los sustratos que influyeron en el desempeño de las uniones adhesivas que fueron sometidas a torsión.

Las observaciones realizadas a las superficies de falla de los ensambles sometidos a las pruebas de torsión, indicaron una tendencia a las fallas adhesivas que incidieron directamente en los valores del torque de falla en las pruebas de torsión. En particular para los ensambles que utilizaron sustratos de Dura Aluminio, seleccionado por sus excelentes características mecánicas para esta investigación, sin embargo, desde el punto de vista de la unión adhesiva mostró dificultades de compatibilidad con el adhesivo utilizado que aún siguen siendo motivo de investigación.

5.2 Recomendaciones

Dados los resultados de la investigación planteada, es evidente el impulso de las técnicas alternativas de unión, en particular con adhesivos, sin embargo se ha encontrado que el sustrato de Dura Aluminio, aún requiere de mayor investigación en pruebas de laboratorio, de caracterización superficial del material, de compatibilidad físico-química con adhesivos, de evaluación de procesos de curado, entre otros, para garantizar algunas aplicaciones y la búsqueda de diseños óptimos de uniones adhesivas, máxime que en este proyecto, las uniones son de alta complejidad tanto en su ensamble como en su proceso de curado, una vez ensamblado los elementos de la unión.

La investigación destaca algunos cuidados a considerar en los procesos de unión adhesiva cuando estos se combinan con procesos de soldadura, debido al proceso de calentamiento que puede sufrir la unión adhesiva por la soldadura sobre los elementos estructurales. En particular, en el ensamble del chasis se recomienda utilizar una protección especial para las uniones adhesivas al momento de aplicar la soldadura, para evitar calentamientos excesivos en la junta adhesiva.

Se evidenció que el proceso de curado del ensamble del chasis con las uniones adhesivas es crítico en lo relacionado con la utilización de un horno de curado que pueda abordar la estructura completa del chasis. Se recomienda que para procesos futuros de curado de las uniones ensambladas pueda utilizarse un horno de una mayor capacidad volumétrica o disponer de un sistema localizado de calentamiento de las uniones con fines de controlar la temperatura de curado sobre la estructura del chasis, sin necesidad de desplazarlo a un horno de curado.

Garantizar el volumen de adhesivo en una unión cilíndrica cuando se proyectan ensambles con ajuste deslizante, la concentricidad de los elementos de la unión, la distribución homogénea del adhesivo y un espesor constante, en ocasiones es complejo. En el caso de la unión propuesta que cumple con estas características, a pesar de que se implementaron diferentes plantillas, se utilizaron técnicas de distribución óptima del adhesivo sobre la superficie, la posición en la que se realizan las uniones sobre las estructuras del chasis dificultan una unión ideal y probablemente inducen a errores humanos durante el proceso de formación de la unión adhesiva que requieren de un mejor control y de un desarrollo de dispositivos para tal fin. En este proyecto experimental, se desarrollaron una serie de dispositivos, plantillas, sistema de concentricidad que deben optimizarse para futuras uniones adhesivas.

Finalmente, se resalta la importancia de emprender retos para la búsqueda de opciones alternativas de aplicación de uniones adhesivas en áreas críticas y complejas como la enfrentada, que sin duda exigen ajustes para mejorar la planeación en las múltiples actividades que se llevan a cabo durante la preparación de superficies, ensamble, curado y ensayos de uniones complejas; a veces con costos elevados que es necesario prever y el no considerarlos como parte del diseño experimental, puede inducir a errores que afectan la confiabilidad y el desempeño de una unión adhesiva.

Bibliografía

- [1] Budynas R, Keith J. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A; 2008.
- [2] Suarez J, López F. In: Uniones adhesivas estructurales, Alicante; 2000.
- [3] Ledesma R. Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales. Madrid. 2013.
- [4] Arroyave D. Diseño de chasis para sistema de transporte terrestre monoplaça útil en entornos urbanos planos y pavimentos. Trabajo de grado. Escuela de ingeniería de Antioquia. Envigado. Colombia; 2013.
- [5] Tielas A. Posibilidades de nuevos materiales para la industria de automoción, la unión un reto. Centro Tecnológico de automoción de Galicia.
- [6] Bin-Kamarudin M. Design and fabrication of go-kart chassis. Trabajo de grado. University Malaysia Pahang; 2012.
- [7] Budynas R, Keith J. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A; 2008.
- [8] Ramírez S, Zaruma G. Diseño y construcción de un prototipo KART. Trabajo de grado. Universidad Internacional del Ecuador. Quito. Ecuador; 2010.
- [9] Parra J, Ríos R. Estudio del comportamiento bajo carga de un chasis para transporte de pasajeros por medio de la tecnología de elementos finitos en la empresa Equitel Cumandes S.A. Avances Investigación En Ingeniería. 2006; (6): p. 103-109.
- [10] Méndez CA, Alvares C, Fernández YB, Moya JL, Chagoyén E. Comportamiento estático y modal del chasis de un ómnibus modernizado. Ingeniería Mecánica. 2013; 16 (2): p. 161-170.
- [11] Akash R, Tushar S, Raghvendra M. Desing and development of foldable kart chassis. Gautam Buddha University; 2015.
- [12] Conesa J. Evaluación mecánica de uniones adhesivas de materiales compuestos en la construcción naval. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia; 2003.
- [13] Anadón R, Pabón D. Diseño de un kart de pista. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España; 2012.

- [14] Narváez L. Diseño y construcción de un vehículo go-kart de estructura tubular mediante el empleo de un programa de análisis por elementos finitos. Tesis de grado. Escuela politécnica del ejército carrera de ingeniería automotriz. Latacunga; 2012.
- [15] Quezada P. Diseño y fabricación del chasis para un kart KF según la norma CIK/FIA. Tesis de pregrado. Universidad Politécnica Salesiana; 2018.
- [16] Becerra C, Figueroa L. Evaluación de la zona térmicamente afectada (ZAT) de un acero 2-1/4 CR-1 Mo en estado normalizado - revenido y envejecido artificialmente. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia; 2012.
- [17] Hoyos E. Efecto de la técnica de pases de revenido en las propiedades mecánicas del acero ASTM A743: Grado CA6 NM. M.S. tesis. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Colombia; 2009.
- [18] Carrocería y pintura. Ensamblaje de carrocerías: la soldadura sigue siendo el tipo de unión más utilizado. [Internet]; 2015. Disponible en: http://www.centrozaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R66_A2.pdf
- [19] García R. Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales. Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. Madrid. España; 2013.
- [20] Manual Mecánica Automotriz. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Chasis Bastidor Carrocería. [Internet]. [Consulta do 2021 mayo]. Disponible en: <https://dl-manual.com/doc/manual-mecanica-automotriz-chasis-bastidor-carroceria-nv5rgkd6xyz1>
- [21] Madrid M. Introducción Tecnología de la Adhesión. Loctite España. Madrid. 2000.
- [22] García G. Influencia del acabado superficial sobre la resistencia de juntas adhesivas para fijación de elementos cilíndricos. 2006.
- [23] Gil L. Influencia de parámetros geométricos sobre el comportamiento mecánico de juntas adhesivas anaeróbicas sometidas a ensayos destructivos de torsión pura. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia; 2013.
- [24] Kinloch AJ. Adhesion and Adhesives: Science and Technology. Chapman and Hall. 1987: p. 56-100.
- [25] Arenas J, Narbon J, Alia C. Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution. International journal of adhesion. 2010; 30 (3): p.160 – 165.

-
- [26] Durán J, Amo JM, Durán C, Oñoro J, García-Ledesma R. Comportamiento mecánico de uniones estructurales con adhesivo. Influencia de los parámetros operacionales. *Revista de metalurgia*. 2005; p. 41.
- [27] Norma española UNE-EN 923:2016. Adhesivos. Términos y definiciones.
- [28] Sánchez F. Uniones adhesivas y sus aplicaciones navales. Tesis pregrado. Universidad Politécnica de Cartagena; 2010.
- [29] Reglamento deportivo CIK-FIA; 2022. [Citado el 13 nov del 2020]. Recuperado a partir de: <https://www.fiakarting.com/page/sportingregulations>
- [30] Ramini S, Rentala M, Gulab S. Desing and structural analysis of a Go-kart vehicle Chassis. *International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*. 2015; (2).
- [31] Tromp, E. Brouwer, W. Composites in primary structures: Endurable and crash resistant bottom platform for a go-kart. Delft University of Technology.
- [32] Castañeda J. Diseño de un chasis para un Word Formula Kart. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Catalunya; 2012.
- [33] Patil N, Ravichandra R, Bhushan R, Suhil H. Static analysis of Go-Kart Chassis frame by Analytical and SolidWorks Simulation. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. 2014; 3 (5): p. 661-663.
- [34] Perez D, Sanchis P. Analysis of efforts on a tubular chassis. Trabajo de grado. Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación. Pamplona; 2011.
- [35] Bermejo, R. Oñoro, J. García R. Comportamiento a fatiga de uniones a solape simple con adhesivo epoxi de acero pre pintado. *Revista de Metalurgia*. 44. 2008.
- [36] Goland M, Reissner E. The stresses in cemented joints. *J Appl Mech* 1944; 11: p.17–27.
- [37] Lubkin J, Reissner E. Stress distribution and design data for adhesive lap joints between circular tubes. *ASME Trans* 1956; 78: p. 1213–21.
- [38] Hart-Smith L. Adhesive-bonded double-lap joints. Technical report. NASACR-112235, NASA Langley. 1973.
- [39] Del Real R J. Métodos Estándar para la Evaluación de Uniones Adhesivas. *Tecnología de la adhesión*. Universidad Pontificia Comillas de Madrid; 2000: p. 72-82.
- [40] Labbe S, Drouet JM. A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2012; 33: p.26-35.

- [41] Cognard JY, Devaux H, Sohier L. Numerical analysis and optimization of cylindrical adhesive joints under tensile loads. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2010; 30 (8): p. 706-719.
- [42] Lin J, Lu Z, Yang H, Wang P. A design of experiments assessment of moisture content in uncured adhesive on static strength of adhesive-bonded galvanized SAE1006 steel. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2011; 31 (6): p.478–485.
- [43] Croccolo D, De Agostinis M, Vincenzi N. Static and dynamic strength evaluation of interference fit and adhesively bonded cylindrical joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2010; 30 (5): p. 359-366.
- [44] Taheri F, Hosseinzadeh R. Non-linear investigation of overlap length effect on torsional capacity of tubular adhesively bonded joints. *Composite Structures*. 2009; 91 (2): p.186–195.
- [45] Deb K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester, New York: John Wiley & Sons; 2001.
- [46] Kamarudin, M. Design and fabrication of go-kart chassis ii muhamad. *J. Chem. Inf. Model*. 2013; 53 (9): p. 1689–1699.
- [47] Savage G. *Failure prevention in bonded joints on primary load bearing structures*. Engineering Failure Analysis. 2006
- [48] Yoon, J. Cho, W. Kang, J. Koo, B. Yi, K. *Control Engineering Practice*. Design and evaluation of a unified chassis control system for rollover prevention and vehicle stability improvement on a virtual test track. 2010.
- [49] Lidón J, Pérez B, Martínez M, Madrid M. Calculation of the strength of cylindrical assemblies with an anaerobic adhesive. 2015.
- [50] Portilla DA, Gil L, Arango M, Jiménez JP, Vanegas N, García GL. Propuesta metodológica para la construcción y ensamble de un prototipo de chasis go kart bajo la norma CIK/FIA utilizando uniones híbridas. *Revista Colombiana de Materiales 2020. Edición Especial Memorias X Congreso Internacional de Materiales*. 2020; 15: p. 127-135.