

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“SISTEMA DE ENSAMBLE PARA DISPOSITIVOS AVANZADOS DE  
ASISTENCIA AL CONDUCTOR EN VIDRIO AUTOMOTRIZ”**

**POR**  
**IAN FERNANDO PÉREZ ROMÁN**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAestrÍA EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**DICIEMBRE, 2019**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“SISTEMA DE ENSAMBLE PARA DISPOSITIVOS AVANZADOS DE  
ASISTENCIA AL CONDUCTOR EN VIDRIO AUTOMOTRIZ”**

**POR**  
**IAN FERNANDO PÉREZ ROMÁN**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

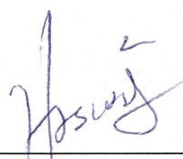
**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**DICIEMBRE, 2019**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Sistema de Ensamble para dispositivos avanzados de asistencia al conductor en vidrio automotriz" realizada por el alumno Ian Fernando Pérez Román, con número de matrícula 1647096, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis



---

Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández

Director



---

Dr. Jorge Adrián Aldaco Castañeda

Revisor

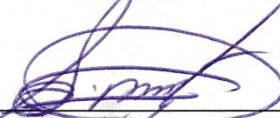


---

Dr. Carlos Vázquez Hurtado

Revisor

Vo. Bo.



---

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Diciembre 2019

# DEDICATORIA

*Esta tesis está dedicada a:*

*Mis padres Guadalupe y Jesús quienes me han inspirado para seguir adelante en mis estudios, apoyado económica y emocionalmente para no desistir en mis sueños y esperanzas, pero más que nada agradezco que me hayan acompañado en este proceso.*

*A mis hermanos Samantha e Irving, por enseñarme y ayudarme a ver varios aspectos de la vida, y que uno debe de salir adelante aún y cuando se tenga un mal día. En especial le doy gracias a Samantha ya que me dio un magnífico regalo de cumpleaños cuando estaba en momentos de estrés.*

*A Dios por darme esta salud, vida y esta familia tan amorosa que nunca me ha defraudado.*

*A mis mejores amigos que me han escuchado y apoyado con sus palabras.*

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo brindado en mis estudios de posgrado, así como a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Le agradezco al Dr. Oscar Zapata por haberme asesorado en mi tesis y darme la oportunidad de tener este proyecto en conjunto con Vitro, a sus enseñanzas sobre el elemento finito y su ayuda en este proyecto.

Al Dr. Carlos Vázquez por dejarme ayudarlo en el diseño de celdas robóticas y contestar mis dudas en su estadía en Vitro.

Al Ing. Daniel Vielma Miranda por su interés en el proyecto aún y cuando no era su obligación el enseñarme sobre el uso de COBOTS, sistemas de visión, PLC y la automatización de procesos.

A Vitro por su flexibilidad en tiempos siempre que se ocupaba y el acceso a sus instalaciones.

# CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Problemática.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Hipótesis.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.1. Objetivo general.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.2. Objetivos específicos.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4. Justificación.....</b>	<b>7</b>
<b>1.5. Metodología.....</b>	<b>7</b>
<b>2. TECNOLOGÍAS ADAS.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Control de cruceo.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Control de cruceo adaptivo.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3. Sistemas precolisión.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4. Sistema de información de puntos ciegos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5. Sistema de alerta de cambio involuntario de carril.....</b>	<b>16</b>
<b>2.6. Sistema autónomo de asistencia al aparcamiento.....</b>	<b>19</b>
<b>2.7. Sistema de detección de somnolencia.....</b>	<b>20</b>
<b>2.8. Calibración de parabrisas con dispositivos ADAS.....</b>	<b>22</b>
<b>3. DESARROLLO DE CELDAS DE PEGADO ADAS.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Soportes ADAS.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2. Celda de pegado A.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3. Celda de pegado B.....</b>	<b>26</b>
<b>4. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1. ¿Qué es el diseño?.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2. Pasos para el diseño.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3. Consideraciones.....</b>	<b>32</b>
<b>4.4. Diseño e ingeniería asistidos por computadora.....</b>	<b>33</b>
<b>4.5. Adquisición de información técnica.....</b>	<b>36</b>
<b>5. ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO (FEA).....</b>	<b>38</b>
<b>5.1. ¿Qué es FEA?.....</b>	<b>38</b>

5.2. Representaciones del sistema a estudiar.....	39
5.3. Proceso general para el análisis de elemento finito.....	40
5.4. Generación de malla.....	41
5.5. Tipos de errores.....	43
5.6. Aplicación de carga.....	43
5.7. Condiciones frontera.....	44
5.8. Teoría estudio estructural.....	44
5.8.1. Elemento resorte.....	45
5.8.2. Ecuaciones para sólidos de tres dimensiones.....	46
6. ENTORNO COLABORATIVO.....	50
6.1. Importancia de la colaboración humano-robot.....	50
6.2. Fuerza teórica herramienta del robot.....	51
7. EXPERIMENTACIÓN.....	55
7.1. Introducción.....	55
7.2. Elección del programa.....	56
7.3. Diseño mecánico.....	56
7.3.1. Ensamblado del dedo de la herramienta robótica .....	57
7.3.2. Ensamblado de la herramienta robótica.....	59
7.4. Elección de material para el método de elemento finito.....	60
7.4.1. Propiedades de los materiales de los soportes ADAS.....	60
7.4.2. Elección de material para el dedo de la agarradera.....	63
7.5. Pruebas en prototipo de silicona.....	64
7.6. Restricciones de posición.....	65
7.7. Efecto en el cambio de posición de la agarradera.....	72
7.8. Cálculo de la fuerza mínima para la sujeción de los soportes ADAS.....	72
7.9. Elección del coeficiente de fricción.....	72
7.10. Refinado de malla.....	73
7.11. Implementación.....	74
8. RESULTADOS.....	76
8.1. Efecto del material.....	76

8.1.1. Aluminio.....	76
8.1.2. Acero.....	77
8.1.3. Comparación.....	79
8.2. Resultados del cálculo de fuerza de agarre.....	79
8.3. Efecto del método de sujeción.....	81
8.3.1. Soporte ADAS (MF <sub>1</sub> , MF <sub>2</sub> y MF <sub>3</sub> ).....	81
8.3.1.1. SA1.....	81
8.3.1.1.1. Efecto de la gravedad en SA1 con la fuerza de agarre.....	83
8.3.1.1.1.1. Sin gravedad.....	83
8.3.1.1.1.2. Con gravedad.....	85
8.3.1.1.2. Efecto de la fuerza con limitaciones de zona para SA1.....	86
8.3.1.1.2.1. Fuerza máxima.....	86
8.3.1.1.2.2. Doble de fuerza máxima.....	87
8.3.1.1.3. Efecto de la aceleración en SA1.....	88
8.3.1.1.3.1. Sin aceleración.....	89
8.3.1.1.3.2. Aceleración de 0.5 <i>g</i> .....	90
8.3.1.1.3.3. Aceleración de 1 <i>g</i> .....	90
8.3.1.1.3.4. Aceleración de 3 <i>g</i> .....	91
8.3.1.2. SA2.....	92
8.3.1.2.1. Efecto de la gravedad en SA2 con la fuerza de agarre.....	94
8.3.1.2.1.1. Sin gravedad.....	94
8.3.1.2.1.2. Con gravedad.....	94
8.3.1.2.2. Efecto de la fuerza con limitaciones de zona para SA2.....	95
8.3.1.2.2.1. Fuerza máxima.....	95
8.3.1.2.2.2. Doble de fuerza máxima.....	96
8.3.1.2.3. Efecto de la aceleración en SA2.....	97
8.3.1.2.3.1. Sin aceleración.....	97



8.3.1.2.3.2. Aceleración de 0.5g.....	97
8.3.1.2.3.3. Aceleración de 1g.....	98
8.3.1.2.3.4. Aceleración de 3g.....	99
8.3.2. Dedo de herramienta robótica (MF <sub>5</sub> , MF <sub>6</sub> y MF <sub>7</sub> ).....	99
8.3.3. Dedo metálico con almohadilla de silicón (MF <sub>7</sub> ).....	101
8.3.4. Ensamble (MF <sub>8</sub> y MF <sub>9</sub> ).....	103
8.3.4.1. Efecto de la apertura.....	108
8.3.4.2. Efectos de fuerza con limitación en el ensamble para SA1.....	113
8.3.4.2.1. Doble de fuerza máxima.....	113
8.3.4.2.2. Fuerza máxima.....	116
8.3.4.2.3. Fuerza de agarre.....	118
8.3.4.3. Efectos de fuerza con limitación en el ensamble para SA2.....	121
8.3.4.3.1. Doble de fuerza máxima.....	122
8.3.4.3.2. Fuerza máxima.....	124
8.3.4.3.3. Fuerza de agarre.....	126
8.4. Análisis de convergencia.....	129
8.4.1. Ensamble.....	129
8.4.2. SA1.....	132
8.4.3. SA2.....	133
8.5. Prueba física del agarre de los soportes ADAS.....	134
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	136
9.1. Conclusiones.....	136
9.2. Recomendaciones.....	138
10. Referencias.....	139

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ejemplos de sistemas avanzados de asistencia al conductor [5].....	4
Figura 1-2 Dispositivos que hacen uso de sensores y/o cámaras [8].....	5
Figura 2-1 Representación física del control de crucero [21].....	10
Figura 2-2 Representación gráfica del control de crucero adaptivo y del panel de control [23] .....	11
Figura 2-3 Sensores a) láser [24], b) radar [25] que se ocupan en el control de crucero adaptivo.....	12
Figura 2-4 Funcionamiento del sistema precolisión [29].....	13
Figura 2-5 Sistema de información de puntos ciegos en funcionamiento [32] .....	16
Figura 2-6 Sistema de alerta de cambio involuntario de carril [34].....	17
Figura 2-7 Sistema autónomo de asistencia al aparcamiento [37].....	19
Figura 2-8 Sistema de detección de somnolencia [40].....	22
Figura 2-9 Calibración de Bosch DAS 1000 [42].....	23
Figura 3-1 Vista a) isométrica y b) superior de la celda de pegado A.....	26
Figura 3-2 Vista isométrica de los componentes en la celda de pegado B.....	27
Figura 4-1 Fases del proceso de diseño [45].....	31
Figura 4-2 Ejemplo de bosquejo de mano alzada [44].....	33
Figura 4-3 Representación alámbrica tridimensional [44].....	34
Figura 4-4 Representación de un modelo sólido con sus propiedades [44]....	35

Figura 5-1 Representación de un sistema con fuerzas externas y condiciones frontera <sup>[45]</sup> .....	38
Figura 5-2 a) Geometría ideal sin discretizar b) discretización de nodos y elementos seleccionados <sup>[45]</sup> .....	39
Figura 5-3 Elemento resorte <sup>[47]</sup> .....	45
Figura 6-1 Fuerza para levantar un objeto en succionadores de vacío a) vertical y b) horizontal <sup>[63]</sup> .....	52
Figura 6-2 Fuerzas para levantar un objeto con una herramienta robótica <sup>[62]</sup> .....	52
Figura 6-3 Fuerzas para levantar un objeto con un ángulo de inclinación <sup>[63]</sup> .....	53
Figura 6-4 Efecto de la aceleración en el factor de seguridad <sup>[62]</sup> .....	54
Figura 7-1 Pieza CAD dada por ROBOTIQ .....	57
Figura 7-2 Dedo metálico.....	57
Figura 7-3 a) Almohadilla de silicón, b) dedo metálico y c) ensamblado del dedo.....	58
Figura 7-4 Dedo metálico con valores de chaflán menores a 0.8 mm.....	58
Figura 7-5 a) S1, b) S2 y c) S3.....	59
Figura 7-6 Representación de los cuerpos en movimiento de mayor relevancia en la herramienta robótica.....	60
Figura 7-7 Material ABS del SA1.....	61
Figura 7-8 Material PEI-GF20 del SA2.....	61
Figura 7-9 Valores de masa reales de a) SA1 y b) SA2.....	61
Figura 7-10 Masa calculada por Inventor 2019 para a) SA2 y b) SA1.....	62
Figura 7-11 Dedo completamente de material metálico.....	64

Figura 7-12 Dedo metálico con almohadilla de silicón.....	64
Figura 7-13 Método MF <sub>1</sub> a) SA2, b) SA1.....	66
Figura 7-14 Método MF <sub>2</sub> .....	67
Figura 7-15 Método MF <sub>3</sub> a) SA2 y b) SA1.....	68
Figura 7-16 Método MF <sub>4</sub> a) SA2 y b) SA1.....	69
Figura 7-17 Método MF <sub>5</sub> .....	69
Figura 7-18 Método MF <sub>6</sub> .....	70
Figura 7-19 Método MF <sub>7</sub> .....	70
Figura 7-20 Método MF <sub>8</sub> .....	71
Figura 7-21 Método MF <sub>9</sub> .....	71
Figura 7-22 Cambio en la forma de mallado con diferentes tamaños de malla a) 160 mm, b) 40 mm y c) combinado.....	73
Figura 8-1 Resultados de a) esfuerzo y b) desplazamiento de aluminio con una fuerza de 235 N.....	76
Figura 8-2 Resultados de a) esfuerzo y b) desplazamiento de acero con una fuerza de 235 N.....	78
Figura 8-3 Esfuerzos de SA1 en a) MF <sub>1</sub> , b) MF <sub>2</sub> y c) MF <sub>3</sub> .....	81
Figura 8-4 Zonas de mayor esfuerzo de SA1 en a) MF <sub>1</sub> , b) MF <sub>2</sub> y c) MF <sub>3</sub> ...82	
Figura 8-5 Comparación entre los desplazamientos de SA1 entre a) MF <sub>1</sub> , b) MF <sub>2</sub> y c) MF <sub>3</sub> .....	82
Figura 8-6 Factor de seguridad de SA1 en a) MF <sub>1</sub> , b) MF <sub>2</sub> y c) MF <sub>3</sub> .....	83
Figura 8-7 Fuerza de agarre en SA1 sin gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	84

Figura 8-8 Zonas de impacto con fuerza de agarre en SA1 sin gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	84
Figura 8-9 Fuerza de agarre en SA1 con gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	85
Figura 8-10 Zonas de impacto con fuerza de agarre en SA1 con gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	85
Figura 8-11 Limitación de zona de SA1 con fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	86
Figura 8-12 Zonas de impacto con limitación de zona de SA1 con fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	87
Figura 8-13 Limitación de zona de SA1 con doble de fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	87
Figura 8-14 Zonas de impacto con limitación de zona de SA1 con doble de fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad...	88
Figura 8-15 Limitación de zona de SA1 sin aceleración a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	89
Figura 8-16 Zonas de impacto con limitación de zona de SA1 sin aceleración a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	89
Figura 8-17 Limitación de zona de SA1 con $a = 0.5g$ a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	90
Figura 8-18 Limitación de zona de SA1 con $a = 1g$ a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	91
Figura 8-19 Limitación de zona de SA1 con $a = 3g$ a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	91
Figura 8-20 Esfuerzos de SA2 en a) $MF_1$ , b) $MF_2$ y c) $MF_3$ .....	92
Figura 8-21 Zonas de mayor esfuerzo de SA2 en a) $MF_1$ , b) $MF_2$ y c) $MF_3$ ...	92

Figura 8-22 Comparación entre los desplazamientos de SA2 entre a) MF <sub>1</sub> , b) MF <sub>2</sub> y c) MF <sub>3</sub> .....	93
Figura 8-23 Factor de seguridad de SA2 en a) MF <sub>1</sub> , b) MF <sub>2</sub> y c) MF <sub>3</sub> .....	93
Figura 8-24 Fuerza de agarre en SA2 sin gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	94
Figura 8-25 Fuerza de agarre en SA2 con gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	95
Figura 8-26 Limitación de zona de SA2 con fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	95
Figura 8-27 Limitación de zona de SA2 con doble de fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	96
Figura 8-28 Limitación de zona de SA2 sin aceleración a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	97
Figura 8-29 Limitación de zona de SA2 con $a = 0.5g$ a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	98
Figura 8-30 Limitación de zona de SA2 con $a = 1g$ a) esfuerzos, b) desplazamientos.....	98
Figura 8-31 Limitación de zona de SA1 con $a = 3g$ a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	99
Figura 8-32 Esfuerzos en el dedo de aluminio 6061 a) MF5, b) MF6 y c) MF7.....	100
Figura 8-33 Desplazamientos del dedo de aluminio 6061 a) MF5, b) MF6 y c) MF7.....	100
Figura 8-34 Esfuerzos en el dedo con a) aluminio 6061 y acero AISI 4340, y b) acero inoxidable AISI 304.....	101

Figura 8-35 Desplazamientos en el dedo con a) aluminio 6061 y acero AISI 4340, y b) acero inoxidable AISI 304.....	102
Figura 8-36 Resultados de a) esfuerzos y b) desplazamientos en la almohadilla de silicón.....	103
Figura 8-37 Diferencias de esfuerzos en el dedo a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> .....	103
Figura 8-38 Diferencias de desplazamientos en el dedo a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> ....	104
Figura 8-39 Diferencias en el factor de seguridad en el dedo a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> .....	104
Figura 8-40 Comportamiento de los a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad en la almohadilla de silicón en MF <sub>9</sub> y MF <sub>8</sub> .....	105
Figura 8-41 Diferencias de esfuerzos en S3 a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> .....	105
Figura 8-42 Diferencias de desplazamientos en S3 a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> .....	106
Figura 8-43 Diferencias de esfuerzos en S2 a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> .....	106
Figura 8-44 Diferencias de desplazamientos en S2 a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> .....	107
Figura 8-45 Diferencias de esfuerzos en S1 a) MF <sub>9</sub> y b) MF <sub>8</sub> .....	107
Figura 8-46 Esfuerzos en el dedo con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	108
Figura 8-47 Desplazamientos en el dedo con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	108
Figura 8-48 Esfuerzos en la almohadilla de silicón con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	109
Figura 8-49 Desplazamientos en la almohadilla de silicón con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	109
Figura 8-50 Esfuerzos en S3 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	110

Figura 8-51 Desplazamientos en S3 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	110
Figura 8-52 Esfuerzos en S2 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	111
Figura 8-53 Desplazamientos en S2 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	111
Figura 8-54 Esfuerzos en S1 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	112
Figura 8-55 Desplazamientos en S1 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.....	112
Figura 8-56 Zona delimitada en la agarradera para SA1.....	113
Figura 8-57 Dedo con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	114
Figura 8-58 Almohadilla de silicón con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	114
Figura 8-59 S3 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	115
Figura 8-60 S2 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	115
Figura 8-61 S1 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	116
Figura 8-62 Dedo con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	116
Figura 8-63 Almohadilla de silicón con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	117



Figura 8-64 S3 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	117
Figura 8-65 S2 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	118
Figura 8-66 S1 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	118
Figura 8-67 Dedo con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	119
Figura 8-68 Almohadilla de silicón con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	119
Figura 8-69 S3 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	120
Figura 8-70 S2 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	120
Figura 8-71 S1 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	121
Figura 8-72 Zona delimitada en la agarradera para SA2.....	121
Figura 8-73 Dedo con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	122
Figura 8-74 Almohadilla de silicón con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	122
Figura 8-75 S3 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	123
Figura 8-76 S2 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	123

Figura 8-77 S1 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	124
Figura 8-78 Dedo con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	124
Figura 8-79 Almohadilla de silicón con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.....	125
Figura 8-80 S3 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	125
Figura 8-81 S2 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	126
Figura 8-82 S1 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	126
Figura 8-83 Dedo con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	127
Figura 8-84 Almohadilla de silicón con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	127
Figura 8-85 S3 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	128
Figura 8-86 S2 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	128
Figura 8-87 S1 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.....	129
Figura 8-88 Diferencias entre la cantidad de nodos y elementos entre a) malla de 0.8 y b) malla de 0.6.....	129
Figura 8-89. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en la almohadilla de silicona.....	130

Figura 8-90. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en el dedo de aluminio. ....	131
Figura 8-91. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en S3.....	131
Figura 8-92. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en S2.....	132
Figura 8-93. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en S1.....	132
Figura 8-94. Convergencia de a) esfuerzos y b) desplazamientos en SA1.....	133
Figura 8-95. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en SA2.....	134
Figura 8-96. Zona de agarre del SA1 con translación a otro lugar.....	134
Figura 8-97. Zona de agarre del SA2 con translación a otro lugar.....	135

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Respuesta de los sistemas precolisión de ensambladoras [7].....	14
Tabla 2-2 Respuesta del sistema de alerta de cambio involuntario de carril de diferentes marcas [7].....	18
Tabla 2-3 Funcionamiento y respuesta del sistema de detección de somnolencia [7].....	21
Tabla 7-1 Propiedades mecánicas de ABS Plastic y PEI-GF20 [68][69].....	62
Tabla 7-2 Propiedades mecánicas de los aceros y aluminios elegidos para las pruebas de esfuerzo [69].....	63
Tabla 7-3 Grados de libertad para tipos de fijaciones [69].....	65
Tabla 7-4 Coeficiente de fricción de ventosas con piezas de interés [70].....	73
Tabla 7-5 Casos de métodos de fijación.....	75
Tabla 8-1 Comparación de aluminios.....	77
Tabla 8-2 Comparación de aceros.....	78
Tabla 8-3 Fuerza mínima para ejercer un agarre efectivo en los soportes ADAS.....	79
Tabla 8-4 Fuerza de agarre con aceleraciones 1g hasta 3g.....	80
Tabla 8-5 Fuerza de agarre para aceleraciones en SA1.....	80
Tabla 8-6 Fuerza de agarre para aceleraciones en SA2.....	81
Tabla 8-7 Esfuerzos y desplazamientos del dedo de aluminio debido a la fijación del elemento.....	100

## ÍNDICE DE VARIABLES

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
$f$	Fuerza
$k$	Constante elástica
$u$	Desplazamientos
$\sigma$	Esfuerzo
$\epsilon$	Deformación
$E$	Módulo de Young
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$G$	Módulo de corte
$\mu$	Coefficiente de fricción estático
$f_f$	Fuerza de fricción
$F^*$	Fuerza mínima de agarre
$m$	Masa
$g$	Aceleración de la gravedad
$a$	Aceleración
$\alpha$	Ángulo de inclinación
$F$	Fuerza empleada en el agarre
$N$	Factor de seguridad

# RESUMEN

La empresa Vitro Flex es una empresa de giro automotriz especializada en vidrio automotriz, reconocidos y preferidos por las principales armadoras como proveedores confiables y socios estratégicos. Sus parabrisas tienen el mejor desempeño en pruebas de resistencia, seguridad y calidad más exigentes en la industria. La realización de los parabrisas viene desde el diseño del cristal y los componentes que lo fijarán al vehículo, hasta la creación de su empaque para la entrega en línea de ensamblado.

En este trabajo se obtuvo la fuerza de mínima de agarre que se necesita para levantar los soportes ADAS mencionados en la literatura como SA1 y SA2. Se eligió el tipo de material del que debe de estar hecho los dedos de la herramienta robótica tomando en cuenta la maquinabilidad del material, la fuerza máxima que puede emplear la herramienta robótica en el dedo al momento de realizar el agarre, el desplazamiento y factor de seguridad generado en el dedo de la herramienta por la fuerza máxima, y que el material no afecte a los elementos electrónicos del robot colaborativo, así como a la herramienta robótica. Se propusieron métodos de fijación tanto para los soportes ADAS, el dedo de la herramienta robótica y la herramienta robótica. Un pegado incorrecto de los brackets en el vidrio automotriz implica riesgos para usuarios de automóviles por lo que se usó el software Inventor 2019 para la realización de las piezas necesarias para el agarre en los brackets y por medio de simulaciones de elemento finito se determinó la fuerza de agarre operacional y la aceleración que se puede emplear en los brackets sin llegar a deformarlos de manera plástica.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

---

Se denomina cuarta revolución industrial a los cambios en los productos y equipos de las industrias, donde se buscará que los productos tengan características inteligentes basándose en la conectividad y poder computacional, incorporando habilidades de autogestión. Los equipos deberán tener su propio poder computacional, empleando sensores y actuadores integrados, teniendo como características: conocimiento de su estado, capacidad y opciones de configuración para tomar la mejor decisión <sup>[1]</sup>.

En los últimos años, la industria 4.0 se ha interesado en el crecimiento y desarrollo de la manufactura. Ante esta situación, la mayoría no puede prever cómo repercutirá la industria 4.0 en el proceso de la manufactura o cuando se efectuará la industria 4.0 en su totalidad, pero las industrias que no se adapten o tarden en adaptarse a estos cambios podrían quedarse fuera del mercado <sup>[1]</sup>.

Ante estas circunstancias las empresas tienen diferentes conceptos sobre la industria 4.0, dividiéndose en tres grupos al momento de tomar decisiones <sup>[1]</sup>:

- Primer grupo: Representando a la mayoría, simplemente ignoran los cambios que puede provocar la industria 4.0 y realizan las actividades industriales de manera usual.
- Segundo grupo: Existe una mayor atención al concepto de la industria 4.0. Sin embargo, su objetivo a alcanzar de la industria 4.0 tomará muchos años, y, en lugar de cambiar de inmediato, optan por avanzar paso por paso. Por lo tanto, ellos hacen uso del sistema de ejecución de fabricación (Manufacturing Execution System) u otro tipo de sistema.

- Tercer grupo: Este grupo argumenta que los sistemas descentralizados siempre deben de ocupar un sistema centralizado para el cumplimiento, optimización y seguimiento.

La industria automotriz ha tomado una gran relevancia en países como Estados Unidos, Japón, Corea del Sur y los de Europa occidental, en donde el más destacado es Estados Unidos en términos de valor total de productos, valor agregado por fabricación y número de empleados asalariados <sup>[2]</sup> <sup>[3]</sup>.

Una de cada seis empresas tiene una fuerte conexión con la industria automotriz ya sea en fabricación, distribución, servicio o uso de vehículos motorizados. La producción de vehículos motorizados en los principales países productores está en manos de un grupo pequeño de grandes empresas. Mientras tanto, los productores pequeños han desaparecido debido a que se requiere una gran inversión en equipos y herramientas para la producción en masa <sup>[2]</sup>.

La seguridad es uno de los temas de mayor impacto social y económico, por lo tanto, los esfuerzos para asegurar la seguridad vial han sido un éxito en la mayoría de los países, pero una reducción de muertes y lesiones por distancia recorrida es compensada por el aumento de número de accidentes debido al mayor uso de vehículos donde la cifra llega a más de 40,000 solamente en Estados Unidos. Actualmente los vehículos cuentan con múltiples bolsas de aire para proteger a los usuarios de accidentes de impacto lateral, volcadura, así como choques frontales <sup>[2]</sup>.

El anhelo la reducción de muertes y ahorro de combustible ha llevado a los políticos a centrarse en los límites de velocidad. En los países como insulares como Japón, Irlanda y Filipinas el límite de velocidad va desde aproximadamente 65 km por hora, en los países europeos va de 120 a 130 km por hora mientras que en otros países como Filipinas, India y Alemania no tienen límites de velocidad prescritos. Se ha pensado equipar a los automóviles nuevos con un dispositivo de control de velocidad usando satélites de posicionamiento global para rastrear la ubicación del vehículo y junto con una ruta digital integrada, cortar



gradualmente el suministro de combustible del vehículo si se exceden los límites de velocidad local [2].

En los recientes años se ha buscado una mayor seguridad, principios económicos, comodidad del conductor y argumentos ambientales, por medio de ayudas electrónicas bien desarrolladas e implementadas con una mayor velocidad de procesamiento [4].

La mayor causa de accidentes es debido a errores del conductor. En la India le corresponde el 6% de los choques, siendo principalmente por escuchar música a un volumen muy alto mientras se conduce, hablar por teléfono celular, incremento del número de vehículos en el camino y caminos excepcionales en la India. Otro factor es el abuso del alcohol con un 3.8%. En Inglaterra la fatiga es una de las principales razones de accidentes con un 7% a 10% debido al cansancio o somnolencia, este caso es interesante porque si un conductor sufre un accidente y sobrevive, pocas veces admite la causa y en caso contrario la evidencia no suele ser suficiente para demostrar que fue debido al cansancio y no por fallas del vehículo [4].

Para prevenir y reducir el número de accidentes, en Europa, Estados Unidos y Japón, se han implementado aplicaciones como sistemas de navegación automatizada y sistemas de control de crucero adaptivo. Estos dispositivos surgieron mediante la combinación de enfoques ergonómicos y de ingeniería para evaluar riesgos, comúnmente llamados sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS por sus siglas en inglés), diseñados con una interfaz hombre-máquina, segura y adecuada, capaces de aumentar la seguridad del automóvil, así como en la carretera [4]. Algunos ejemplos de Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor se encuentran en la Figura 1-1.



Figura 1-1. Ejemplos de sistemas avanzados de asistencia al conductor [5].

Algunas de las ventajas de los ADAS son tener un controlador con la información necesaria, automatizar las tareas difíciles y repetitivas, y conducir a un aumento general de la seguridad del vehículo. Los dispositivos ADAS están en constante cambio, aún y cuando ciertos dispositivos permanezcan, otros cambiarán o serán desechadas por mejores implementaciones y modernización de la idea básica. El desarrollo de estos sistemas se rige por las normas de seguridad internacionales, como IEC-61508 e ISO- 26262 [4].

De los componentes que se han desarrollado en los ADAS, existen dos tipos: los que son críticos y los que ayudan al conductor a evitar accidentes menores [6][7].

Los dispositivos ADAS presentados en la Figura 1-1 funcionan por medio de sensores y/o cámaras, los cuales tienen un rango de operación según la importancia de la detección de los dispositivos ADAS. El rango de operación se representa en la Figura 1-2, donde el radar de largo alcance sería el de mayor rango y el ultrasonido el de menor rango.

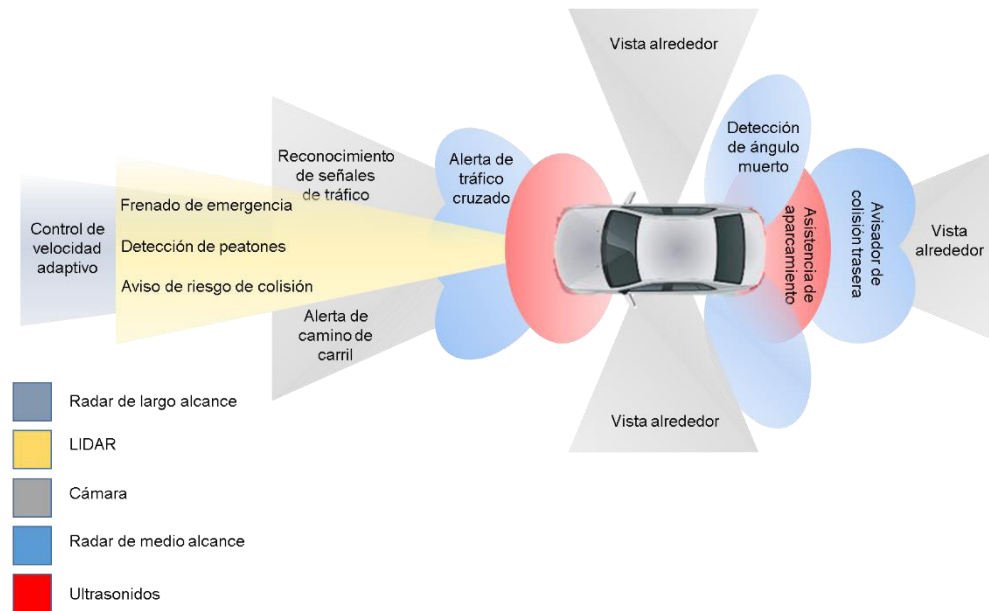


Figura 1-2. Dispositivos que hacen uso de sensores y/o cámaras [8].

## 1.1. Problemática

Los soportes para dispositivos de asistencia al manejo ADAS (siglas del inglés Advanced Driver Assistance Systems) que se pegan en el vidrio automotriz, deben de tener un error de posición máximo de  $\pm 1$  mm, en comparación con el estándar de los fabricantes de automóviles.

Ante la demanda de parabrisas con este tipo de brackets en el mercado de repuesto, el proceso de pegado requiere ser similar al del fabricante del equipo original en cuestión a precisión y exactitud. Debido a esto, se requiere automatizar parte del proceso de pegado con una máquina capaz de realizar movimientos de seis grados de libertad.

Los parabrisas pueden ser dañados de manera física por rocas o por efectos de clima y/o temperatura. Las tecnologías ADAS en su mayoría están montadas en los parabrisas como un destino natural, debido a que el parabrisas es el campo de visión del conductor, aunque vulnerable ante daños físicos provocado por rocas, efectos de clima y temperatura. La adopción del uso de las tecnologías ADAS está constantemente subiendo debido a la positiva retroalimentación por

parte de los conductores. Esto es algo que preocupa a las aseguradoras debido a los crecientes costos y complejidad en las reparaciones <sup>[9][10][11]</sup>.

La modalidad de las reparaciones de los parabrisas ha sido encaminada hacia servicios móviles caracterizándose por llevar las herramientas e incluso el mismo parabrisas al lugar donde se ocupa o haya sucedido el accidente. Dado que los nuevos parabrisas cuentan con tecnología ADAS, este tipo de reparaciones se verá afectado debido a que los dispositivos como cámaras o sensores a reponer precisan de recalibración que pueda asegurar el correcto funcionamiento de los dispositivos dentro del vehículo en movimiento, en caso contrario el conductor no será capaz de notar un funcionamiento anormal hasta que suceda un accidente. La calibración se puede realizar de diversas maneras dependiendo de la necesidad y del fabricante, teniendo una característica en común, la de requerir una superficie perfectamente plana con luz controlada. El equipo por utilizar en la recalibración puede llegar a costar hasta 15,000 dólares y los técnicos deben de estar capacitados <sup>[9] [10] 11] [12] [13] [14] [15][16]</sup>.

## **1.2. Hipótesis**

Se puede realizar un pegado de bajo coste para el mercado de repuesto, con las tolerancias geométricas permitidas de  $\pm 1$  mm por parte de los fabricantes de automóviles, mediante el uso de robots colaborativos, diseño mecánico y simulación numérica. Con estas herramientas se realizarán pruebas para poder encontrar las medidas y condiciones óptimas para los instrumentales a utilizar, así como la fuerza con la que el robot realizará el pegado del soporte ADAS en el parabrisas.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Analizar para el mercado de repuesto un proceso de pegado para un sistema de soporte ADAS en el parabrisas mediante el uso de un software para el diseño mecánico y la simulación de elemento finito para obtener las dimensiones de los componentes y las fuerzas permisibles para el robot colaborativo.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar la herramienta del robot y el robot colaborativo apropiados para el proceso de pegado.
- Identificar un material o materiales adecuados para las herramientas del robot que harán el proceso de pegado.
- Calcular la fuerza necesaria que debe de efectuar la herramienta del robot para elevar y trasladar los soportes ADAS.
- Realizar las simulaciones estructurales en los sistemas de soporte ADAS para determinar el rango operacional permitido de la fuerza del robot.

### **1.4. Justificación**

La automatización de los procesos posee una gran relevancia en la industria automotriz, desde ensambles de componentes, así como del mismo vehículo. En este caso, el proceso de pegado para los soportes de los ADAS ocupa una alta precisión y exactitud, debido al funcionamiento de estos dispositivos mediante la digitalización de los datos tomados del entorno por medio de cámaras y sensores. Además, estos dispositivos deben ser calibrados junto con los componentes del vehículo para funcionar de manera adecuada. Una mala calibración o un ensamblado incorrecto de algunos de los componentes pueden crear una interpretación errónea de lo captado por los dispositivos, llegando a provocar un accidente automovilístico fatal.

### **1.5. Metodología**

1. Mediante las celdas robóticas en el mercado original de vidrio automotriz se estará revisando el funcionamiento de las celdas de pegado y el equipo utilizado.
2. De los productos mostrados por los proveedores se elegirá el robot y herramienta colaborativos capaces de realizar el proceso de pegado.
3. Mediante el software Inventor se harán las réplicas de los componentes de la agarradera de mayor interés.

4. Se calculará la fuerza necesaria que debe de efectuar la herramienta del robot para elevar los componentes y trasladarlos a la zona de interés.
5. Se hará una simulación de elemento finito para estimar la fuerza máxima y aceleración que pueden soportar los soportes ADAS al momento de ser elevados y trasladados a la zona de interés con la herramienta del robot.
6. Elegir un método de fijación que se acople a la necesidad de emplear diferentes tipos de soportes ADAS.

# CAPÍTULO 2

## TECNOLOGÍAS ADAS

---

El uso de los sistemas integrados comenzaron a ser usados en programas espaciales y la investigación sobre estos sistemas ha llegado a los vehículos, en donde cada uno tiene unidades electrónicas de control incorporadas, siendo capaces de tomar varias entradas digitales de diferentes dispositivos dentro del vehículo y del conductor, para dar una respuesta en tiempo real sin tener error alguno, debido a que una falla en alguno de los sistemas puede causar un accidente <sup>[6][7]</sup>.

### 2.1. Control de crucero

Desde los inicios de 1900 han existido dispositivos capaces de controlar la velocidad del motor de un vehículo haciendo uso de un dispositivo mecánico llamado gobernador centrífugo. En 1960 fueron desarrollados los electrónicos de control de crucero y puestos en producción masiva hasta a mediados de 1980. Estos dispositivos ocupan un algoritmo de programación prioritaria para mantener una velocidad dada por el usuario y asignar tiempos a las tareas dadas por el usuario, por ejemplo: Cancelar, Marcha Libre, Reanudar y Mantener <sup>[6][7]</sup>.

El funcionamiento del dispositivo es al principio mediante una aceleración manual hecha por el usuario, al presionar el botón Mantener, esa velocidad quedará guardada en el sistema, con el botón Acelerar, caracterizado por tener un símbolo de suma a lado será para aumentar el valor guardado y con Marcha Libre será para disminuir el valor, si se presiona Cancelar o se aplica el freno, el control de crucero quedará desactivado temporalmente, pero si se aprieta el botón reanudar el vehículo empezará a disminuir o acelerar hasta llegar al último valor guardado por el dispositivo. El proceso descrito es el general, pero el

proceso, así como los botones a utilizar dependerá ampliamente del fabricante [6][7][17][18][19][20].

El control de crucero ofrece ciertos beneficios a los operadores de vehículos [6][7]:

- Reducción de la fatiga del conductor al no hacer uso de los pedales en viajes largos.
- Ahorro de combustible debido a la velocidad constante por el módulo de control de crucero.

El control de crucero se encuentra muy cerca del volante ya sea en forma de palanca como lo representado en la Figura 2-1 o como botones.



Figura 2-1. Representación física del control de crucero [21].

## 2.2. Control de crucero adaptivo

El sistema opera como un control de crucero estándar al momento de acoplarse, pero a diferencia de su predecesor, el vehículo cuenta con un sensor de barrido frontal el cual reacciona ante cualquier vehículo cercano al rango del sensor. El funcionamiento del control de crucero adaptivo debe de mantener la velocidad y distancia proporcionada por el usuario, siendo posible mediante el manejo de los frenos, así como el de la aceleración sin alterar el confort del ocupante. Uno de los primeros desarrolladores en esta tecnología fue Bjornberg



[6][7][22]. En la Figura 2-2 se puede notar que el control de crucero adaptivo tiene ligeros cambios en la palanca cercana al volante y se adiciona una pantalla en el cual marca la distancia y velocidad que tiene el vehículo.



Figura 2-2. Representación gráfica del control de crucero adaptivo y del panel de control [23].

Hay un debate sobre cual sensor ocupar, está entre los sensores láser y los sensores de radar, siendo el sensor láser una opción económica debido a su pequeño tamaño teniendo una facilidad de empaquetarlo mayor a la del sensor de radar, lamentablemente, los sensores láser tienen un inconveniente con condiciones climatológicas adversas, debido a la acumulación de suciedad en los lentes de los sensores, mientras, los sensores de radar tienen un rango más amplio [6][7][22].

En la Figura 2-3 se muestra la ubicación en donde se ensamblan los sensores láser y de radar en el automóvil. La ubicación puede cambiar dependiendo del fabricante, así como el tipo de sensor a ocupar.

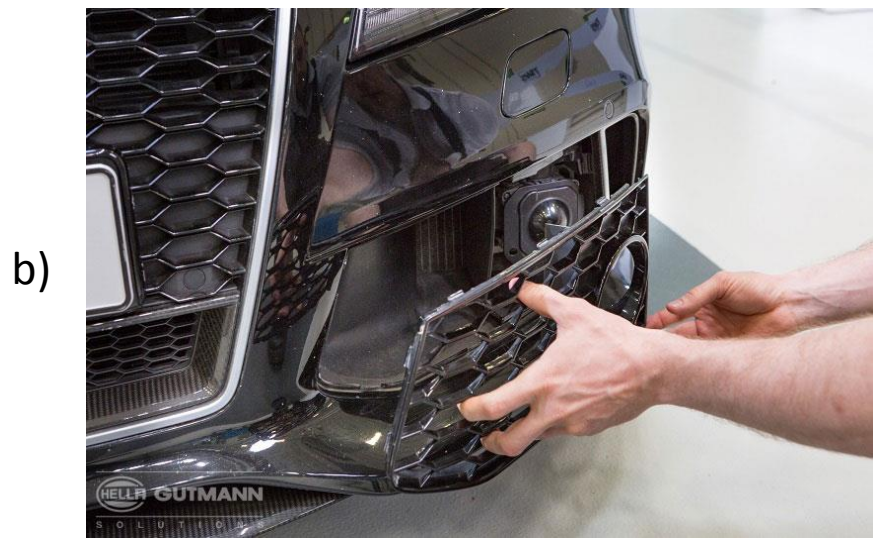
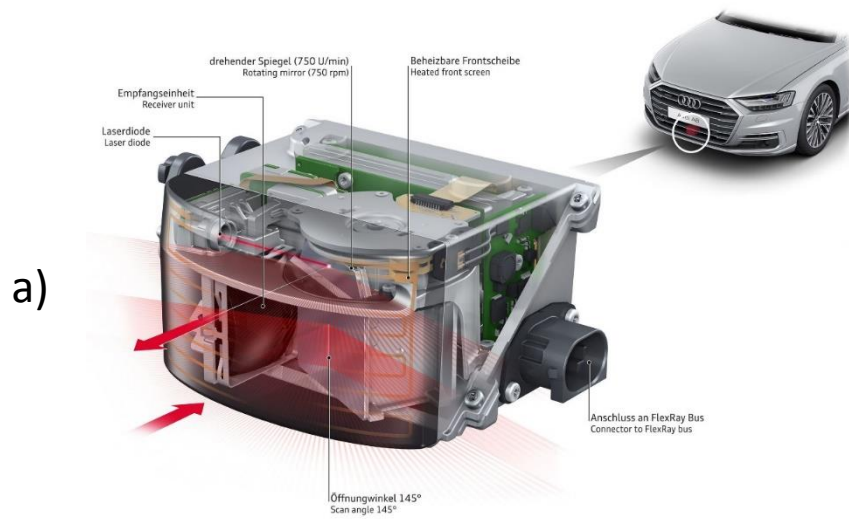


Figura 2-3. Sensores a) láser<sup>[24]</sup>, b) radar<sup>[25]</sup> que se ocupan en el control de crucero adaptivo.

El control de crucero adaptivo fue producido a finales del siglo XIX en Toyota con el Lexus Luxury Sedans. Los avances realizados en este dispositivo fueron la conexión inalámbrica en el 2005 y detección de vehículos a 120 metros mediante el sensor infrarrojo en el 2010 [7].

### 2.3. Sistemas precolisión

Este dispositivo apareció a mediados del 2000, su funcionamiento consiste en detectar vehículos por medio de radares o sensores láser utilizados en las videocámaras, si al momento de hacer la detección, detecta una colisión inminente, primeramente, alertará al conductor, en caso de no realizarse ningún cambio, se tensionarán los cinturones de seguridad y se cargarán los frenos. Las primeras ensambladoras en ocupar este sistema fueron Toyota y Honda mediante la implementación de sensores de barrido frontal y a finales del siglo XX sistemas similares fueron empleados por BMW, Ford y Mercedes [6][7][26][27][28].

En la Figura 2-4 se presenta un ejemplo del sistema de precolisión ocupando dos automóviles, al momento de mandar la alerta se tienen dos zonas en las que el sistema precolisión empezará a actuar, al detectar una alta posibilidad de colisión, el sistema empezará a preparar un prefreno y se mantendrá en espera, al entrar en la segunda zona de colisión inevitable es cuando se efectuará el prefreno y el aseguramiento de los cinturones de seguridad de manera controlada.

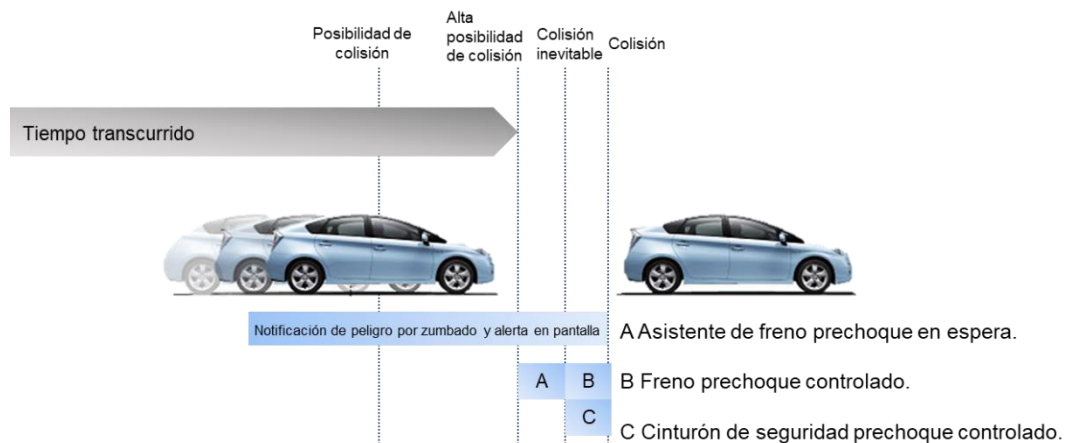


Figura 2-4. Funcionamiento del sistema precolisión [29].

La retroalimentación al conductor ante una colisión inminente depende de la ensambladora, en la Tabla 2-1 se puede notar las diferencias entre los sistemas empleados por cada ensambladora.

Tabla 2-1. Respuesta de los sistemas precolisión de ensambladoras [7].

<b>Ensambladora</b>	<b>Nombre del sistema</b>	<b>Respuesta del sistema prechoque</b>
<b>Audi</b>	Pre-Sense Plus	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sube las ventanas y las alertas son tanto visuales como audibles.</li> <li>2. Aplica un ligero frenado para atraer la atención del conductor.</li> <li>3. Aplica un frenado automático mayor.</li> <li>4. Desacelera el vehículo y aplica la potencia de frenado.</li> </ol>
<b>Ford</b>	Collision Warning with Brake Support	Alarmas visuales y audibles, precarga los frenos para incrementar el rendimiento del frenado del conductor.
<b>Honda</b>	Collision Braking Mitigation System	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alarmas visuales y audibles.</li> <li>2. Pretensión del cinturón de seguridad para el conductor.</li> <li>3. Incremento del tensionamiento del cinturón de seguridad y frenado automático</li> </ol>
<b>Mercedes</b>	Pre-Safe	Alerta al conductor del incidente y 40% del frenado parcial.
<b>Toyota</b>	Pre-Collision System	Pretensionamiento de los cinturones de seguridad y aplicación del frenado parcial.
<b>Volkswagen</b>	Front Assist	Pretensionamiento de los cinturones de seguridad y aplicación del frenado parcial.
<b>Volvo</b>	Collision Warning with Auto Brake	Pretensionamiento de los cinturones de seguridad y aplicación del frenado parcial.

## 2.4. Sistema de información de puntos ciegos

La zona de punto ciego se denomina como las áreas alrededor de un vehículo donde el conductor no puede detectar un objeto por medio de sus retrovisores laterales, la solución tradicional a este problema es girar la cabeza en dirección al hombro derecho o izquierdo para detectar los objetos teniendo el inconveniente de perder la concentración en el camino recorrido por el vehículo. Ante esta problemática se creó el sistema de información de puntos ciegos para detectar objetos y/o vehículos en la zona de punto ciego por medio de sensores basados en radar inicialmente y conforme fue avanzando la tecnología se ofrecieron sistemas basados en la visión y arreglos de radar avanzados <sup>[6][7][30][31]</sup>.

El sistema fue introducido por primera vez en Volvo con su sedán S80 y desde entonces se ha introducido en productos de la matriz de Ford. El producto Infiniti M lanzado en el 2011 fue el primer vehículo ofrecido comercialmente para ayudar a conducir el vehículo si se detectaba un objeto en el punto ciego. La mayoría de los sistemas comerciales ofrecen sistemas de puntos ciegos similares que alertan al conductor de un objeto a través de los leds que se iluminan en cada espejo lateral o cerca del mismo <sup>[7]</sup>.

La propuesta del Centro de Investigación y Pruebas Automotrices en Taiwán hace uso de cámaras para detectar objetos en los puntos ciegos de los vehículos, el método consta de tres unidades <sup>[7]</sup>:

1. Unidad de Entrada: Encargada de recibir los datos de la imagen de la cámara con un dispositivo de carga acoplada (CCD) / semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), así como ángulo del volante y datos del sensor de velocidad del controlador de red de área (CAN) del vehículo.
2. Unidad de Procesamiento: Se compone de un dispositivo digital de procesador de señal y microprocesador para manejar las entradas. El procesamiento hace uso de una teoría llamada estimación de la entropía de la imagen para procesar la información de la imagen en una distancia unidimensional al valor del objeto.

3. Unidad de salida: Si el procesamiento de datos considera como amenaza a un objeto determinado, se mandará una alerta al usuario mediante una alarma sonora y de manera visual mediante una pantalla que mostrará la vista de la cámara.

Las ventajas de esta propuesta son la reacción que tiene el dispositivo con el tiempo, además de una probabilidad menor de falsos positivos para el conductor, mientras que la desventaja sería el costo en la implementación de vehículos comunes [7].

En la Figura 2-5 se presenta el funcionamiento general del sistema de información de puntos ciegos, en donde un automóvil está entrando a la zona de detección del sistema, si el conductor hace alguna maniobra hacia la zona donde se encuentra el automóvil, el sistema tomará el control del volante momentáneamente y regresará al carril correspondiente.

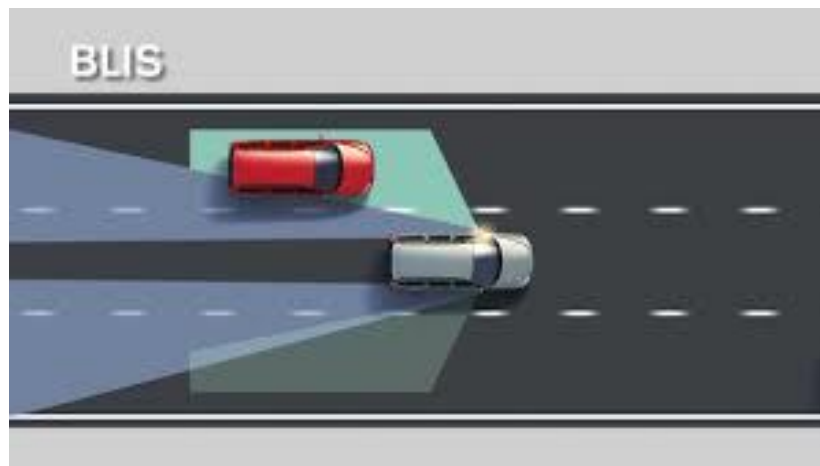
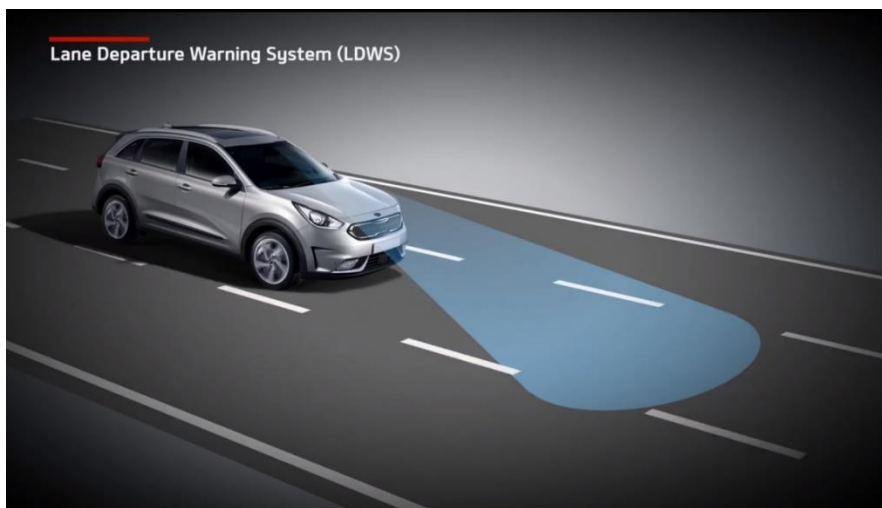


Figura 2-5. Sistema de información de puntos ciegos en funcionamiento [32].

## 2.5. Sistema de alerta de cambio involuntario de carril

La implementación de este dispositivo fue primeramente en los semicamiones y actualmente los fabricantes de automóviles los incluyen en sus modelos de lujo, siendo Nissan la primera ensambladora al utilizar este sistema en su Lane Keeping Support System en el 2001. El funcionamiento consta de un sistema integrado con cámara encargada de monitorear al vehículo en caso de

abandonar el carril actual sin hacer uso de intermitentes, al momento de estar abandonando el carril se alertará al conductor de manera visual o por audio, incluso el volante puede llegar a vibrar para que actúe como una simulación de una franja preventiva de carretera, y en caso de no realizar algún cambio el sistema empezará a controlar la dirección del vehículo para permanecer en el carril actual. Además, ayuda a detectar a conductores descuidados o adormecidos, así como prevenir accidentes [6][7][33]. En la Figura 2-6 se representa al sistema de visión detectando las líneas del carril en el que se encuentra actualmente el automóvil.



*Figura 2-6. Sistema de alerta de cambio involuntario de carril [34].*

El sistema de alerta de cambio involuntario de carril se puede desactivar temporalmente al hacer uso de las intermitentes o permanentemente mediante un tipo de interfaz humano-máquina (HMI). Es interesante saber que debido a que los sistemas integrados a utilizar aumentan en su complejidad se está en constante rediseño de los productos para tener un costo más económico, debido a que los sistemas integrados a utilizar aumentan en su complejidad [7]. La respuesta de este tipo de sistemas en diferentes Fabricantes de Equipo Original (OEM) se puede verificar en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Respuesta del sistema de alerta de cambio involuntario de carril de diferentes marcas [7].

<b>(OEM)</b>	<b>Nombre del sistema</b>	<b>Respuesta del sistema de alerta de cambio involuntario de carril</b>	<b>Nivel invasivo</b>
<b>Audi</b>	Lane Assist	El sistema emite un sonido de advertencia cuando se detecta un cambio involuntario de carril.	Bajo nivel, el conductor aún mantiene el control total del vehículo.
<b>BMW</b>	Lane Departure Warning	El volante vibra para simular una franja preventiva, notificando al conductor un cambio involuntario de carril.	Moderadamente invasivo pero el conductor aún tiene un control total.
<b>Ford</b>	Lane Departure Warning System	Suena una alarma y usa retroalimentación visual para dirigir al conductor de regreso al carril.	Bajo nivel, el conductor aún mantiene completamente el control del vehículo
<b>GM</b>	Lane Departure Warning	Suena una alarma y usa retroalimentación visual para dirigir al conductor de regreso al carril.	Bajo nivel, el conductor aún mantiene completamente el control del vehículo
<b>Honda</b>	Lane Keep Assist System	Provee 80% del torque en dirección asistida para guiar el vehículo de vuelta al carril.	Altamente invasivo, el sistema tiene un alto nivel de control sobre el vehículo.
<b>Kia</b>	Lane Departure Warning	Suena una alarma y usa retroalimentación visual para dirigir al conductor de regreso al carril.	Bajo nivel, el conductor aún mantiene completamente el control del vehículo
<b>Mercedes</b>	Lane Keeping Assist	El volante vibra para simular una franja preventiva, notificando al conductor un cambio involuntario de carril.	Moderadamente invasivo pero el conductor aún tiene un control total.
<b>Nissan</b>	Lane Keeping Support	El sistema emite una alarma de alerta cuando un cambio de carril involuntario es detectado.	Bajo nivel, el conductor aún mantiene completamente el control del vehículo
<b>Toyota</b>	Lane Monitoring System	Provee menor momento de giro para guiar al vehículo de vuelta al carril.	Altamente invasivo, el sistema tiene alto nivel de control sobre el vehículo.



## 2.6. Sistema autónomo de asistencia al aparcamiento.

Los sistemas autónomos de asistencia al aparcamiento se empezaron a desarrollar en la década de 1990 y la producción en masa comenzó en el 2003 con Toyota Prius, posteriormente empresas como BMW, Mercedes y Ford lo empezaron a implementar a finales de la década del 2000. El sistema comúnmente ocupa un arreglo de radares alrededor del vehículo para encontrar lugares donde estacionarse de manera paralela, perpendicular o diagonal, el sistema tomará el control del sistema de dirección asistida para dirigir al vehículo hacia el lugar vacío mientras que el conductor controla el acelerador y el freno. La dirección será dada por la palanca de cambios mediante el usuario por medio de una interfaz humano-máquina (HMI) [6][7][35][36].

En la Figura 2-7 se muestra la dirección en el cual el automóvil se estacionará y mediante la ayuda de sensores. Detecta la proximidad de los vehículos a su alrededor. Mientras tanto, el conductor no toca el volante y solo le proporciona al vehículo la velocidad con la que efectuará los movimientos.

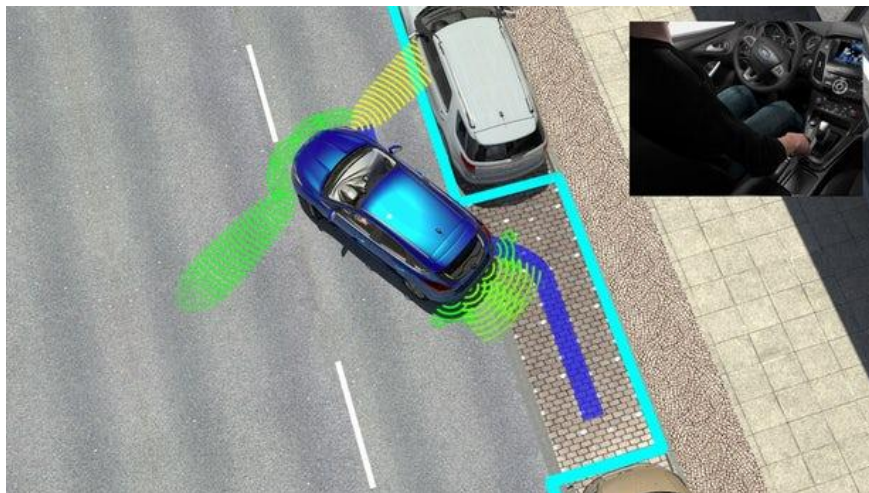


Figura 2-7. Sistema autónomo de asistencia al aparcamiento [37].

El sistema actualmente es controlado por medio de microcontroladores y la entrada de datos de la posición del vehículo se manda desde los sensores de radar hacia el CAN. El desarrollo de estas tecnologías va encaminado hacia el

uso de la red inalámbrica donde por medio del GPS se pueda comunicar con un sistema de administración de estacionamiento [7].

## **2.7. Sistema de detección de somnolencia**

Actualmente, el sistema de detección de somnolencia se basa en el seguimiento de patrones del conductor ya sea con la cabeza del conductor o el de sus ojos, si el sistema detecta somnolencia con la información de los patrones alertará al conductor por diversos medios para despertarlo y reducir el riesgo de un accidente automovilístico, ya que gran parte de los accidentes automovilísticos suceden por este motivo [6][7][38][39].

El sistema fue desarrollado primeramente en Lexus de la empresa Toyota en el 2006 haciendo uso de una cámara con CCD colocándola en la columna de dirección para detectar los movimientos oculares del conductor mediante LED's infrarrojos. Posteriormente, Mercedes hizo inclusión en sus equipos del Attention Assist en 2009 y Ford con Driver Alert en 2010 [7].

En la Tabla 2-3 se presenta el funcionamiento y respuesta de los sistemas de detección de somnolencia de diferentes ensambladoras en donde cabe recalcar que el sistema Toyota / Lexus es el más invasivo, ya que el conductor puede tener problemas al momento de querer tener el control del vehículo, debido a esto se tiene una preferencia en la retroalimentación visual/audible en donde el conductor puede reaccionar sin interferir el sistema con el control del automóvil [7].

Tabla 2-3. Funcionamiento y respuesta del Sistema de Detección de Somnolencia [7].

<b>OEM</b>	<b>Nombre del sistema</b>	<b>Funcionamiento del sistema</b>	<b>Respuesta del sistema de detección de somnolencia</b>
<b>Toyota</b>	Driver Attention Monitor	Usa sensores LED para monitorear los movimientos oculares y detecta la atención del conductor.	El sistema ocupa alarmas audibles y visuales. En caso de no aplicar alguna corrección el sistema realiza un frenado y hará sonar otra alarma.
<b>Ford</b>	Driver Alert	Usa cámara y sensores de radar montados en el automóvil para detectar movimientos erráticos del vehículo.	Al detectar una falla de atención del conductor, el sistema utilizará una advertencia audible y visual para alertar al conductor.
<b>Volkswagen</b>	Driver Alert Control	Rastrea los movimientos oculares del conductor.	Utiliza una advertencia visual y sonora para alertar al conductor.
<b>Mercedes</b>	Attention Assist	Usa los datos obtenidos por el sensor del volante, frenado, aceleración y la hora del día, para detectar el estado del conductor.	Utiliza advertencias visuales y audibles.
<b>Volvo</b>	Driver Alert Control	Utiliza datos de los sensores del vehículo para determinar el estado del conductor.	Utiliza alarmas visuales y audibles.

Este tipo de sistemas está enfocado a largo plazo en detectar todos los movimientos faciales, así como las señales biomédicas del cerebro para determinar el estado del conductor [7]. En la Figura 2-8 se muestra los iconos que aparecerán en la pantalla del sistema de detección de somnolencia.

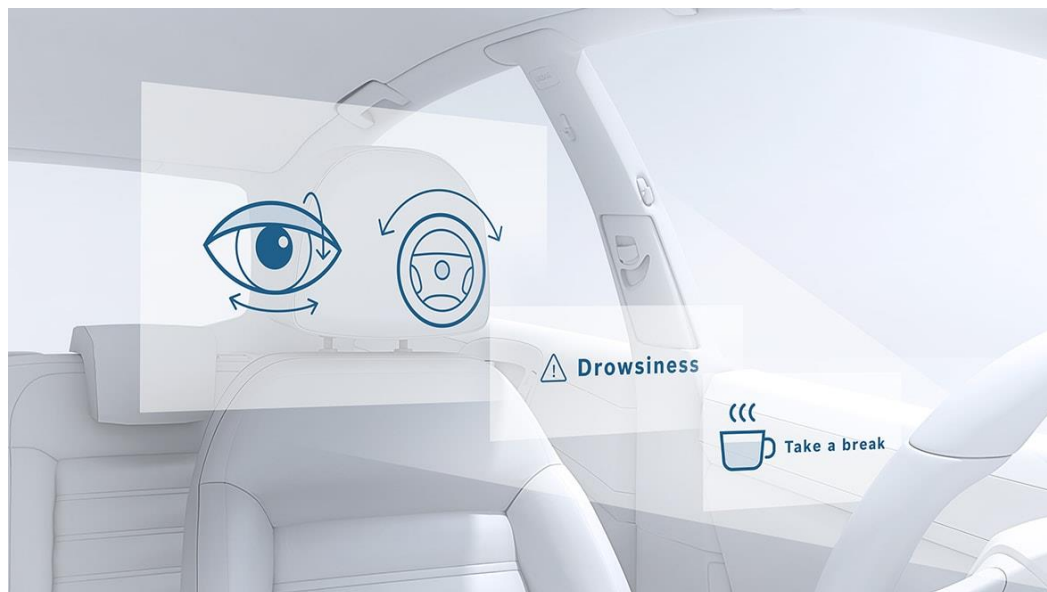


Figura 2-8. Sistema de detección de somnolencia <sup>[40]</sup>.

## 2.8. Calibración de parabrisas con dispositivos ADAS

La estandarización internacional de la fabricación de los parabrisas con vidrio laminado ha logrado dos cosas <sup>[41]</sup>:

1. Mejorar la integridad estructural del carro.
2. Aumentar la seguridad de los pasajeros de manera considerable.

La protección que proporciona el parabrisas al conductor se debe a la rigidez de los parabrisas, fortaleciendo el marco del vehículo, y evitando la deformación del techo en caso de una volcadura. Además, un uso importante es la aplicación que tiene el parabrisas con las bolsas de aire, permitiendo la apropiada implementación hacia el pasajero; la función de la bolsa del aire para el pasajero es dispararse de manera vertical hacia el parabrisas rebotando hacia el pasajero para amortiguar los golpes. También de esta manera se evita que el pasajero sea eyectado del vehículo. El funcionamiento de la bolsa de aire con el conductor es desplegarse del volante en dirección a él/ella <sup>[41]</sup>.

El impacto en reclamos de visión computacional es considerable, actualmente del 2.5 al 5% de reclamos en parabrisas requiere alguna calibración, basado en un 12 a 14% de vehículos equipados con ADAS. La industria debe de realizar

cambios y nuevas investigaciones para estar preparados en un aumento de este porcentaje, debido a la popularización de estos dispositivos en los vehículos. Teniendo sus inicios en las marcas de lujo, es solo cuestión de tiempo para que estén en todos los vehículos ya que pueden ayudar a los conductores a estacionarse, cambiarse de carril de forma segura y con cierta velocidad adaptiva, detectar objetos en los puntos ciegos y ocupar el freno de emergencia cuando sea requerido <sup>[10][12]</sup>.

Algunos consejos en el reemplazo de parabrisas con sistemas ADAS son el de mantener un historial de las características de los vehículos, estar consciente de un aumento en el tiempo y dinero necesario para repararlo, conocer las especificaciones del fabricante de parabrisas original y revisar quien está autorizado por parte del fabricante para realizar el reemplazo <sup>[9]</sup>.

En la Figura 2-9 se presenta la calibración de los parabrisas con dispositivos ADAS usando Bosch DAS 1000, se puede notar como la cámara está siendo calibrada junto con todos los componentes del automóvil en conjunto.



Figura 2-9. Calibración de Bosch DAS 1000 <sup>[42]</sup>.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESARROLLO DE CELDAS DE PEGADO ADAS**

---

#### **3.1. Soportes ADAS**

Los soportes ADAS ocupados son de diferentes materiales, tamaños y formas. Estas diferencias entre ellos dependen del modelo que se requiere ensamblar y del proveedor que los suministra. En el mercado original se realiza el pegado de los soportes ADAS en los parabrisas por medio de robots industriales que llevan consigo un sistema de iluminación y visión. Los robots industriales cuentan con una agarradera y una mesa rotatoria especializada por cada soporte ADAS.

En el mercado de repuesto, actualmente se tiene un sistema de pegado manual en el cual el operador hace el uso de plantillas y mediante una marca en el parabrisas se coloca la plantilla en el lugar correspondiente, en este punto, el operador realiza el pegado del soporte ADAS en el parabrisas.

#### **3.2. Celda de pegado A**

En marzo de 2019 se comenzó en Vitro Flex el diseño de la celda de pegado A siendo una celda robótica para el pegado de tres piezas de manera consecutiva, teniendo dos soportes ADAS diferentes, la celda de pegado A es parcialmente manual debido a que el operador debe de introducir el parabrisas al interior de la celda. Al momento en que el parabrisas se posiciona en las ruedas locas (balls transfers) se comenzará con el centrado del vidrio dada las especificaciones del fabricante. El sistema de centrado consta de cilindros de Nylamid con una posición fija, así como de cilindros con actuadores neumáticos

con guía para llevar al vidrio a la posición deseada para el pegado de los soportes ADAS.

Con el correcto centrado del vidrio comenzará un calentamiento en las zonas de interés para el pegado de los soportes ADAS en el parabrisas, de igual forma se empezará a calentar el adhesivo en forma de perlas ubicado en la mesa entre los robots ABB.

La programación dada a los robots consiste en hacer una rutina donde se realizará el pegado de uno de los soportes ADAS en uno de los extremos laterales del vidrio, y antes de ir por la otra pieza que falta en el otro extremo, el segundo robot hará el pegado del extremo inferior del vidrio con el otro tipo de soporte ADAS disponible, por último, se realizará el pegado del soporte ADAS faltante en el extremo lateral del vidrio dando fin al ciclo de programado. Los pasos para realizar el pegado en cada robot es ir primero por el soporte ADAS necesario para la posición designada, luego llevarlo a donde están ubicadas las perlas de adhesión y, por último, llevarlo a la posición deseada. Los robots se pueden visualizar en la Figura 3-1.

Cada robot ABB tiene una herramienta específica para tomar el soporte ADAS correspondiente, esto debido a que es necesario realizar un buen agarre con el soporte ADAS sin hacer daño alguno al vidrio o al componente.

El reemplazo de los soportes ADAS, así como las perlas adhesivas es mediante una mesa con movimiento longitudinal, el operador debe de jalar la agarradera de uno de los extremos, hacer el reemplazo y por último regresarlo a su posición.

La seguridad con la que debe de contar la celda es el cercado, que se puede visualizar en las Figuras 3-1. Además, se cuenta con una cortina de luz para destinar un tiempo muerto a los robots en caso de alguna intrusión de algún objeto extraño o persona en el área de trabajo. El cercado tiene una puerta de emergencia manual en caso de un mal funcionamiento de los robots ABB.

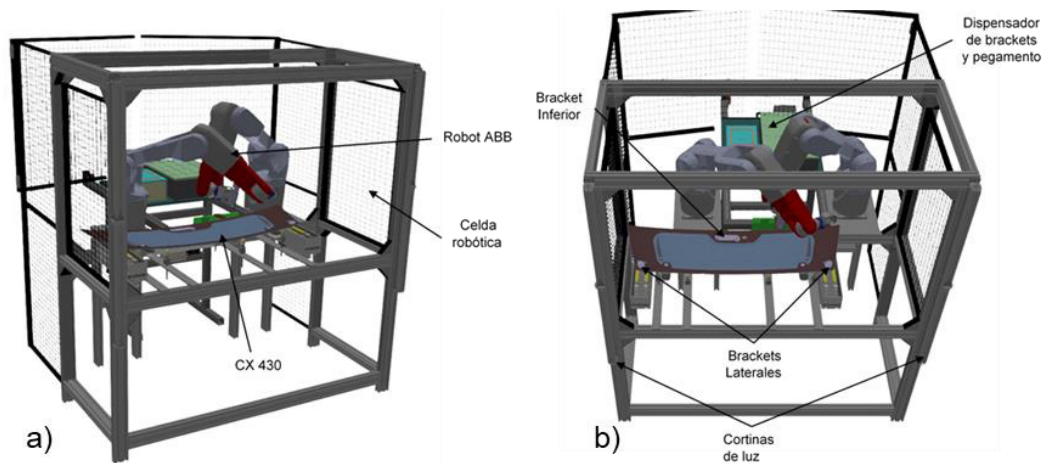


Figura 3-1. Vista a) isométrica y b) superior de la celda de pegado A.

### 3.3. Celda de pegado B

En enero de 2019 se trabajó con un modelo CAD de la celda de pegado B, para realizarle mejoras y agregarle componentes de interés como pistones, ventosas, rieles, así como determinar el tamaño necesario del cercado para poder implementar los equipos que se muestran en la Figura 3-2. La celda de pegado B es un proceso automatizado en su totalidad exceptuando la carga de vidrio en el transportador. Los soportes ADAS se cargan en pares en una mesa rotatoria formando dos hileras circulares, la mesa rotatoria tiene la característica de ser reversible. La selección del modelo a ensamblar la debe de realizar el operador antes de introducir el parabrisas en la celda.

Al hacer la selección del modelo se debe de ajustar el sistema de centrado por medio de los husillos con el fin de validar los valores dados por la selección del modelo, dado el caso en que los valores no concuerden con el modelo, se dará una alarma del error por medio de la torreta y entrará en función el tiempo muerto. El sistema por usar en la validación del vidrio es poka-yoke teniendo una tolerancia de posición menor a  $\pm 100$  mm y de orientación de  $\pm 2^\circ$ . Cuando el modelo se haya seleccionado y validado, se deberá de hacer el ingreso del parabrisas en el transportador de doble banda recorriendo una cierta distancia hasta llegar al extremo opuesto, en este punto un dispositivo neumático compuesto de un cilindro sin vástago ensamblado a un cilindro con guía y



acoplado con una ventosa en el vástago, es el encargado de elevar el vidrio por encima de la altura de las bandas y transportarlo a la posición de centrado y pegado del soporte ADAS.

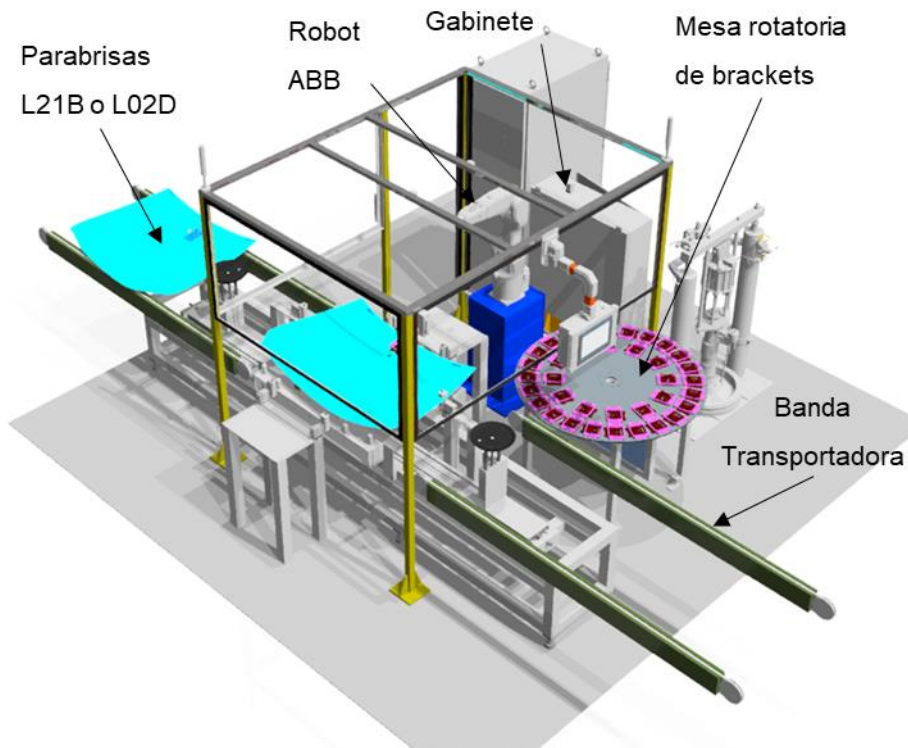


Figura 3-2. Vista Isométrica de los componentes en la celda de pegado B.

Los soportes ADAS son verificados por una cámara ubicada en la charola de alimentación, el soporte ADAS debe estar bien posicionado y correspondiente a la selección del modelo, en caso contrario la charola girará una posición, y repetirá la validación, si la validación de tres piezas consecutivas es errónea, se reportará el detalle del error y se activará el temporizador de tiempo muerto.

Al momento de llegar a la posición de centrado, el dispositivo neumático deja el parabrisas en las ruedas locas de Nylon para posteriormente hacer el centrado a una altura fija con seis cilindros de Nylamid con rodamientos, los cilindros de Nylamid estarán acoplados al vástago de cilindros neumáticos guiados, la ubicación de los rodillos de Nylamid sería de dos en el canto largo, dos en el canto corto, y uno en cada extremo longitudinal. Después del centrado del

parabrisas, cuatro ventosas ubicadas al contorno de la lámpara de retroiluminación suben para sujetar el vidrio y darle soporte durante el pegado.

El sistema de visión es la parte crítica del proceso de pegado, esto al momento de realizar el pegado del soporte ADAS en el parabrisas. Ese sistema debe de asegurar la precisión y exactitud del pegado, para lograrlo debe de identificar la pintura cerámica en forma de trapecoide en ambos modelos de vidrio, el centrador se encargar de ubicar la forma del trapecoide en la misma posición en ambos modelos, de modo que la lámpara ubicada debajo del vidrio genere un mayor contraste contra la pintura del vidrio. Adicionalmente, se cuenta con un offset en las coordenadas XY, y en el ángulo, estos datos son mandados desde la pantalla. El sistema de visión toma dos fotos siendo la primera para asegurar el error de ubicación del trapecoide teniendo que ser menor a  $\pm 0.3$  mm, la segunda foto es al momento de realizar el pegado del soporte ADAS, el sistema usa una luz roja para asegurar el error de pegado, teniendo que ser menor a  $\pm 0.5$  mm. El robot debe de estar optimizado en cuestiones de alcance y debe de evitar la singularidad, las agarraderas a utilizar deben de sujetar correctamente el soporte ADAS sin dañar al parabrisas o a los componentes de la celda.

En caso de realizar algún cambio en la selección del modelo a ensamblar se debe de realizar en modo manual, pues si se intenta realizar un cambio cuando el sistema está en automático, entonces el sistema mandará un error.

# CAPÍTULO 4

## METODOLOGÍA DE DISEÑO

---

### 4.1. ¿Qué es el diseño?

Diseñar es la aplicación de un proceso de concepción, invención, visualización, calculo, refinamiento y especificación de detalles para determinar la forma de producto que pueda satisfacer una necesidad específica o resolver un problema. En caso de ser un producto físicamente real, se debe de contemplar un conjunto de dibujos y/o representaciones en computadora, asegurando su funcionalidad, seguridad, confiabilidad, competitividad, utilidad, siendo capaz de fabricarse y comercializarse [43][44][45].

El diseño emplea en su proceso la innovación y la comunicación, siendo esto último la clave del éxito ya que mediante la información proporcionada por el cliente, el diseñador debe emplear el uso de diversas herramientas ya sea visuales y/o audibles, para trabajar con personas de diferentes áreas de manera eficaz en el proceso del diseño, teniendo en cuenta que puede haber ajustes por parte del cliente en el trascurso [44].

### 4.2. Pasos para el diseño

El diseño comienza con la etapa de identificación o asimilación de una necesidad, para esto se debe de acumular y organizar de la información general y específica relacionado con el problema a solucionar. La necesidad también puede ser definida como una reingeniería de un producto existente [43][44][45][46].

En la etapa de definición del problema, se especifica el producto o proceso a diseñar. Las especificaciones que deben tener el producto o proceso definen algunos aspectos importantes como el costo, la cantidad a manufacturar, la vida

esperada, la temperatura de operación y la confiabilidad. De igual manera hay especificaciones implicadas que son propias del problema en sí o del entorno del diseñador, siendo restricciones que se deben de tomar en cuenta al momento de realizar el diseño, ejemplos serían los procesos de manufactura disponibles, junto con las instalaciones de una cierta planta, las habilidades de trabajo disponibles y la situación competitiva, materiales y tamaños incluidos en los catálogos de los proveedores. Otra manera de visualizarlo sería mediante una caja negra en el cual se pondrán todas las entradas, salidas, características, dimensiones del espacio que el objeto debe de ocupar y las limitaciones sobre estas cantidades. Se deben de hacer bosquejos de las posibles soluciones junto con sus razones y justificaciones, del cual se seleccionarán los mejores y en las etapas siguientes puede haber mejoras al diseño original o un cambio total en el concepto del diseño [43][44][45][46].

La síntesis es una etapa en la cual las ideas o bosquejos iniciales se empiezan a desarrollar ofreciendo una solución potencial para el requerimiento del diseño. El primer paso se llama invención del concepto o diseño del concepto y consiste en conectar los elementos implicados en el sistema. Los bosquejos realizados en la identificación del problema se empiezan a proponer, se investigan y cuantifican de una manera más detallada [43][44][45][46].

El análisis como la optimización requieren de la construcción de modelos abstractos del sistema que sean comprensibles tanto para el diseñador como para otros ingenieros que revisen el proceso. Para el análisis se debe de incluir uno o varios modelos matemáticos, si el modelo matemático simula muy bien al sistema físico real, entonces el desempeño del producto o proceso a efectuar, debe de ser tan siquiera satisfactorio. Tras el análisis se decidirá si se debe de mejorar el diseño o simplemente desecharlo. Los que cuenten con potencial se optimizan y se determina nuevamente su desempeño [43][44][45][46].

La evaluación es una fase significativa del diseño total. La evaluación representa la prueba final de un diseño, implicando por lo general la prueba del prototipo en el laboratorio. Aquí se desea descubrir si el diseño en verdad

satisface la necesidad o las necesidades. Si son varios los prototipos a evaluar solo se comparan los mejores diseños y se elige el más competente [43][44][45][46].

La comunicación de los resultados es el paso final y vital de presentación del proceso de diseño. La presentación es un trabajo de venta. Cuando el ingeniero presenta una nueva solución al personal administrativo, gerencial o de supervisión, está tratando de vender o de probarles que la solución que él propone es la mejor. La solución debe ser aceptada por el cliente, en caso de que no sea exitoso, el tiempo y el esfuerzo empleado de obtener la solución en gran parte se habrán desperdiciado, por lo que se debe replantear la necesidad del cliente. En caso de ser aceptada, se procede con la documentación del diseño del producto o proceso mediante los diseños detallados de ingeniería, especificaciones del material y de manufactura, en sí todo lo que se realizó a lo largo del proceso de diseño. En la Figura 4-1 se puede apreciar las fases del proceso de diseño [43][44][45][46].

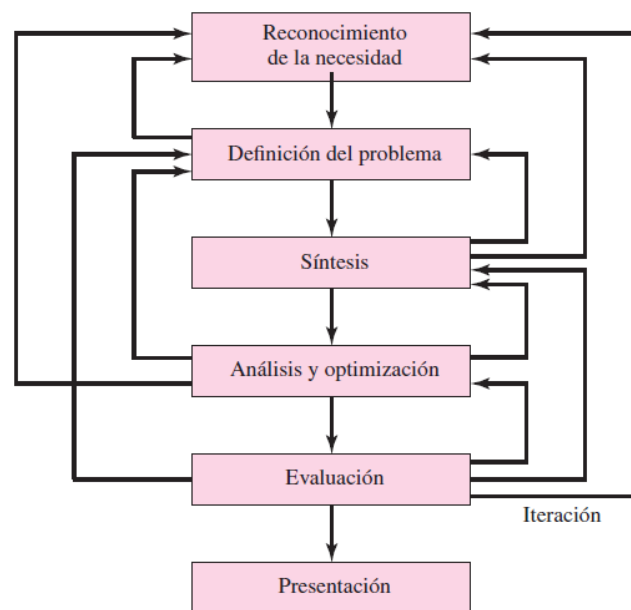


Figura 4-1. Fases del proceso de diseño [45].

El diseño es un proceso iterativo de varios pasos, por lo general en la primera prueba durante la evaluación de resultados pueden surgir fallas en el diseño o que los materiales no resisten los niveles de esfuerzo a los que se someterán,

esto puede demostrar la falta de información relevante que se tiene de la necesidad a satisfacer. Por lo tanto, las pruebas conforman el procedimiento iterativo, siendo posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizar y optimizarlos, y regresar a la síntesis para ver qué efectos tiene sobre las partes restantes del sistema, esto demuestra que las fases no necesariamente deben de tener un orden. En los diseños sucede con frecuencia que los elementos o componentes de un producto no son independientes e incluso pueden ser componentes móviles, es necesario conocer las especificaciones de estos componentes para determinar las fuerzas que actuarán sobre el sistema [43][44][45][46].

### **4.3. Consideraciones**

En algunos diseños para determinar la geometría y las dimensiones dependen de ciertas consideraciones como la resistencia del elemento. Al emplearse la expresión consideración de diseño se involucra de manera directa alguna característica que influye en el diseño del elemento, o tal vez en todo el sistema. Entre las características más importantes están [44][45]:

- Funcionalidad.
- Resistencia/ esfuerzo.
- Distorsión/ deflexión/ rigidez.
- Desgaste.
- Corrosión.
- Seguridad.
- Propiedades térmicas.
- Comercialización.
- Responsabilidad legal.
- Confiabilidad.
- Manufacturabilidad.
- Utilidad.
- Costo.
- Fricción.
- Peso.
- Superficie.
- Mantenimiento.
- Capacidad de reciclado/ recuperación de recursos.
- Vida.
- Ruido.
- Estilo.
- Forma.
- Tamaño.
- Control.
- Lubricación.
- Volumen.

#### 4.4. Diseño e ingeniería asistidos por computadora

En la actualidad las computadoras han causado una revolución en el diseño y en el análisis de la ingeniería. Anteriormente, se ocupaban tediosos métodos gráficos de solución, pero ahora mediante una microcomputadora de bajo costo se pueden hacer en cuestión de minutos métodos que efectúan varias iteraciones de operaciones largas y complejas. Además, se pueden realizar varias pruebas e investigar el efecto de los parámetros dados por el ingeniero. Algunas fuentes de información técnica pueden ser desde libros de ciencia e ingeniería hasta folletos o catálogos de fabricantes [43][44][45].

De igual manera los bosquejos antes realizados a mano como en la Figura 4-2, en las primeras etapas del proceso de diseño han sido sustituidos en su mayoría con dibujos realizados a computadora con el software para el diseño asistido por computadora (CAD).

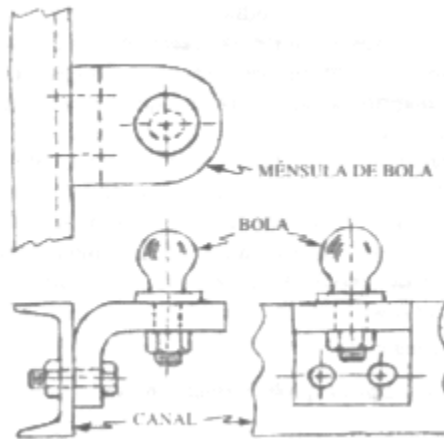
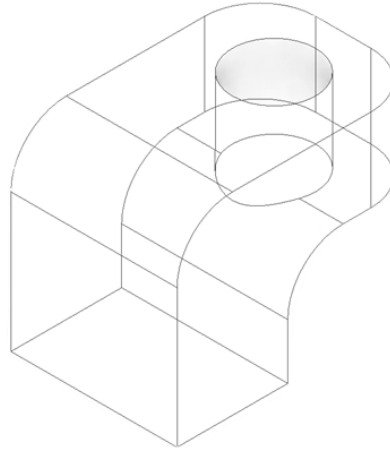


Figura 4-2. Ejemplo de bosquejo a mano alzada [44].

Los primeros paquetes CAD eran herramientas que permitían la elaboración de dibujos en varias vistas con el único inconveniente de que solo se podían realizar representaciones alámbricas como en la Figura 4-3. Los datos almacenados correspondían estrictamente a representaciones bidimensionales de proyecciones ortogonales de la geometría tridimensional de la pieza [44][45].



*Figura 4-3. Representación alámbrica tridimensional [44].*

Las versiones actuales del software CAD permiten que la geometría de las piezas se codifique como modelos sólidos en una base de datos para tres dimensiones. En un modelo sólido se definen los contornos y las caras de la pieza. De esta información tridimensional (3D) es posible generar automáticamente vistas ortogonales bidimensionales (2D), la trayectoria de las herramientas e incluso la generación de partes mediante un método para la creación rápida de prototipos y manufactura (estereolitografía), permitiendo la producción de piezas sin el uso de dibujos en papel. La ventaja más importante de una base de datos de tres dimensiones es la realización de cálculos rápidos y exactos de ciertas propiedades como la masa, la localización del centro de gravedad, los momentos de inercia de la masa, áreas, volumen y distancias entre puntos [44][45]. La determinación de esta información en un modelo 2D debe efectuarse mediante un software externo al software CAD, llegando a ser algo molesto por el usuario y sería aproximada en caso de que la geometría sea muy compleja. Mientras que en una base de datos de tres dimensiones el cálculo es inmediato incluso para piezas complejas [44]. En la Figura 4-4 se da un ejemplo de un modelo sólido junto con sus propiedades.



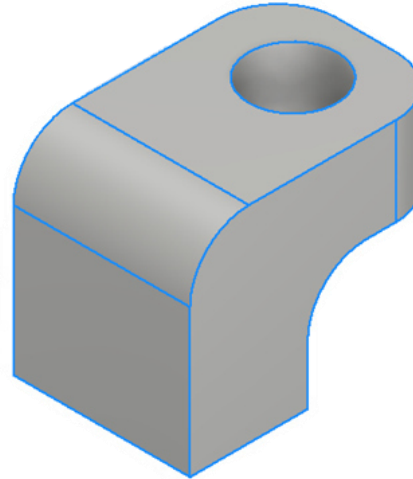
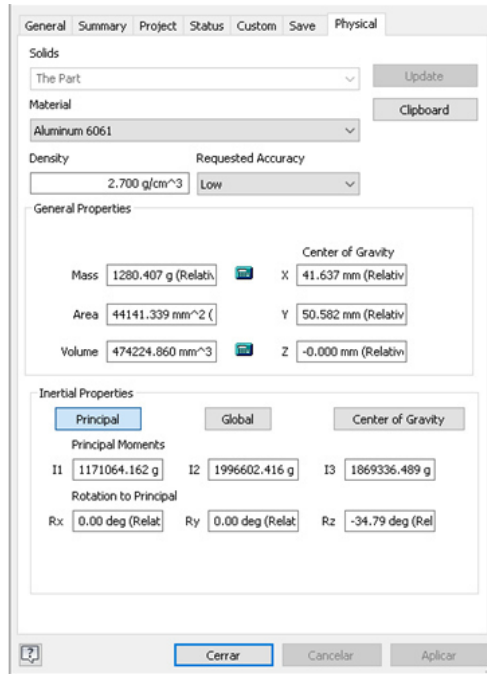


Figura 4-4. Representación de un modelo sólido con sus propiedades [44].

Los sistemas de modelado sólido proporcionan una interfaz con uno o más programas de Análisis de Elemento Finito (FEA), permitiendo la transferencia directa de la geometría del modelado para análisis de esfuerzo, vibraciones y transferencia de calor. Algunos sistemas CAD contienen una herramienta de creación de mallas, que genera automáticamente la malla FEA antes de enviar datos al programa de análisis de elemento finito [44].

La combinación de un software CAD con un FEA permite hacer diseños superiores cuando se trata de geometrías muy complejas, donde los esfuerzos realizados se conocen con mayor exactitud a diferencia de los métodos convencionales. Al estar la mayoría del proceso de diseño computarizado se debe de saber cuándo los resultados mostrados por el software pueden ser erróneos, en caso contrario el diseño no sería el adecuado provocando una posible falla y arriesgando la seguridad de las personas [44].

El término ingeniería asistida por computadora (CAE) se aplica a todas las aplicaciones de ingeniería relacionadas con la computadora, siendo el software CAD un subconjunto del CAE. El software CAE tiene dos categorías: basado en

ingeniería y no específico para ingeniería. El primero se basa en análisis de fuerzas, esfuerzos, deflexiones y otros aspectos del comportamiento físico del diseño, con o sin aspectos de geometría de los sólidos. El segundo entra en juego las hojas de cálculo como Excel, Lotus y Quattro-Pro, procesamiento de palabras y solucionadores matemáticos como MATLAB, MathCad yTKSolver <sup>[44][45]</sup>.

Los programas CAE permiten la aplicación de restricciones al diseño para controlar la geometría de la pieza conforme se van modificando los parámetros de diseño <sup>[44]</sup>.

Algunos programas CAE de elemento finito para ingeniería mecánica son ALGOR, ANSYS, Abaqus e Inventor, para dinámica de fluidos computacional están CFD++, FIDAP y Fluent, y programas para la simulación de fuerzas dinámicas y movimiento de mecanismos están Inventor, ADAMS, DADS y Working Model. En cuestión a programas CAD hay una gran variedad como AutoCAD, Inventor, Solid Works, CATIA, CadKey y ProEngineer <sup>[44]</sup>.

El proceso de pensamiento humano debe de estar presente en todo el proceso. Se debe de tener una comprensión de los fundamentos de ingeniería, ya que llega a pasar que los resultados generados por la computadora pueden llegar a ser muy lejanos de la realidad debido a una entrada de datos incorrectos o una mala interpretación de la aplicación. Es responsabilidad del diseñador asegurar la validez de los resultados, se debe de verificar que el software funcione correctamente, una forma de hacerlo es mediante una prueba con resultados conocidos y realizando una réplica en el software <sup>[44][45]</sup>.

#### **4.5. Adquisición de información técnica**

Algunas fuentes de información son <sup>[45]</sup>:

- Bibliotecas. Diccionarios y enciclopedias de ingeniería, libros de texto, monografías, manuales, servicios de índices y extractos, revistas, traducciones, informes técnicos, patentes y fuentes/folletos/catálogos de negocios.

- Fuentes gubernamentales. Departamentos de defensa, comercio, energía y transporte; NASA; Oficina editorial de gobierno; Oficina de patentes y marcas registradas; Servicio de información técnica nacional; Instituto nacional para normas y tecnología.
- Sociedades profesionales. Sociedad norteamericana de ingenieros mecánicos. Sociedad de ingenieros en manufactura. Sociedad de ingenieros automotrices. Sociedad norteamericana de pruebas y materiales, y la Sociedad norteamericana de soldadura.
- Vendedores comerciales. Catálogos, literatura técnica, datos de prueba, muestras e información de costos.
- Internet. La puerta de entrada a la red de computadoras con sitios asociados con la mayoría de las categorías mencionadas anteriormente.

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO (FEA)

---

### 5.1. ¿Qué es FEA?

El método de elemento finito (FEA) por sus siglas en inglés se basa en la discretización de la pieza de interés y hacer uso de ecuaciones diferenciales con condiciones de frontera y condiciones iniciales provenientes de un modelo matemático para llegar a explicar el comportamiento de la geometría sólida expuesta ante un agente externo, representándose en la Figura 5-1. La información dada será aproximada y puede ser usado por el equipo de diseño para asegurar un correcto funcionamiento <sup>[45][47][48]</sup>.

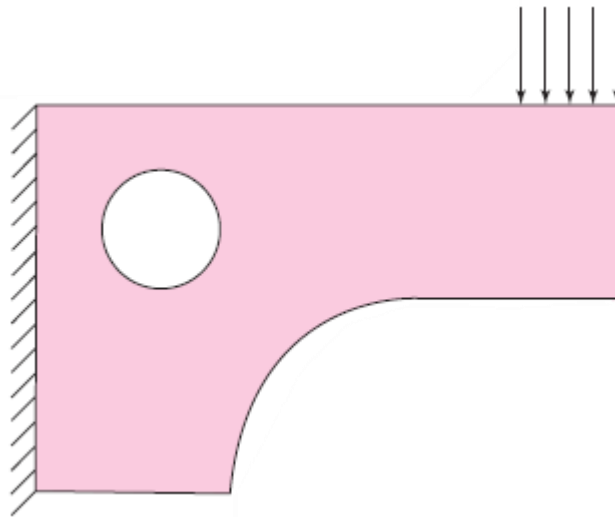


Figura 5-1. Representación de un sistema con fuerzas externas y condiciones frontera <sup>[45]</sup>.

La discretización es la separación de la geometría sólida en varios elementos, el comportamiento de cada elemento dependerá del material y tipo de geometría. Los elementos se dividen en entidades fundamentales llamados nodos, cada nodo tiene tres grados de libertad rotacional y traslacional. Para llegar a tener un

valor cercano a la realidad, dependiendo de la figura, se aumenta el número de elementos, la representación de la discretización se encuentra en la Figura 5-2 [45][47][48].

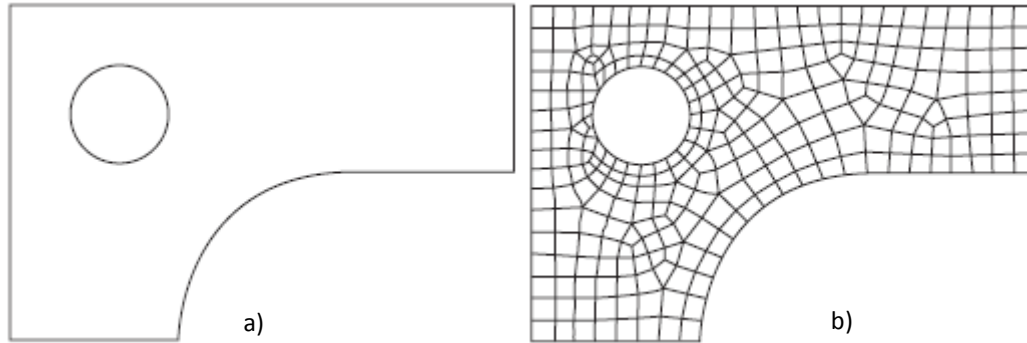


Figura 5-2. a) Geometría ideal sin discretizar b) discretización en nodos y elementos seleccionados [45].

El análisis de elemento finito debe de cumplir ciertos requerimientos [47]:

- Transformar el sistema real en un modelo matemático.
- El modelo matemático debe de interpretarse de tal manera que la computadora pueda ser capaz de dar una solución.
- Los datos salientes deben de describir el comportamiento de la estructura en el mundo real.

El método de elemento finito es usado para problemas ingenieriles como análisis de esfuerzos, térmicos, flujo de fluidos, eléctricos, entre otros [47][48].

## 5.2. Representaciones del sistema a estudiar

La estructura a estudiar se puede presentar de diversas maneras en el análisis de elementos finitos, las formas de representarlo son [47]:

- Representación real de la estructura: Es la representación del sistema real, aunque no exista físicamente, se modela como estará la estructura en servicio, la forma en la que se le aplicarán las cargas, los tipos de soporte, así como la forma en la que debe responder al entorno.
- Representación reducida de la estructura: La representación reducida o abstracta se caracteriza por el uso de diferentes parámetros como cargas

que no precisamente deben ser las usadas en la estructura o cambios en la forma estructural. Esta representación surge por los requisitos a cumplir en la estructura. Un ejemplo de ello es el factor de seguridad.

- Representación ideal de la estructura: La estructura real debe ser planteada de tal manera que se le pueda realizar un análisis de elemento finito, se deben hacer limitaciones en cuestión ciertos aspectos como soldaduras, remaches, juntas unidas, entre otros aspectos para facilitar la representación en el análisis. Además, se deben de plantear las condiciones fronteras, situaciones de carga, y zonas de interés en donde se realizará la aplicación. Esta representación es crítica debido a que lo realizado en el análisis de elemento finito será una respuesta al comportamiento que tendrá la estructura.

### **5.3. Proceso general para el análisis de elemento finito**

La descripción general del proceso de análisis de elemento finito es el siguiente <sup>[47][48][49]</sup>:

- Discretización del continuo: Proceso en el cual el continuo o cuerpo físico es subdividido por un número, tamaño y arreglo de elementos finitos que darán una representación efectiva del comportamiento del sólido. Los elementos finitos de dos dimensiones usan triángulos o cuadriláteros mientras que en los de tres dimensiones son tetraedros, prismas rectangulares o hexaedros.
- Selección de modelos de desplazamiento: Generalmente no es posible representar la variación exacta del desplazamiento real en el elemento, por lo que solo es una aproximación. Los factores en la selección de un modelo de desplazamiento son: la elección del tipo y grados de desplazamiento del modelo, las magnitudes particulares de desplazamiento y la precisión del modelo.
- Derivación de los elementos de la matriz de rigidez usando el principio variacional: La matriz de rigidez de un elemento depende del modelo de

desplazamiento, la geometría y las propiedades del material. En el caso de un cuerpo elástico isotrópico el módulo de Young y el coeficiente de Poisson definen las propiedades del material. Si el modelo es un ensamble se puede tener una no homogeneidad debido a las diferentes propiedades de material asignadas a cada elemento.

Los elementos de la matriz de rigidez son los coeficientes de influencia entre las fuerzas aplicadas de los puntos nodales y los desplazamientos. Esta relación es expresada como un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales simultáneas.

- Montaje de las ecuaciones algebraicas para el discretizado general continuo: Las bases para un método de montaje es que las interconexiones nodales requieren los desplazamientos en un nodo para ser el mismo en todos los nodos adyacentes. Las relaciones entre la matriz global de rigidez, el vector global de carga y vector de desplazamiento global serán representadas como un conjunto de ecuaciones simultáneas que serán resueltas hasta que las condiciones fronteras sean tomadas en cuenta.
- Soluciones para los desplazamientos desconocidos: Las ecuaciones algebraicas ensambladas o montadas son resueltas para desplazamientos desconocidos. Para los problemas no lineales la solución es obtenida por métodos iterativos.
- Cálculo de deformación y esfuerzos debido al desplazamiento nodal: Las deformaciones y esfuerzos son proporcionales a los desplazamientos nodales, los cuales deben ser calculadas. El signo negativo en los esfuerzos implica una compresión.

Estos resultados al final son analizados para explicar el comportamiento de la estructura.

#### **5.4. Generación de malla**

El método de elemento finito ocupa el mallado en las estructuras a estudiar, siendo el mallado una red de elementos y nodos que resultan al momento de

discretizar la figura de interés, el cual tendrá una cierta densidad de malla que dependerá del aumento o disminución de los elementos colocados en una región dada <sup>[45][48]</sup>.

Al aplicar una malla a una estructura o pieza se busca una convergencia en los resultados por lo que pueden llegar a ser exacto o aproximado al valor real mediante un refinamiento de malla, el refinamiento ocurre cuando se cambia el tamaño de malla a valores más pequeños para tener mayor número de elementos y nodos. Los resultados notan una mejoría al momento de incrementar la densidad de malla en áreas de gradientes de esfuerzo alto y cuando las zonas de transición geométrica se mullan de manera uniforme, al momento de notar que los resultados tienen una variación mínima al momento de hacer el cambio a una densidad de malla mayor se llegará a la convergencia <sup>[45]</sup>.

Existen tres formas básicas para generar una malla de elementos <sup>[45]</sup>:

- Generación manual de mallas: En los inicios del método de elemento finito, esta era la forma común de realizar el mallado, el cual era un método intensivo para el usuario al momento de crear la malla. Actualmente no se ocupa esta forma de mallado excepto cuando el usuario necesita realizar modificaciones rápidas en un modelo.
- Generación semiautomática de malla: La forma de mallado semiautomática es cuando el usuario hace divisiones en ciertas regiones de la estructura y el mallado se hará de manera automática en la zona seleccionada.
- Generación completa automatizada de mallas: Actualmente las empresas desarrolladoras de software han ocupado sus recursos para la generación automática de mallado en la pieza, en el cual algunos tienen un refinamiento para mallas automáticas autoadaptables, con el fin de reducir el tiempo de preprocesamiento por parte del usuario y tiempo de convergencia hacia el resultado final.



Actualmente algunos softwares CAE tienen el refinamiento automático autoadaptivo de mallas. Consiste en llegar a un error, la malla se revisará de manera automática hasta satisfacer alguna convergencia <sup>[45][48]</sup>.

### **5.5. Tipos de errores**

- Errores computacionales: Debido a que la computadora realiza los cálculos con punto flotante, surgen ciertos problemas en cuestión al redondeo de los números, en el cual los softwares comerciales de elemento finito buscan reducir este tipo de error <sup>[45]</sup>.
- Errores de conversión discreta: Este tipo de error tiene relación con la estructura a estudiar debido al número de elementos a usar para representar a la figura teniendo una estrecha relación con el tipo de mallado y con los desplazamientos de la figura al momento de realizar el análisis de elemento finito <sup>[45]</sup>.

### **5.6. Aplicación de carga**

La carga en una estructura se puede especificar de las siguientes dos formas <sup>[45][48]</sup>:

- Carga nodal: La fuerza o momento se puede aplicar en un solo nodo con la condición de que el elemento pueda soportar los grados de libertad de la fuerza o momento. Algo a tomar en cuenta es que al momento de efectuar el análisis los nodos aledaños tendrán esfuerzos elevados.
- Carga por elementos: La fuerza o momento se aplica a cierto elemento, al final serán distribuidos a nodos equivalentes.

Los momentos se pueden aplicar a nodos de vigas y la mayoría de los elementos tipo placa. Siendo lo contrario a elementos puntuales, planos elásticos bidimensionales y axiales simétricos, ya que no soportan grados de libertad rotacionales. Una forma de realizar este tipo de momentos es con fuerzas tipo par <sup>[45]</sup>.

Algunas de las cargas concentradas en los nodos pueden venir de elementos que incluyen cargas estáticas debido a la gravedad, efectos térmicos, cargas superficiales debido a la presión hidrostática uniforme y cargas dinámicas debido a la aceleración constante y rotación en estado estacionario. En cargas debido a la gravedad, la magnitud y la dirección son proporcionadas por el usuario, en el sistema inglés la gravedad tiene un valor de  $386.1 \text{ in/s}^2$  y en el sistema internacional es de  $9.81 \text{ m/s}^2$  y las cargas debido a efectos térmicos estarán regidos por el coeficiente de expansión térmica del material, temperatura inicial de la estructura y temperatura final [45].

### **5.7. Condiciones frontera**

El usuario debe de hacer uso de diferentes enfoques para modelar limitantes debido a que las condiciones fronteras, las uniones, soldaduras o separaciones, son una parte crítica al momento de realizar la simulación, estas limitantes deben ser simplificadas pero esenciales, para saber el comportamiento que tendrá el elemento ante las cargas expuestas. Un ejemplo serían las ecuaciones de restricción de punto múltiple y los elementos frontera, se emplean para modelar condiciones fronteras o conexiones rígidas entre miembros elásticos y para forzar desplazamientos específicos distintos de cero sobre una estructura o modelar condiciones frontera laterales al sistema coordinado global, respectivamente [45][48].

### **5.8. Teoría estudio estructural**

El enfoque directo deriva elementos y matrices globales de rigidez para desplazamientos de elementos finitos en análisis que envuelven estructuras sujetas a cargas estáticas, emplea el tradicional método matricial de análisis de estructuras. El enfoque directo ha sido usado por los precursores del método de elemento finito y es una ilustración muy efectiva del método, ya que sigue los pasos empleados por el código de computadora de elemento finito cuando resuelve un problema [47][48][49][50][51][52][53].

### 5.8.1. Elemento resorte

El resorte tiene una rigidez denotada por  $k$  y es sujeto a un conjunto de fuerzas  $f_1$  y  $f_2$  que dará origen a los desplazamientos finales  $u_1$  y  $u_2$  en los nodos 1 y 2 de la Figura 5-3. Aplicando la Ley de Hooke, la relación entre la fuerza  $f_1$  y el desplazamiento  $u_1$  y  $u_2$  es dada por <sup>[47][50][51][52][53]</sup>:

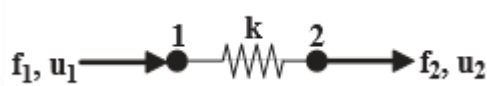


Figura 5-3. Elemento resorte <sup>[47]</sup>.

$$f_1 = ku_1 - ku_2 \quad \text{Ecuación 5.1}$$

$$f_2 = ku_2 - ku_1 \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Combinando estas ecuaciones en una matriz da <sup>[47][50][51][52][53]</sup>:

$$\{f\} = \{k\}\{u\} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Donde  $\{f\}$  es el vector de fuerzas nodales del elemento,  $\{k\}$  es la matriz de rigidez de los elementos y  $\{u\}$  es el vector de desplazamientos nodales o cantidades de conexión nodal <sup>[47]</sup>.

Incluso si este es el más simple elemento finito posible, ilustra algunos hechos importantes relacionados al método de elemento finito. Primero, la matriz de rigidez es singular y no puede ser invertida. Por lo tanto, los elementos de desplazamiento  $u_1$  y  $u_2$  no pueden ser derivados de las fuerzas aplicadas  $f_1$  y  $f_2$ . Esto significa que, en ausencia de fuerzas de inercia, el elemento es capaz de adaptarse al movimiento de cuerpo rígido sin generar ninguna fuerza interior en los elementos. Esto asegura que no se generan esfuerzos dentro del elemento si los elementos nodales están dando desplazamientos iguales:  $u_1 = u_2$ . Segundo, los elementos de la matriz de rigidez son simétricos. Finalmente, debe ser notado que las fuerzas y desplazamientos actúan alrededor de los nodos y son enlazados a cada uno a través de la matriz de rigidez. De esta forma la formulación de desplazamiento de elemento finito representa el comportamiento

de una estructura como un conjunto de desplazamientos nodales y fuerzas actuando alrededor de un conjunto de puntos discretos dentro del espacio de la figura [47][50][51][52][53].

Para este tipo de desplazamiento, toda fuerza y carga tiene que acomodarse alrededor de estos puntos discretos nodales. Asignando todo hacia los elementos nodales es una de las acciones clave que el analista o el software de elemento finito tiene que asumir para que el análisis sea representando por términos puntuales [47].

### 5.8.2. Ecuaciones para sólidos de tres dimensiones.

Considerando un objeto elástico de 3D con un volumen  $V$  y una superficie  $S$ , en éste, la superficie del sólido es subdividida en dos tipos de superficies: una superficie en la cual las fuerzas externas prescritas son denotadas  $S_F$ ; y otra superficie en el cual los desplazamientos descritos son denotados  $S_d$ . El sólido puede además ser cargado con fuerza volumétrica  $f_b$  y fuerza superficial  $f_s$  [50][51][52][53].

En cualquier punto dentro del sólido, los componentes de esfuerzo se indican en la superficie de un infinitamente pequeño volumen cúbico. En cada superficie habrá el componente de esfuerzo normal y dos componentes de esfuerzo cortante. La convención del signo para el subíndice es que la primera letra representa la superficie en la que el esfuerzo está actuando, y la segunda letra representa la dirección del esfuerzo [50][51][52][53].

Por lo tanto, hay en total seis componentes de esfuerzo en un punto en sólidos. Estos esfuerzos son a menudo llamados tensor de esfuerzos y son escritos en forma vectorial como [50][51][52][53]:

$$\sigma^T = \{\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{xz} \quad \sigma_{xy}\} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Correspondiente a los seis componentes de esfuerzo hay seis componentes de deformación en cualquier punto dentro de un sólido, estas deformaciones pueden ser escritas en una forma vectorial similar como [50][51][52][53]:

$$\varepsilon^T = \{\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{xz} \quad \varepsilon_{xy}\} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

La deformación es el cambio de desplazamiento por unidad de longitud, y por lo tanto los componentes de deformación se pueden obtener de las derivadas de desplazamiento como <sup>[50][51][52][53]</sup>:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{Ecuación 5.10}$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

Donde  $u, v$  y  $w$  son los componentes de desplazamiento en las direcciones  $x, y$ , y  $z$ , respectivamente <sup>[50][51][52][53]</sup>.

Las seis relaciones deformación-desplazamiento de las Ecuaciones 5.6 hasta 5.11 pueden ser reescritas en la siguiente forma matricial <sup>[50][51][52][53]</sup>:

$$\varepsilon = LU \quad \text{Ecuación 5.12}$$

Donde  $U$  es el vector de desplazamiento y tiene la forma de <sup>[50][51][52][53]</sup>:

$$U = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

Y  $L$  es una matriz de operadores diferenciales parciales obtenidos simplemente por deducción de las Ecuaciones 5.6 hasta 5.11 y se representa en la Ecuación 5.14 <sup>[50][51][52][53]</sup>:

$$L = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 5.14}$$

La ecuación constitutiva da la relación entre el esfuerzo y deformación en el material de un sólido. A menudo, esa ecuación es denominada ley general de Hooke [50][51][52][53]:

$$\sigma = c\varepsilon \quad \text{Ecuación 5.15}$$

Donde para materiales isotrópicos la matriz  $c$  tiene la siguiente definición [50][51][52][53]:

$$c = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{c_{11} - c_{12}}{2} & 0 & 0 \\ \text{Simetría} & & & & \frac{c_{11} - c_{12}}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 5.16}$$

Donde:

$$c_{11} = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad \text{Ecuación 5.17}$$

$$c_{12} = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad \text{Ecuación 5.18}$$

$$G = \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \quad \text{Ecuación 5.19}$$

$E, \nu$  y  $G$  son el módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo de corte del material, respectivamente. La relación entre estas tres constantes está dada por [50][51][52][53]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Ecuación 5.20}$$

# CAPÍTULO 6

## ENTORNO COLABORATIVO

---

### 6.1. Importancia de la colaboración humano-robot

Las industrias manufactureras nacionales e internacionales buscan aumentar su competitividad enfrentándose a nuevos retos, en especial los siguientes: reducción de ciclos de vida del producto, aumentar la variedad de los productos, incrementar los niveles de calidad y cambiar rápidamente entre diferentes productos de diferentes tamaños de lote. Esta clase de retos conllevan a problemáticas en el diseño del proceso de producción, debido a que se requiere una gran flexibilidad al aumentar la variedad de productos. Aunado a esto, la eficiencia es un factor importante para mejorar la posición competitiva en el mercado mundial [54][55][56][57][58][59][60][61].

Inicialmente los operadores eran los que se encargaban de todos los pasos para la producción de cierto producto, en su mayoría eso era porque las operaciones necesitan de sensibilidad igual o similar a la humana, por la variación de materiales en los productos y la necesidad de realizar tareas consecutivas o paralelas en cada estación de trabajo. Lamentablemente, los niveles de calidad variaban en cuestión a precisión, repetibilidad y exactitud, sin contar la condición de estrés a la que se sometía al personal. Por lo que se empezó a cambiar el sistema empleando la automatización de los procesos, haciendo uso de los robots, con esto se obtuvieron los siguientes beneficios: se tenían los niveles de calidad deseados, una mejora en el rendimiento de operación en cada estación, trazabilidad de las operaciones y reducción de estrés hacia los operadores; el único inconveniente de este tipo de sistema es la flexibilidad ante modificaciones del producto, implicando costos grandes para lotes pequeños o para productos



únicos. Esto conllevó a centrar una gran cantidad de esfuerzo de investigación en celdas de trabajo colaborativo humano-robot [54][55][56][57][58][59][60][61].

La aplicación de celdas de trabajo humano-robot logra sistemas de producción flexible, altamente reconfigurable y personalizada, pero hasta cierto punto limitada debido a una estricta separación espacial entre las actividades humanas y sistemas automatizados. Mientras que las celdas de trabajo colaborativo humano-robot están desarrolladas para el campo de tecnología de producción donde se busca que el ser humano trabaje de manera colaborativa con el robot para que este último pueda decidir cómo usar los avisos del ser humano, llegando a ser más adaptable, flexible y calificado a niveles diversos de autonomía e interacción. Los robots en este tipo de celda son libremente programables y por medio de sistemas automatizados expandidos por sensores dan soluciones para la cooperación asincrónica y dislocada con seres humanos. Estas características de celdas colaborativas se pueden emplear en operaciones de ensamblaje en donde su característica es la integración de capacidades humanas junto con las características de automatización robótica como fuerza, velocidad, predictibilidad, repetibilidad y precisión [54][55][56][57][58][59][60][61].

## 6.2. Fuerza teórica herramienta del robot

Al momento de aplicar la fuerza de agarre a un objeto se tiene problemáticas como el peso del objeto a levantar, la fuerza de fricción generada por el contacto entre la pieza y el objeto a levantar, y la fuerza realizada por la aceleración con dirección hacia el movimiento.

Un modelo usado para determinar la fuerza mínima de agarre al momento de sostener y mover el objeto se presenta como [62][63][64][65]:

$$f_f \leq \mu F^* \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde

$f_f$ : Fuerza de fricción

$\mu$ : Coeficiente de fricción estático

$F^*$ : Fuerza mínima de agarre

$F^*$  es definido como una fuerza teórica que cambia de valor debido a la aceleración empleada. Esta ecuación es ocupada tanto para herramientas robóticas como para succionadores de vacío de manera horizontal o vertical, como lo mostrado en las Figuras 6-1 y 6-2. El coeficiente de fricción estático es de los materiales en contacto [62][63][64][65].

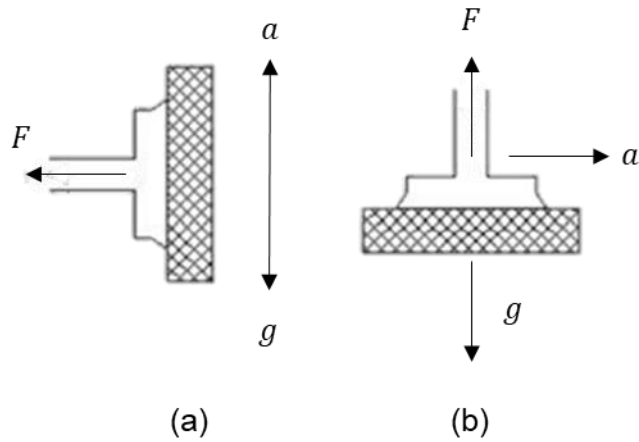


Figura 6-1. Fuerza para levantar un objeto en succionadoras de vacío a) vertical y b) horizontal [63].

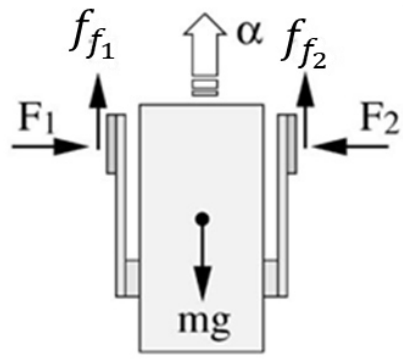


Figura 6-2. Fuerzas para levantar un objeto con una herramienta robótica [62].

Considerando el movimiento para la fuerza de fricción, esta puede ser calculada con la Ecuación 6.2 [62][63][64][65]:

$$f_f = \frac{m(g + a)}{\# \text{dedos}} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde:

$m$ : Masa del objeto

$g$ : Aceleración de la gravedad

$a$ : Aceleración del movimiento del objeto

$\# \text{dedos}$ : Cantidad de dedos empleados en el agarre

Donde la fuerza de fricción es directamente proporcional a la cantidad de dedos o brazos a ocupar.

Con las Ecuaciones 6.1 y 6.2, se puede tener una ecuación general [62][63][64][65]:

$$F^* = \frac{m(g + a)}{\mu(\# \text{dedos})} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Para figuras con cierta inclinación la Ecuación 6-3 cambiaría al implicar los ángulos de inclinación ( $\alpha_i$ ), representándose en la Figura 6-3 para una copa de succión [63].

$$\sum_{i=1}^n (F_i \cos \alpha_i + \mu F_i \operatorname{sen} \alpha_i) = m(g + a) \quad \text{Ecuación 6.4}$$

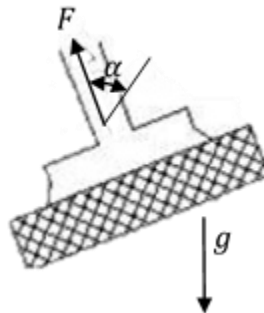


Figura 6-3. Fuerzas para levantar un objeto con un ángulo de inclinación [63].

Para evaluar la seguridad ante el deslizamiento al realizar los movimientos de agarre se emplea un factor de seguridad que relacionará la fuerza aplicada con la fuerza mínima de inclinación [62].

$$N = \frac{F}{F^*} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

Donde:

$N$ : Factor de seguridad

$F$ : Fuerza empleada en el agarre

El factor de seguridad es independiente de cada tipo de instrumento a elegir para transportar el objeto, algunos de los factores son la sensibilidad del instrumento, el coeficiente de fricción y la experiencia del operador en el uso de estos dispositivos [62]. El valor de factor de seguridad aumentará o disminuirá dependiendo del tipo de aplicación en el que se ocupará siendo uno de los factores relevantes la aceleración empleada en el transporte del objeto, apreciándose en la Figura 6-4.

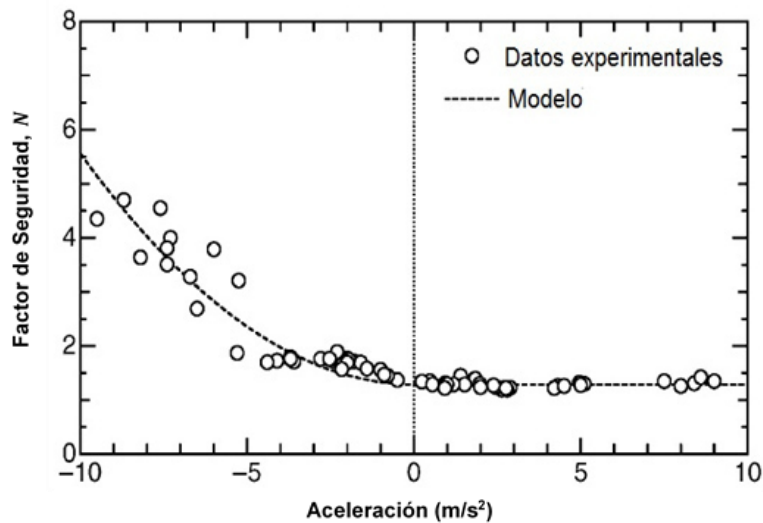


Figura 6-4. Efecto de la aceleración en el factor de seguridad [62].

Viendo la Figura 6-4, el efecto que atribuye a un factor de seguridad alto es la desaceleración del componente.

# CAPÍTULO 7

## EXPERIMENTACIÓN

---

### 7.1. Introducción

Ante el problema de la instalación de una celda robótica con un robot industrial se optó por elegir un robot colaborativo debido a que este tipo de robot puede trabajar de manera conjunta con el personal ya que tiene sensores para evitar realizar algún tipo de daño al estar el personal cerca del robot, además, se tiene un ahorro con la instalación del cercado de la celda, donde, esto es necesario al momento de instalar un robot industrial.

Este tipo de robots ocupan una herramienta especializada y un proveedor que da una herramienta robótica con alta precisión es ROBOTIQ, ésta tiene la ventaja de que las pinzas o dedos del robot tienen movilidad y tienen un espacio entre dedos de 85 mm siendo de gran utilidad para piezas grandes en cuestión a soportes ADAS. Además, la herramienta robótica 2F-85 cuenta con una repetibilidad de posición de  $\pm 0.05$  mm, en las yemas de los dedos robóticos requieren de silicón y la repetibilidad de la fuerza es de  $\pm 10\%$ . La fuerza de agarre es ajustable y puede ejercer entre 20 N como mínimo hasta un máximo de 235 N, la carga útil al momento de agarre es de máximo 5 kg y la velocidad en la que cierra es ajustable entre los valores de 20 a 150 mm/s <sup>[66]</sup>.

El robot colaborativo ocupado en este proyecto fue un robot universal modelo UR5e. Este robot puede cargar hasta 5 kilos, con un alcance de 850 mm y una repetibilidad  $\pm 0.03$  mm, con carga, según ISO 9283 <sup>[67]</sup>.

Debido a que se tiene la necesidad de tener un error máximo de  $\pm 1$  mm en la posición geométrica, se hace la identificación de aspectos a evaluar para asegurar este valor, como la aplicación de la fuerza necesaria en la pieza de

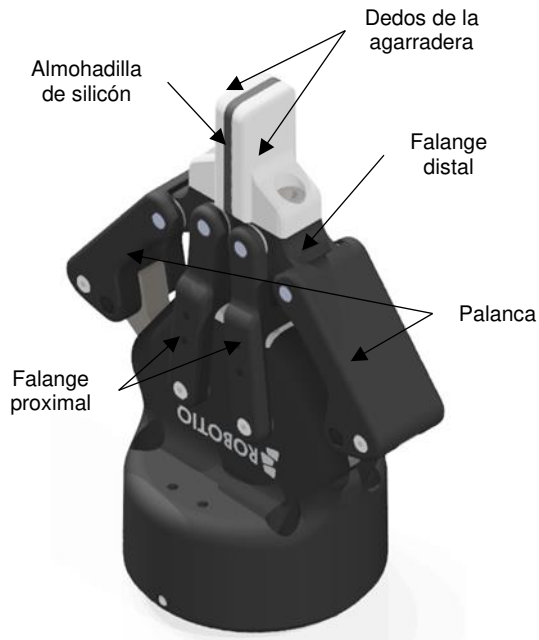
interés, el factor de seguridad, los desplazamientos y esfuerzos en la herramienta robótica y en los soportes ADAS al momento de aplicar una fuerza, el conocer si las deformaciones y esfuerzos están en la zona elástica o plástica, comportamiento y formas de fijación que tendrán los soportes ADAS y la herramienta robótica al momento de realizar el agarre, comportamiento de los soportes ADAS al ser transportados al área de interés, saber las propiedades de los materiales a ocupar y si puede o no haber fricción al momento del agarre, por lo que se procede a ocupar los diseños mecánicos que tiene ROBOTIQ y realizar un análisis de elemento finito con el fin de evaluar la efectividad de la herramienta robótica proporcionada por ROBOTIQ para el sistema de pegado.

### **7.2. Elección del programa.**

El programa utilizado fue Autodesk Inventor Professional 2019 que es un tipo de programa es CAD/CAE donde los análisis de elemento finito que se tienen son de estructura, dinámica para ensambles y de vibración, entre los más usados. El modelado en Inventor es paramétrico lo cual es de ayuda al momento de modelarlo en un programa de elemento finito. Por otra parte, el análisis del elemento finito se puede realizar en la misma pieza o ensamble evitando así el traslado de pieza y/o la posibilidad de cambios en la geometría.

### **7.3. Diseño mecánico**

El diseño mecánico ya está realizado por ROBOTIQ, en el cual desde su página se pueden obtener los archivos CAD de la herramienta robótica y de sus dedos, pero hay un inconveniente, en la Figura 7-1 se representa un ensamblado de la agarradera de los archivos CAD descargados, las piezas del ensamble no llegan a tener movilidad en los dedos, así como las extensiones de estos mismos. Por lo tanto, se optó en hacer réplicas de las piezas relacionadas con el agarre del objeto. Las réplicas se hicieron haciendo mediciones en las piezas originales, llegando a tener una información más relevante a las dadas en los manuales de usuario.

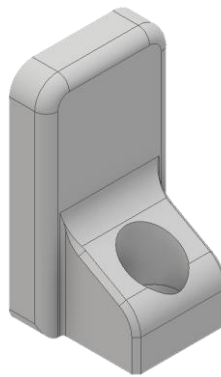


*Figura 7-1. Pieza CAD dada por ROBOTIQ.*

En cuestión a los dedos de la agarradera se tienen dos modelos, la designación por ROBOTIQ en el nombre de los archivos es uno completamente metálico y el otro con una partición en el cual se tendrá una almohadilla de silicón. Además de estos dedos también se puede realizar una personalización del dedo de la agarradera si es que llega a ser necesario algún cambio, pero en este trabajo solo se ocuparon los modelos dados por ROBOTIQ.

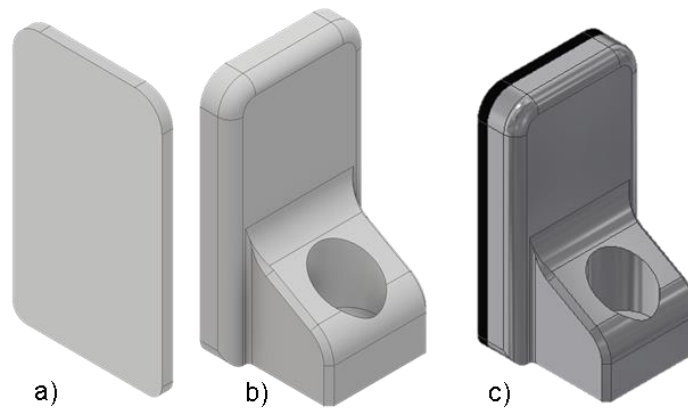
### **7.3.1. Ensamblado del dedo de la herramienta robótica**

La primera pieza a replicar es el dedo completamente metálico representado en la Figura 7-1.



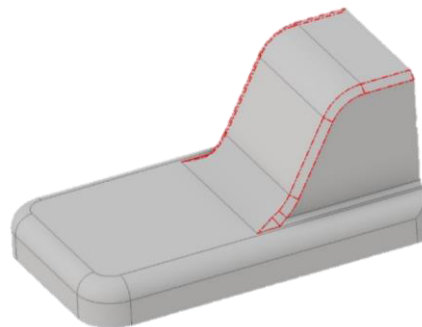
*Figura 7-2. Dedo metálico.*

La siguiente réplica es la modificación a la Figura 7-2, siendo una versión con el aditamento de una almohadilla de silicón, la modificación no representa un cambio en las medidas originales del dedo ya que se le realiza una disminución en el espesor del dedo metálico para poder incorporar la almohadilla. La réplica de la modificación del dedo metálico está representada por la Figura 7-3. La Figura 7-3 a) representa la almohadilla de silicón, la Figura 7-3 b) es el dedo metálico con la reducción en su espesor de 1/16" y la Figura 7-3 c) es el ensamble de la almohadilla de silicón con el dedo metálico.



*Figura 7-3. a) Almohadilla de silicón, b) dedo metálico y c) ensamblado del dedo.*

Las limitaciones en el programa Inventor 2019 se manifiestan en el dedo metálico de las Figuras 7-2 y 7-3, pues al aplicar el chaflán de 0.8 mm se presentan ciertas deformaciones. Cuando el valor asignado al chaflán es menor, el programa realiza una pieza similar a la pieza original, tal como se muestra en la Figura 7-4.



*Figura 7-4. Dedo metálico con valores de chaflán menores de 0.8 mm.*



Si se quiere llegar a una representación igual a la mostrada a los archivos CAD de ROBOTIQ se recomienda usar programas como SolidWorks o NX que pueden llegar a realizar estas operaciones, otra opción, pero que no es tan recomendable es usar superficies para llegar a la forma que se desea.

### 7.3.2. Ensamblado de la herramienta robótica

El ensamblado de la herramienta robótica consta de las réplicas de la almohadilla de silicón, el dedo de la herramienta, la palanca, la falange distal y proximal, debido a que son las piezas con las que la herramienta realiza sus movimientos. La palanca junto con la falange distal y proximal son de Aluminio 6061 [66].

La Figura 7-5 cuenta con las extensiones de mayor relevancia en la herramienta, siendo las partes móviles las que efectúan el movimiento de agarre en la pieza, en las simulaciones realizadas los componentes son nombrados como S1 para la falange distal, S2 la falange proximal y S3 la palanca para simplificar la interpretación de los datos.

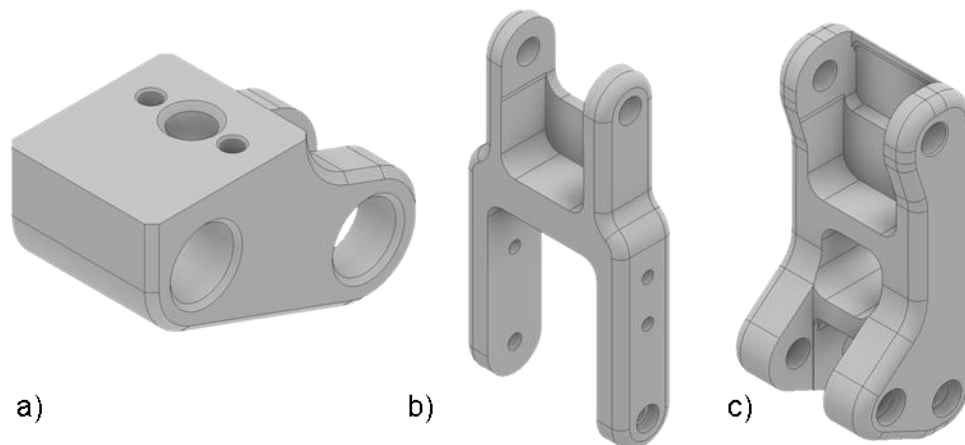
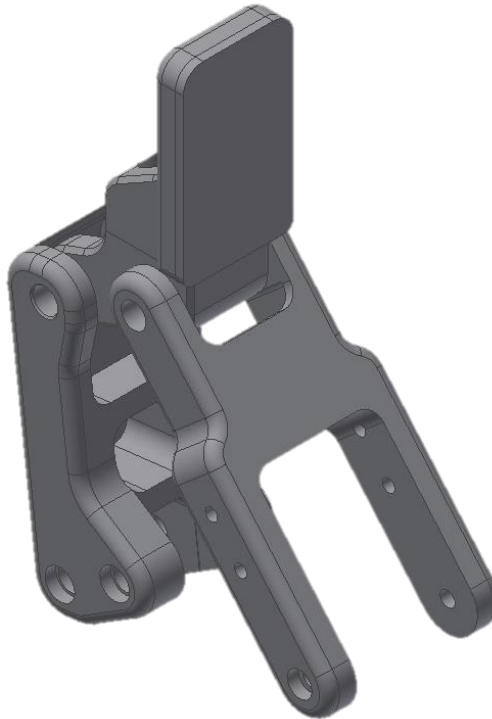


Figura 7-5. a) S1, b) S2 y c) S3.

Al ensamblar los componentes de la Figura 7-3 c) junto con los de la Figura 7-5, se tiene el dedo completo de la herramienta, tal como se muestra en la Figura 7-6.



*Figura 7-6. Representación de los cuerpos en movimiento de mayor relevancia en la herramienta robótica.*

## **7.4. Elección de material para el método de elemento finito**

### **7.4.1. Propiedades de los materiales de los soportes ADAS**

Para los soportes ADAS los materiales son ABS para SA1 (soporte ADAS de mayor tamaño) y PEI-GF20 para SA2 (soporte ADAS de menor tamaño), esta identificación viene en cada soporte ADAS como se puede apreciar en la Figura 7-7 y 7-8.



Figura 7-7. Material ABS del SA1.



Figura 7-8. Material PEI-GF20 del SA2.

Al terminar de identificarlos se procedió a realizar la medición de la masa real de ambos soportes ADAS, obteniendo datos de 74.41 g y 26.72 g, para el soporte grande y chico, respectivamente. La medición se puede apreciar en la Figura 7-9.



Figura 7-9. Valores de masa reales de a) SA1 y b) SA2.

Al obtener las propiedades mecánicas del ABS y PEI-GF20 mediante la base datos de SolidWorks e Inventor, se procedió alimentar estas propiedades en el software Inventor. Los datos ingresados se encuentran en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Propiedades mecánicas de ABS Plastic y PEI-GF20 [68][69].

Propiedades mecánicas	ABS PLASTIC	PEI-GF20
Módulo de elasticidad (GPa)	2.24	6.89
Coefficiente de Poisson	0.38	0.44
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1060	1420
Límite elástico (MPa)	20	138.59

En el apartado de propiedades de Inventor representado en la Figura 7-10 se puede apreciar que la masa calculada por el software para el SA1 es de 75.348 g y del SA2 de 25.337 g.

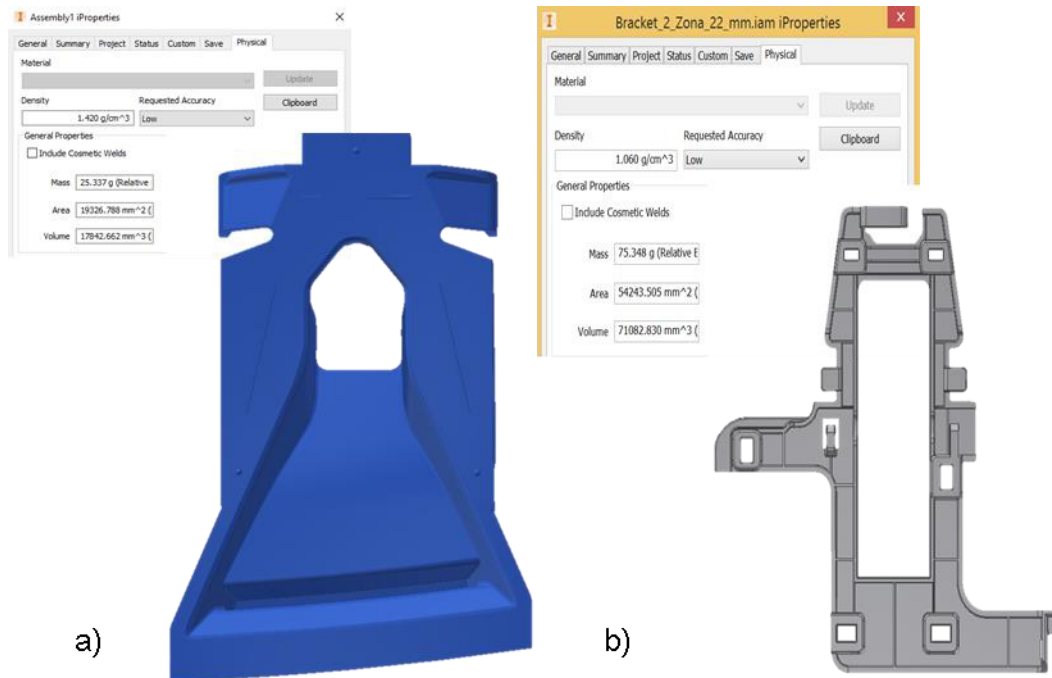


Figura 7-10. Masa calculada por Inventor 2019 para a) SA2 y b) SA1.

Se realizó una comparación en las masas de los soportes ADAS en comparación a lo calculado por el paquete CAD. Las diferencias mostradas entre el archivo CAD y los modelos reales dan valores de 0.938 g y 1.383 g, para el SA1 y SA2, respectivamente. Este error se puede deber a muchos factores, desde una reconstrucción de geometrías hasta el moldeado de los soportes ADAS. El error en la masa de los soportes ADAS es de 1.26% y 5.175%, donde el error más grande se le atribuye al SA2, estos errores entran en el rango de lo

aceptable en error ingenieril, por lo que se puede tomar cualquiera de los valores de masa, en este caso se usaron las masas medidas de los modelos reales, para una mayor precisión en la fuerza que se debe suministrar por el dedo de la herramienta robótica.

#### 7.4.2. Elección de material para el dedo de la herramienta robótica

ROBOTIQ contaba con materiales recomendados en su manual de instrucciones para sus modelos de dedos de herramientas robóticas, los materiales son Aluminio 6061 o Acero 4340.

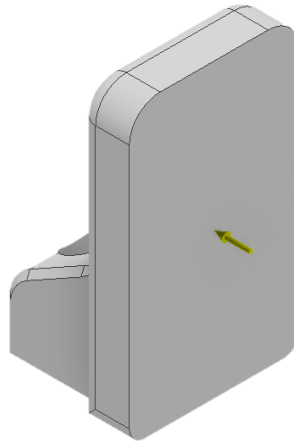
Para verificar que estos materiales son los adecuados en la agarradera para la aplicación en la que se piensa usarla, se compararon contra otros aluminios y aceros con la capacidad de maquinarse. Los aluminios son: 1100 H14 y H18, 2014 T4 y T8, 3003 H14 y H16, 5005 H14 y H18, y el 6061 y 6061-O, por parte de los aceros son: AISI 4340 242 HR y 350A QT, 1018 106 HR, 1045 390 QT, 4130, ASTM A36 y el acero inoxidable AISI 304 y 405. Las propiedades del coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad entre los aluminios y aceros son muy similares, los valores promedio se representa en la Tabla 7-2.

*Tabla 7-2. Propiedades mecánicas de los aceros y aluminios elegidos para las pruebas de esfuerzo<sup>[69]</sup>.*

<b>Propiedades mecánicas</b>	<b>Aluminio</b>	<b>Acero</b>
<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>	69.7	202.84
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.34	0.31

Para la elección del material se compararon los resultados mecánicos provenientes de simulaciones de elemento finito del dedo de la herramienta robótica sujeto a una fuerza en la cara de la Figura 7-11. Se utilizó como fuerza de 235 N el doble de lo permitido, como referencia y los valores que se compararon fueron el desplazamiento máximo, factor de seguridad, el esfuerzo máximo generado y la maquinabilidad. El tipo de mallado utilizado fue el más grande permisible por el software Inventor 2019 que en este caso es de 1 (valor adimensional con un rango de valores de 0 hasta 1) para el tamaño promedio del

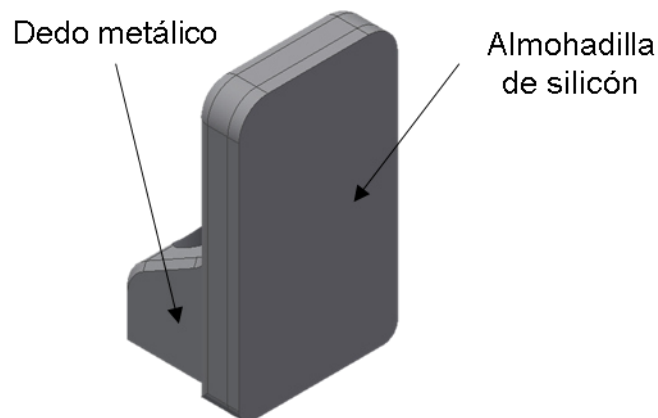
elemento y dejando los demás valores por defecto. El uso de este tipo de mallado fue para disminuir el tiempo del procesamiento al momento de realizar las simulaciones ayudando a descartar materiales de manera más eficiente. El modelo a ocupar se muestra en la Figura 7-11, siendo un modelo sin la almohadilla de silicón.



*Figura 7-11. Dedo completamente de material metálico.*

### **7.5. Pruebas en prototipo de silicona**

Al tener la selección de los aceros y/o aluminios con mejores propiedades mecánicas, se cambió el modelo usado en la Figura 7-11 por el de la Figura 7-12, el cual cuenta con una almohadilla de silicón. En la almohadilla de silicón se emplea la fuerza y mallado usado en la selección de material con el fin de ver los cambios en los esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad.





*Figura 7-12. Dedo metálico con almohadilla de silicón.*

## 7.6. Restricciones de posición.

Debido a que en el área de trabajo no se tenía un sistema físico de fijación en el cual se designara dónde y cómo estarían ubicados los soportes ADAS, se propusieron métodos de fijación que llegaran a ser útiles y funcionales. Los métodos de fijación fueron identificados como:  $MF_1, MF_2, \dots, MF_n$ . Los tipos de fijaciones consideradas en las Figuras 7-13 a 7-21 se encuentran en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3. Grados de libertad de los tipos de fijaciones <sup>[69]</sup>.

Tipo de fijación	Símbolo	Grados de libertad
Fija		Elimina todos los grados de libertad $u_x = u_y = u_z = 0$
Normal "a"		Impide el movimiento normal a la superficie $u_z = 0$

**MF<sub>1</sub>**: El primer método de fijación simuló un sistema de vacío en donde los soportes ADAS al momento de ser colocados en la zona de trabajo quedaban fijos en la mesa hasta el momento en el que la herramienta robótica levantaba el soporte ADAS y lo desplazaba hacia la zona de interés. La representación de este sistema se puede apreciar en la Figura 7-13.

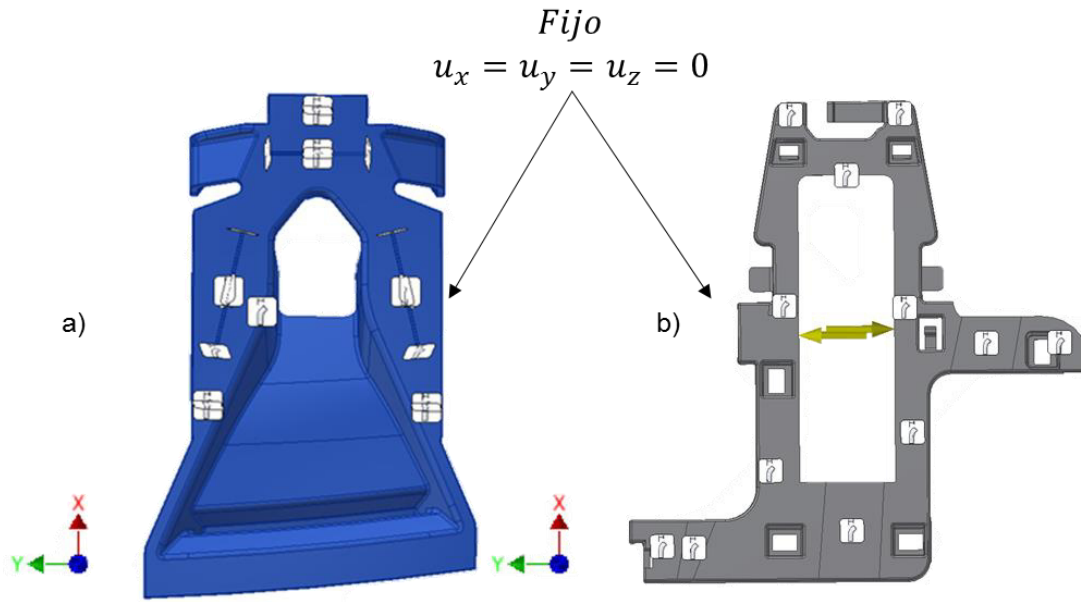


Figura 7-13. Método MF<sub>1</sub> a) SA2 y b) SA1.

**MF<sub>2</sub>:** El segundo método de fijación representaba una fijación como la mostrada en la Figura 7-14, siendo un sistema de fijación mediante moldes en un nido (mesas redondas de acero), en donde estos moldes restringían el movimiento lateral de las piezas. Las zonas seleccionadas para SA1 fueron rectangulares de 15 mm de alto, donde el ancho estaba delimitado por el mismo soporte al igual que el espesor. Por otro lado, para SA2, se seleccionaron las zonas rodeadas por el molde como lo mostrado en la Figura 7-14. Además de la selección de estas zonas, se mantuvo la mesa en contacto con las piezas mediante fricción.



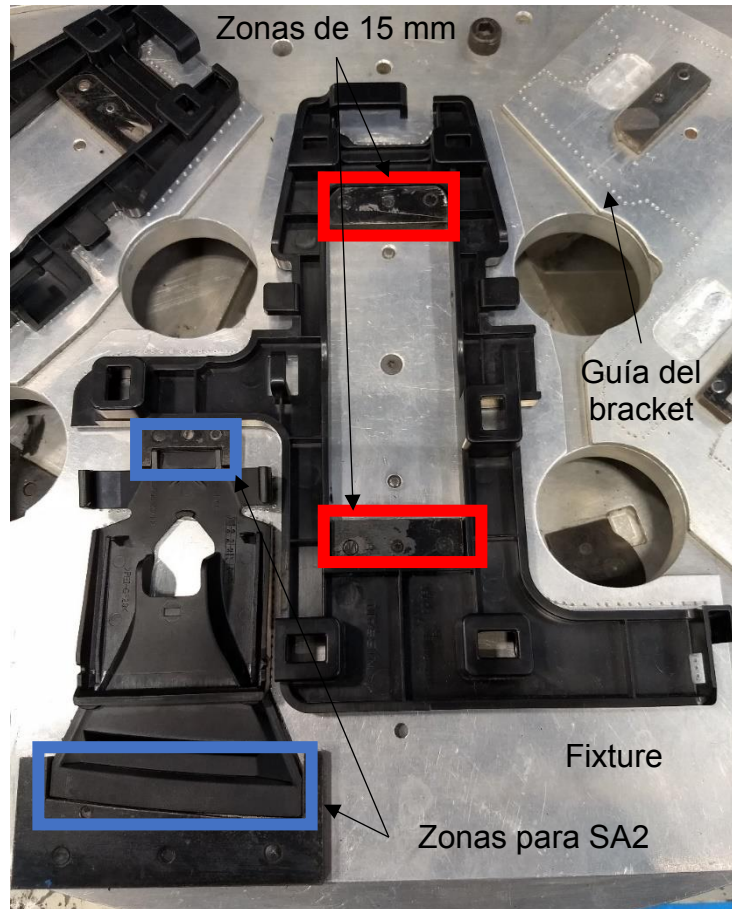


Figura 7-14. Método MF<sub>2</sub>.

**MF<sub>3</sub>**: El tercer método de fijación representado por la Figura 7-15, sólo era por la fricción generada entre la mesa y la pieza. Este tipo de fijación surgió debido a la necesidad de un sistema que no ocupe moldes y/o elementos extras aparte de la colocación de los soportes ADAS en el área de trabajo. La delimitación de las zonas fue, de manera general, empleando formas rectangulares o cuadradas alrededor de los soportes ADAS, el tamaño de esas limitaciones podía cambiar dependiendo del tipo de pieza, pero no llegaba a ser personalizada.

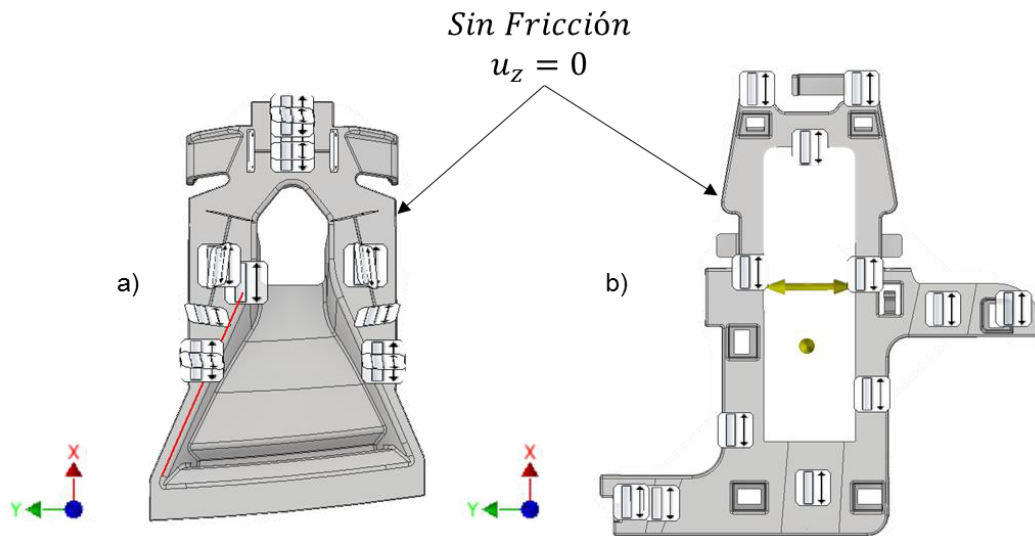


Figura 7-15. Método MF<sub>3</sub> a) SA2 y b) SA1.

Los métodos presentados son para los soportes ADAS cuando están en contacto con la mesa, pero cuando el robot realiza el agarre y eleva la pieza para llevarlo a su destino, esos métodos de fijación ya no son válidos por lo que se propuso el siguiente método de fijación.

**MF<sub>4</sub>:** Cuarto método de fijación resultante por la elevación del soporte ADAS, la fijación se realizó en la zona sujeta por la herramienta robótica. El área de fijación fue diferente en cada soporte ADAS, en el SA2 se tenía una superficie de contacto en 11 mm de la pieza, mientras que en el SA1 de 22 mm las otras dimensiones estaban dadas por la misma morfología de las piezas como las presentadas en la Figura 7-16.

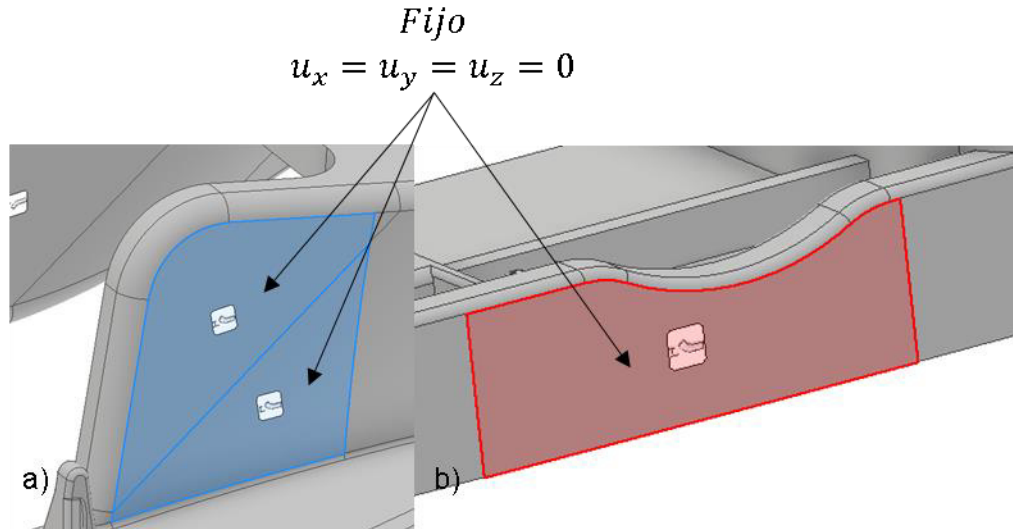


Figura 7-16. Método MF<sub>4</sub> a) SA2 y b) SA1.

Por último, se propusieron métodos de fijación para el ensamble entre las partes de la extensión del dedo de la herramienta robótica con el del dedo de la herramienta. Además, se propusieron dos métodos para el comportamiento de la herramienta en el proceso de agarre y levantamiento de la pieza.

**MF<sub>5</sub>:** El quinto método consistió en simplificar la fijación que tiene el dedo con la extensión de la herramienta, se seleccionó toda la cara que está en contacto con la extensión de la herramienta, quedando completamente fija como se ilustra en la Figura 7-17.

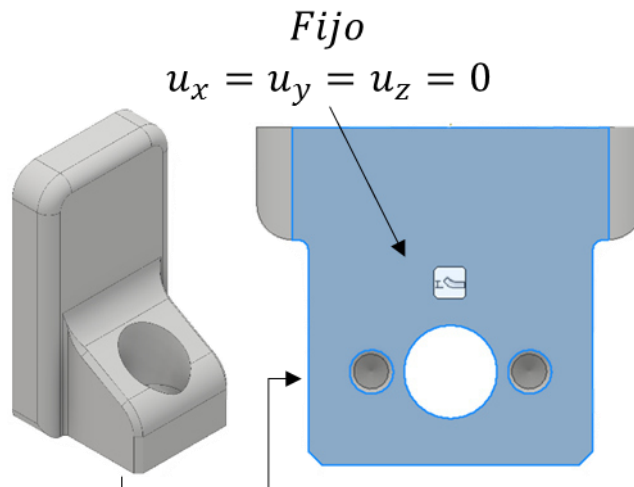


Figura 7-17. Método MF<sub>5</sub>.

**MF<sub>6</sub>**: El sexto método de fijación consistió de hacer uso del agujero del tornillo central del dedo de la herramienta robótica para hacer la unión entre las piezas (Figura 7-18). La zona del tornillo debía de estar sin ningún tipo de libertad de movimiento, por lo que toda esta zona se consideró fija.

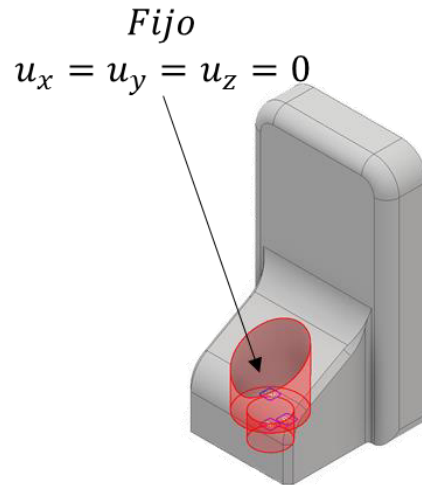


Figura 7-18. Método MF<sub>6</sub>.

**MF<sub>7</sub>**: El séptimo método consistió de usar de todos los agujeros disponibles en el dedo de la herramienta robótica para realizar la unión de las piezas (Figura 7-19). Este tipo de fijación es la más cercana a la realidad y al igual que en el MF<sub>6</sub> las zonas de los agujeros no tenían la posibilidad de moverse debido a los tornillos.

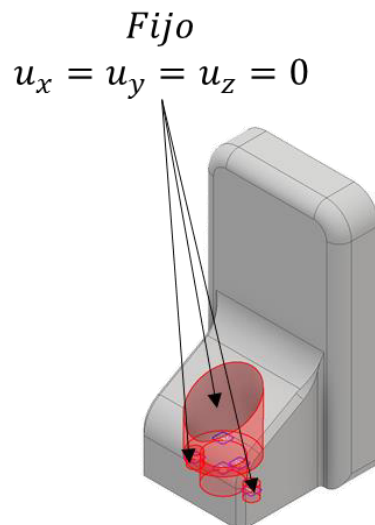


Figura 7-19. Método MF<sub>7</sub>.

**MF<sub>8</sub>**: El octavo método de fijación constó de no tener ningún tipo de movimiento de las partes móviles del ensamble al momento de realizar el agarre. El MF<sub>8</sub> se ilustra en la Figura 7-20.

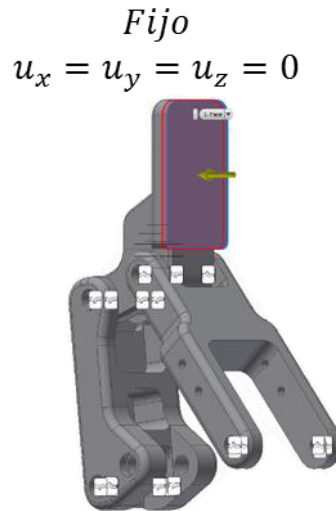


Figura 7-20. Método MF<sub>8</sub>.

**MF<sub>9</sub>**: El noveno método constó de solo realizar uniones entre las partes móviles del ensamble, permitiendo el movimiento de las piezas al momento de realizar el agarre. Las partes que no están sombreadas, en comparación al MF<sub>8</sub>, son las fijaciones que se cambiaron a uniones de manera manual. El MF<sub>9</sub> se ilustra en la Figura 7-21.

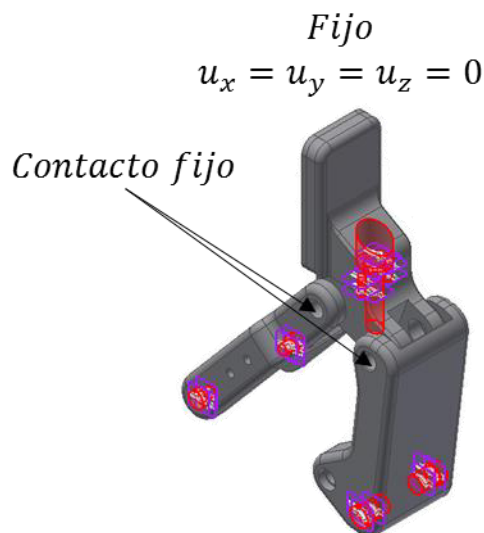


Figura 7-21. Método MF<sub>9</sub>.

En la Tabla 7.5 se puede encontrar un resumen de los métodos de fijación explicados en la sección 7.6.

### **7.7. Efecto en el cambio de posición de la herramienta robótica**

El ensamble de la herramienta robótica al momento de realizar el agarre no siempre tendría la misma posición, por lo que se realizaron simulaciones con MF<sub>8</sub> para ver si el efecto de la fuerza en una posición diferente podía llegar afectar los resultados de deformación y esfuerzos. La fuerza, así como la malla, a ocupar en la cara de la almohadilla de silicón fue usada en la elección de material para el dedo de la herramienta robótica.

### **7.8. Cálculo de la fuerza mínima para la sujeción de los soportes ADAS.**

Para el cálculo de la fuerza mínima, primeramente, se consideró el efecto de la gravedad, luego de manera gradual se aplicaron aceleraciones con valores de cero  $g$  hasta tres veces  $g$ , para obtener un factor de seguridad. La fuerza dada por este factor tiene como objetivo ver las deformaciones y esfuerzos que ocurren en los soportes ADAS cuando están en la mesa. Se usó la Ecuación 6.3 para la fuerza mínima y la Ecuación 6.5 para el factor de seguridad.

En caso de que la fuerza mínima para la sujeción no tuviera un valor que entre en el rango operacional de la agarradera (20 a 235 N), se aumentaba el valor de aceleración.

### **7.9. Elección del coeficiente de fricción**

Debido a que la formulación de las ecuaciones para el levantamiento de un objeto es igual tanto en las ventosas como en el dedo robótico, se obtuvo la información del coeficiente de fricción de la base de datos de sistemas de vacío para copas de succión de Festo. En la Tabla 7-4 se muestran los coeficientes de fricción para la silicona.

Tabla 7-4. Coeficiente de fricción de ventosas con piezas de interés [70].

Material de la ventosa	Material de la pieza	Coeficiente Mínimo	Coeficiente Máximo	Coeficiente Típico
Silicona	Plástico	0.3	0.6	0.45
Silicona	Metal	-	-	0.5

### 7.10. Refinado de la malla

El refinado de malla se comenzó en la agarradera haciendo uso del mallado automático que provee Inventor 2019 al estar cambiando el tamaño promedio de elemento, pero, al estar disminuyendo el tamaño, los elementos no seguían una tendencia estricta de aumentar el número de elementos, por lo que se hizo uso del mallado manual. En la Figura 7-22 se puede apreciar el cambio de mallado, donde al disminuir el tamaño del elemento, la malla empieza a tener la forma de la herramienta robótica. Se aplicó el mismo tamaño de malla en todos los elementos hasta llegar a un punto en el que se tuvo que realizar una malla combinada de 1.2 mm para los elementos que tenían menor importancia, 0.6 mm para el dedo metálico y 0.4 mm para la almohadilla de silicón. La fuerza empleada en el refinado de malla es el usado en la elección de material del dedo de la herramienta.

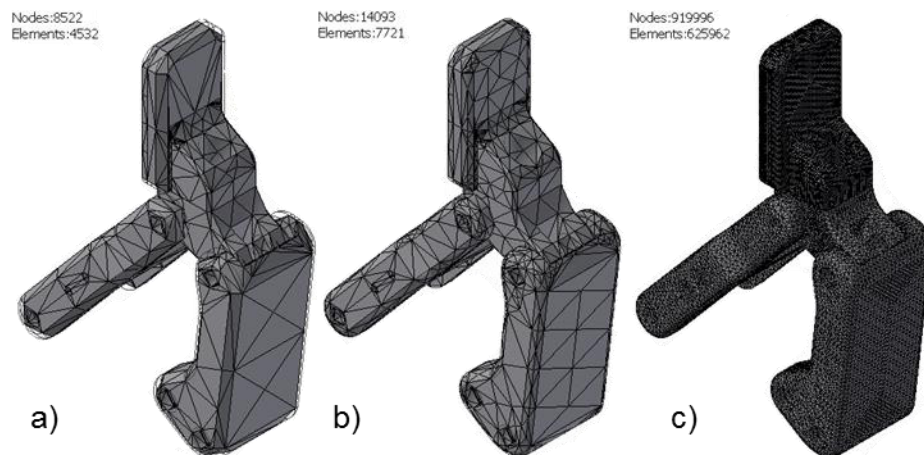


Figura 7-22. Cambio en la forma de mallado con diferentes tamaños de malla a) 160 mm b) 40 mm y c) combinado.

Al terminar el refinado de malla en la herramienta robótica se procedió a hacerlo con los soportes ADAS, pero ya que SA1 y SA2 eran geometrías reparadas, tenían varias caras y secciones, podría ser confuso usar el mallado manual, por lo que en este caso se procedió a usar un mallado semiautomático. Para las zonas de mayor interés en los soportes ADAS, representados en la Figura 7-16, se usó un tamaño de malla de 0.4 mm como el usado en la goma de silicón y se varió el tamaño de malla de elemento promedio hasta que se llegó a un valor de 0.006 para ambos brackets.

La fuerza utilizada para la sensibilidad de malla de los brackets fue de 117.5 N en cada cara de interés, debido a que es la fuerza que emplea cada dedo, donde juntos hacen la fuerza máxima que puede emplear la agarradera.

### **7.11. Implementación**

Estas pruebas de agarre fueron realizadas por el Grupo Kopar, distribuidor del equipo a utilizar, y sirvieron para estimar la eficiencia del robot colaborativo UR5e como opción para el proceso de pegado de los soportes ADAS en el parabrisas.



Tabla 7-5. Casos de métodos de fijación.

Caso	Descripción
<b>MF<sub>1</sub></b>	Método que simula un sistema de vacío en el que la cara o caras que están en contacto con la mesa están completamente fijos.
<b>MF<sub>2</sub></b>	Método en el cual se realiza la fijación de los soportes ADAS mediante moldes que restringen el movimiento lateral de las piezas.
<b>MF<sub>3</sub></b>	Método en el que los soportes ADAS solo tienen limitaciones en su movimiento por la fricción generada entre las piezas y la mesa donde son colocados.
<b>MF<sub>4</sub></b>	Restricciones que deben tener las simulaciones de los soportes ADAS al momento de desplazar las piezas de un lugar a otro mediante el robot colaborativo.
<b>MF<sub>5</sub></b>	Método de fijación simplificado para el comportamiento del dedo con la agarradera al momento de realizar el agarre.
<b>MF<sub>6</sub></b>	Método de fijación aproximado para el comportamiento del dedo con la herramienta robótica al momento de realizar el agarre.
<b>MF<sub>7</sub></b>	Método de fijación real para el comportamiento del dedo con la herramienta robótica al momento de realizar el agarre.
<b>MF<sub>8</sub></b>	Método de fijación simplificado entre las uniones de S1, S2 y S3 en el que todas las piezas móviles se encuentran fijas al momento de realizar el agarre.
<b>MF<sub>9</sub></b>	Método de fijación real entre las uniones de S1, S2 y S3 en el que todas las piezas móviles simplemente están unidas, teniendo la capacidad de moverse al momento de realizar el agarre.

# CAPÍTULO 8

## RESULTADOS

---

### 8.1. Efecto del material

En esta sección se presenta los efectos que tiene el material en el dedo de la agarradera usando el método de fijación MF<sub>5</sub>.

#### 8.1.1. Aluminio

Las primeras simulaciones realizadas fueron con aluminio, debido a que  $E$  y  $\nu$ , eran muy similares. Las distribuciones de esfuerzo y desplazamiento se presentan en la Figura 8-1 considerando una fuerza total de 235 N.

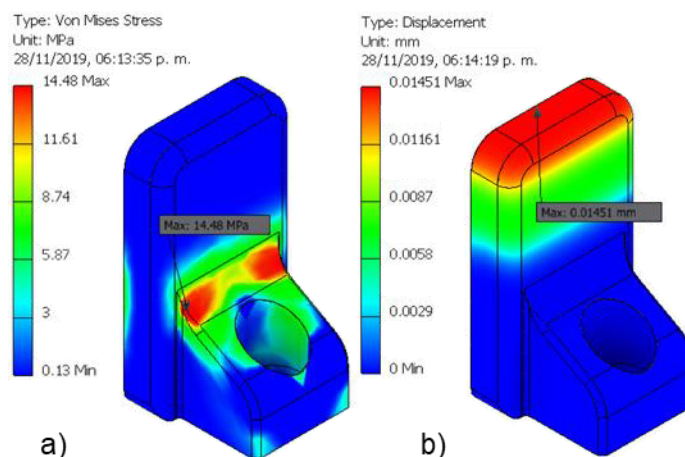


Figura 8-1. Resultados de a) esfuerzo y b) desplazamiento del aluminio con una fuerza de 235 N.

Las diferencias que se tienen entre las aleaciones de aluminio se vieron reflejadas en el factor de seguridad que se muestra en la Tabla 8-1 debido a los diferentes límites elásticos.

Tabla 8-1. Comparación de aluminios.

Nombre	Límite Elástico (MPa)	Factor de Seguridad
Aluminio 1100 H14	96.53	6.76
Aluminio 1100 H18	151.7	10.47
Aluminio 2014 T4	290	20.03
Aluminio 2014 T6	399.9	27.62
Aluminio 3003 H14	144.8	10.23
Aluminio 3003 H16	172.4	12.17
Aluminio 5005 H14	151.7	10.47
Aluminio 5005 H18	193.1	13.33
Aluminio 6061	275	18.99
Aluminio 6061-O	55.16	3.81

Los aluminios que destacan son el aluminio 2014 T4, T6 y el aluminio 6061, de estas tres aleaciones el que puede tener una maquinabilidad con formas complejas es el aluminio 6061.

### 8.1.2. Acero

Se realizó el cambio de material a acero y los resultados de esfuerzo y desplazamiento mostraron valores similares entre sus aleaciones, situación similar a lo visto con las aleaciones de aluminio. En la Figura 8-2 se representan los resultados de un acero con una fuerza de 235 N.

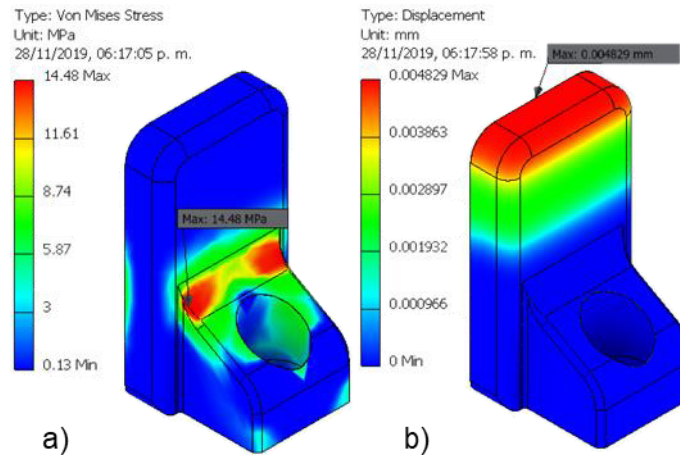


Figura 8-2. Resultados de a) esfuerzo y b) desplazamiento del aluminio con una fuerza de 235 N.

Las diferencias entre el factor de seguridad de las aleaciones de acero se encuentran en la Tabla 8-2

Tabla 8-2. Comparación de aceros.

Nombre	Límite Elástico (MPa)	Factor de Seguridad
Acero 4340 242 HR	1102	76.1
Acero 4340 350A QT	634	43.78
Acero 1018 106 HR	250	17.27
Acero 1045 390 QT	1274	87.98
Acero 4130	275.8	18.81
Acero A36	248.2	16.93
Acero Inoxidable 304	215	14.61
Acero Inoxidable 405	689.5	46.87

Los aceros más destacados fueron el 4340 242 HR, el 1045 390 QT y el acero inoxidable 405. En cuestión a maquinabilidad es mejor el acero 4340 y en caso de que la zona donde se esté trabajando sea corrosiva y tenga componentes electrónicos se recomienda el 304, debido a que los aceros de la

serie 400 son magnéticos. Al elegir el acero inoxidable 304 se tendrá un factor de seguridad menor en comparación con el acero 4340.

### 8.1.3. Comparación

Se puede notar por medio de las Figuras 8-1 y 8-2 que el aluminio tiene un mayor desplazamiento que el acero y mediante las Tablas 8-1 y 8-2 que tiene un factor de seguridad menor que el acero. Debido a que la fuerza que se empleará en la herramienta robótica es menor a la ejercida en estas simulaciones (ver sección 8.2) se puede decir que es efectivo usar la aleación de aluminio 6061 para realizar el agarre, ya que se tiene un factor de seguridad alto, los desplazamientos son pequeños, el costo en la maquinabilidad es menor al del acero y es resistente a la corrosión.

### 8.2. Resultados del cálculo de fuerza de agarre

Con la Ecuación 6.3 se obtuvo la fuerza mínima para sujeción de los soportes ADAS, para un primer caso se considera que no hay aceleración, siendo este caso el más ideal. En la Tabla 8-3 se encuentran los resultados para los soportes ADAS, el coeficiente de fricción utilizado fue el de silicona y plástico, teniendo un valor de 0.45 y se usó el valor de la gravedad de  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

*Tabla 8-3. Fuerza mínima para ejercer un agarre efectivo en los soportes ADAS.*

Tipo de soporte ADAS	Fuerza Agarradera (N)
SA1	1.62
SA2	0.58

Como la fuerza mínima esta por debajo de la fuerza a la que opera la agarradera 2F-85, se empezó agregar una aceleración de  $1g$  hasta valores de  $3g$  en las fuerzas de agarre de ambos soportes ADAS. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8-4.

Tabla 8-4. Fuerza de agarre con aceleraciones de 1g hasta 3g.

Fuerza Agarradera para SA1 (N)	Fuerza Agarradera para SA2 (N)	Aceleración (m/s <sup>2</sup> )
3.24	1.16	1g
4.87	1.75	2g
6.49	2.33	3g

Aún y cuando se considera un valor de tres veces la gravedad, la fuerza de agarre no tiene un cambio tan drástico, pero se puede apreciar que la fuerza de agarre debe ser mayor en SA1. Por lo que se siguió aumentando la aceleración hasta llegar a un valor operacional de la agarradera 2F-85 teniendo que ser como mínimo una fuerza de 20 N. Debido a que se requiere trabajar arriba de la fuerza mínima operacional de la herramienta robótica, se propuso también una fuerza de 40 N denominándose fuerza de operación. En las Tablas 8-5 y 8-6 se presentan los resultados en las fuerzas de agarre para SA1 y SA2 respectivamente.

Tabla 8-5. Fuerza de agarre para aceleraciones en SA1.

Fuerza Agarradera para SA1 (N)	Aceleración (m/s <sup>2</sup> )
9.73	5g
17.84	10g
19.47	11g
34.06	20g
40.55	24g

Para SA1 se alcanza la fuerza mínima operacional de la herramienta robótica con una aceleración de 11g y para la fuerza de operación se requiere una aceleración de 24g.

Para llegar a la fuerza mínima operacional del 2F-85 con SA2, el valor de la aceleración tiene que ser mayor que en SA1. Los resultados se pueden encontrar en la Tabla 8-6.

Tabla 8-6. Fuerza de agarre para aceleraciones en SA2.

Fuerza Agarradera para SA2 (N)	Aceleración (m/s <sup>2</sup> )
3.49	5g
6.41	10g
18.06	30g
19.80	33g
29.71	50g
40.77	69g

La fuerza mínima operacional del 2F-85 se presentó en SA2 con un valor de aceleración 33g y para la fuerza de operación se dio con un valor de 69g.

Para el factor de seguridad se empleó la Ecuación 6.5 donde la fuerza de agarre fue la de 40 N y la fuerza mínima de agarre fue la correspondiente mostrada en la Tabla 8-3, dando un valor de 25 y 69 para SA1 y SA2, respectivamente. Al ser el SA1 el elemento limitante, se designa un factor de seguridad de 25 para el proceso.

### 8.3. Efecto del método de sujeción

#### 8.3.1. Soporte ADAS (MF<sub>1</sub>, MF<sub>2</sub> y MF<sub>3</sub>)

##### 8.3.1.1. SA1

Al aplicar la fuerza de 235 N en MF<sub>1</sub>, MF<sub>2</sub> y MF<sub>3</sub>, se observaron diferentes comportamientos en los esfuerzos y desplazamientos. Los comportamientos se expresan en las Figuras 8-3 y 8-5.

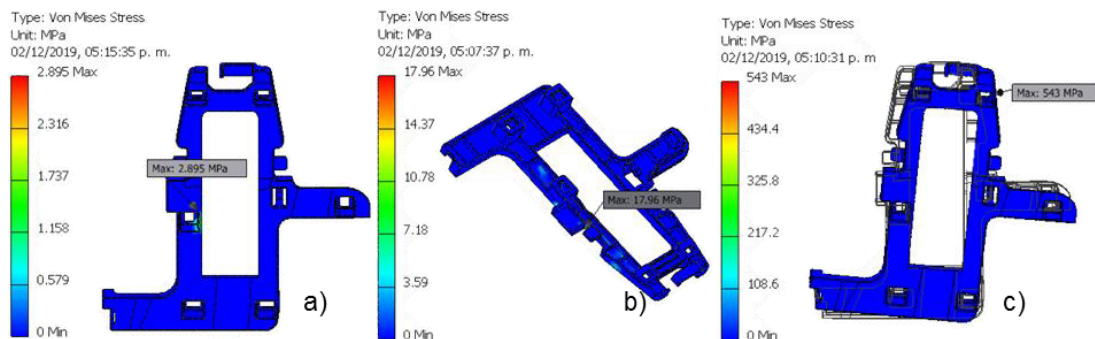


Figura 8-3. Esfuerzos de SA1 en a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>.

Al hacer la simulación en MF<sub>3</sub> Inventor se obtuvo un mensaje de error mencionando que la deformación era muy grande comparado con el tamaño del modelo, por lo tanto, el efecto que se ve en la Figura 8-3 es causado por la falta de delimitación del área de contacto y la fuerza ejercida.

El método que tuvo un menor esfuerzo fue el MF<sub>1</sub> teniendo un valor de 2.895 MPa, seguido del MF<sub>2</sub> con un valor de 17.96 MPa y por último el MF<sub>3</sub> con 543 MPa. Las zonas en las que se llegó a tener el mayor esfuerzo para MF<sub>1</sub> y MF<sub>2</sub> están señaladas en la Figura 8-4.

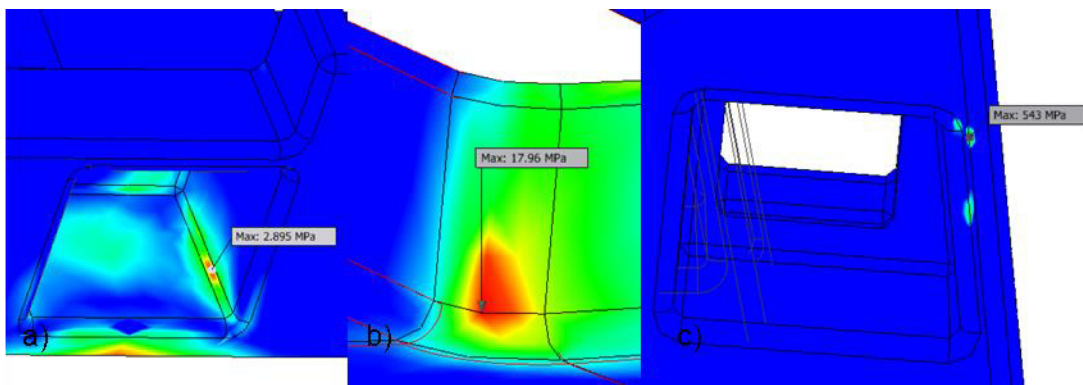


Figura 8-4. Zonas de mayor esfuerzo de SA1 en a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>.

Los desplazamientos en MF<sub>1</sub>, MF<sub>2</sub> y MF<sub>3</sub> se muestran en la Figura 8-5, éstos presentaron un comportamiento similar al que se tuvo con los esfuerzos en SA1.

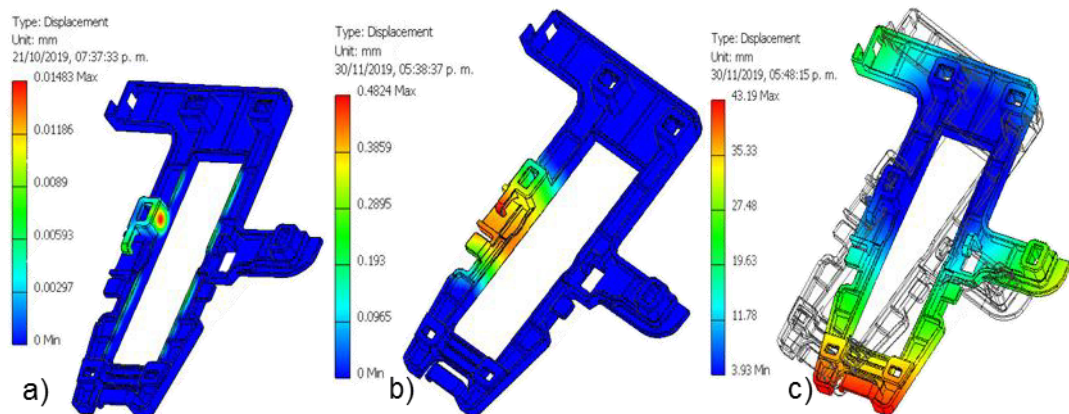


Figura 8-5. Comparación entre los desplazamientos de SA1 entre a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>.



El MF<sub>1</sub> resultó el más apto con un desplazamiento de  $14.83 \times 10^{-3}$  mm, seguido del MF<sub>2</sub> con  $48.24 \times 10^{-2}$  mm y MF<sub>3</sub> con 43.19 mm.

Los factores de seguridad mostrados en la Figura 8-6 demuestran que MF1 puede soportar una fuerza de 235 N ya que tiene un valor de 6.91, MF2 apenas podría soportar la fuerza de 235 N con su valor de 1.11 y el valor de 0.04 de MF3 indica que se sobrepasó el límite de cedencia.

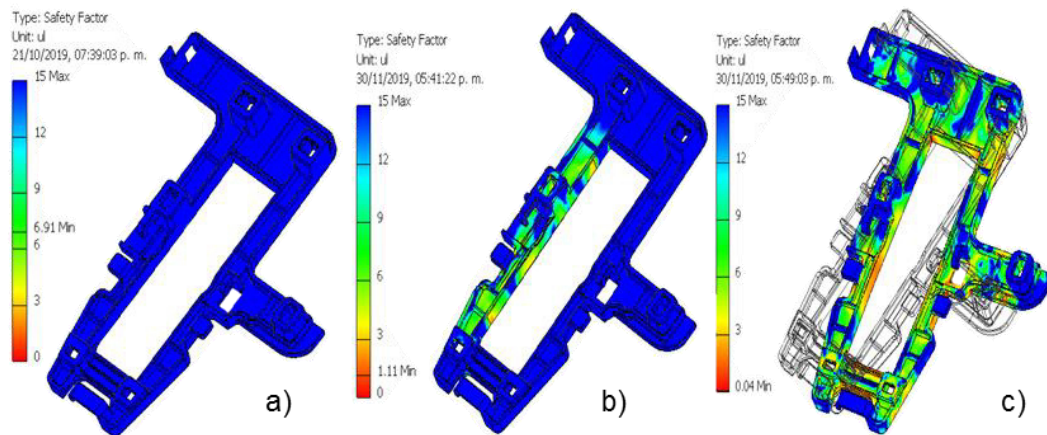


Figura 8-6. Factor de seguridad de SA1 en a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>.

### 8.3.1.1.1. Efecto de la gravedad en SA1 con la fuerza de agarre

Con los primeros resultados de MF<sub>1</sub>, MF<sub>2</sub> y MF<sub>3</sub> se le realizó una delimitación con MF<sub>4</sub> en las caras de la zona de agarre de SA1, con el fin de evaluar las sí hay diferencias significativas al momento de realizar la delimitación, en cada cara delimitada se le aplicó una fuerza de 20 N. Para ver si la gravedad influía de manera significativa se realizaron dos casos distintos que son: sin gravedad y con gravedad.

#### 8.3.1.1.1.1. Sin gravedad

En la Figura 8-7 se representa la delimitación de MF<sub>4</sub> en SA1 usando el MF<sub>3</sub> al momento de aplicar una fuerza de 20 N en cada cara delimitada.

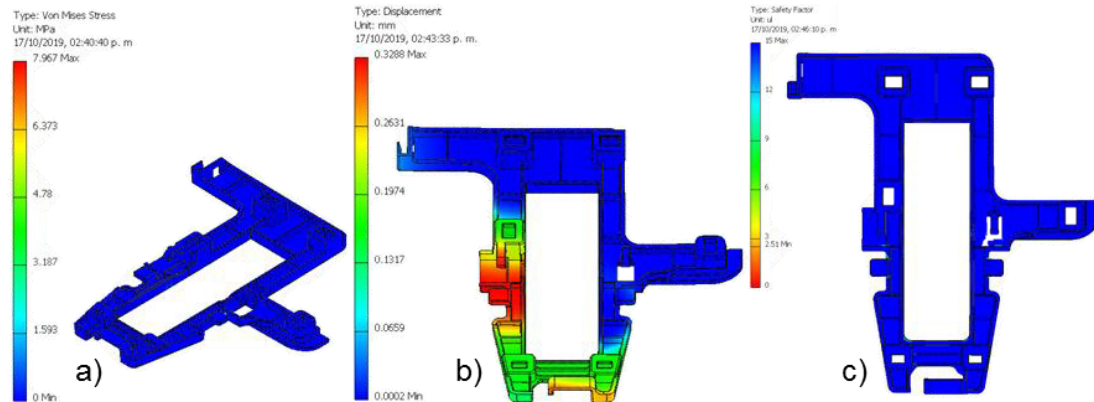


Figura 8-7. Fuerza de agarre en SA1 sin gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Al ver la Figura 8-7 se puede notar que, al momento de aplicar una fuerza de agarre de 40 N en la pieza, sin el efecto de la gravedad, se tiene un esfuerzo de 7.967 MPa, un desplazamiento de 0.3288 mm y un factor de seguridad de 2.51. La importancia de estos datos recae en el factor de seguridad el cual cuenta con un valor arriba de 2, siendo un valor de 2 o mayor el recomendado en muchos casos de diseño estructural.

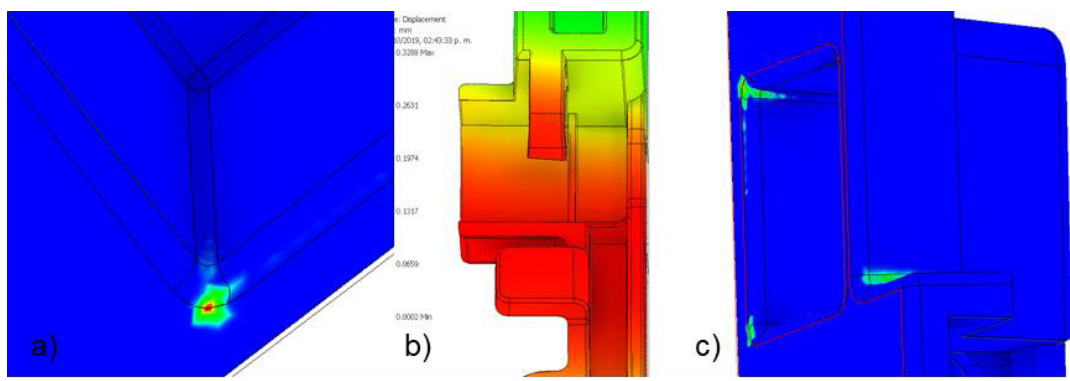


Figura 8-8. Zonas de impacto con fuerza de agarre en SA1 sin gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Al aplicar la fuerza de agarre, las zonas de alto impacto mostradas en la Figura 8-8 son en las esquinas interiores del SA1 en esfuerzos y en los desplazamientos es en una de las zonas aledañas en donde se aplicó la fuerza de 20 N.

### 8.3.1.1.2. Con gravedad

En el caso de sin gravedad para SA1 se comparó con el de con gravedad que se tiene representado en la Figura 8-9.

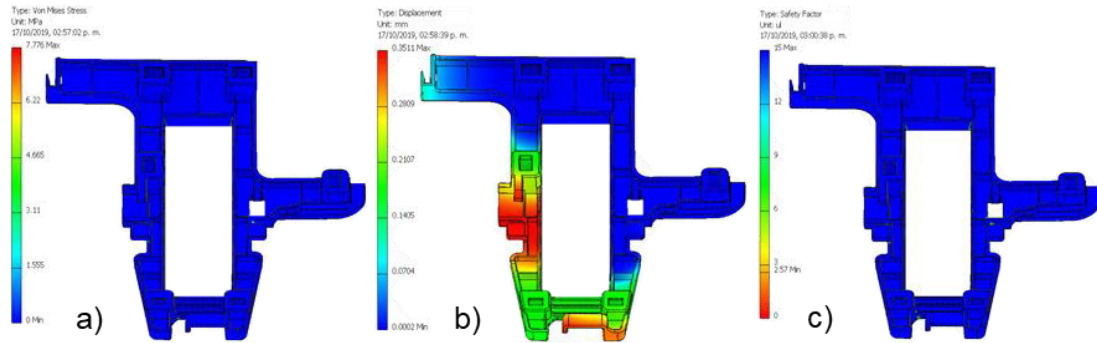


Figura 8-9. Fuerza de agarre en SA1 con gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Al emplear la gravedad con MF<sub>3</sub> en SA1 se observó que el esfuerzo disminuyó quedando en 7.776 MPa, los desplazamientos aumentaron a 0.3511 mm y, al disminuir el esfuerzo, el factor de seguridad aumentó a 2.57.

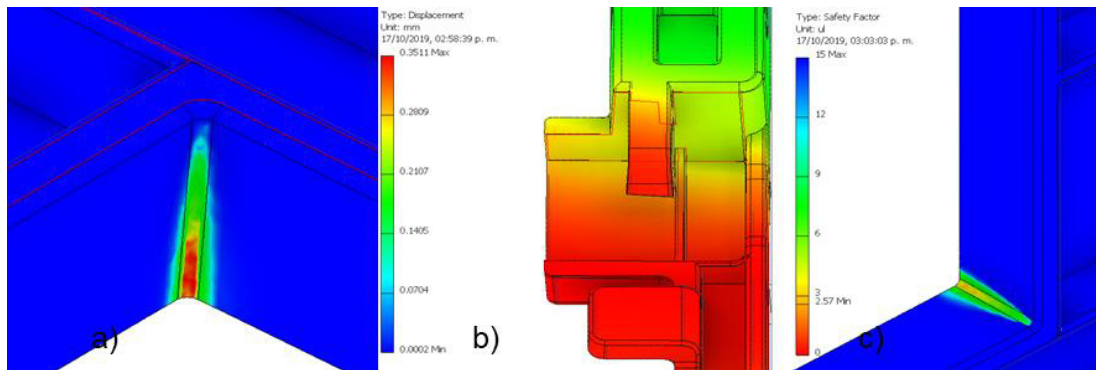


Figura 8-10. Zonas de impacto con fuerza de agarre en SA1 con gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Al emplear la gravedad las zonas de interés cambiaron, siendo ahora las esquinas de las caras donde se aplica la fuerza de 20 N. Mientras que los desplazamientos se mantienen en la misma zona, ver Figura 8-10.

El agregar la fuerza de gravedad tuvo efectos en los esfuerzos y desplazamientos, por lo que llegó a ser de importancia aplicarlo en las siguientes pruebas al ejercer una fuerza mayor a la de agarre.

### 8.3.1.1.2. Efecto de la fuerza con limitaciones de zona para SA1

#### 8.3.1.1.2.1. Fuerza máxima

Con SA1 se realizó un cambio en la fuerza que se ejerce en las caras, siendo ahora de 117.5 N. Los resultados de la aplicación de esta fuerza se encuentran en la Figura 8-11.

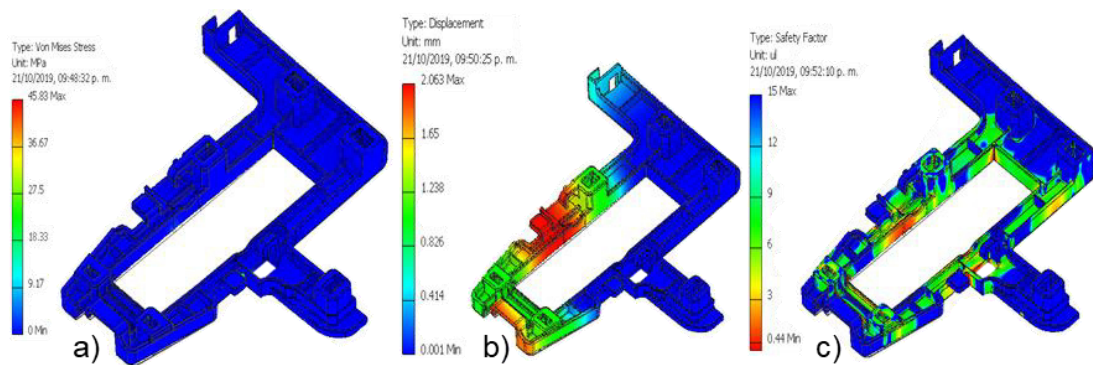


Figura 8-11. Limitación de zona de SA1 con fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Al aumentar la fuerza aproximadamente 6 veces se obtuvo un esfuerzo de 45.83 MPa, un desplazamiento de 2.063 mm y un factor de seguridad de 0.44, en donde el factor de seguridad indica que las deformaciones llegan a ser plásticas al momento de aplicar una fuerza de 117.5 N. En la Figura 8-12 se representan las zonas afectadas al momento de realizar el agarre, éstas son las mismas que al emplear la fuerza de agarre de 40 N.

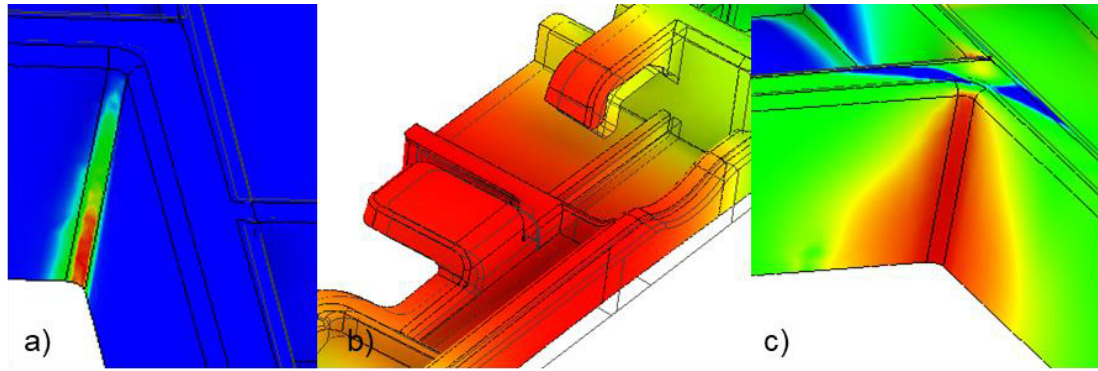


Figura 8-12. Zonas de impacto con limitación de zona de SA1 con fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Al tener esos valores de esfuerzo y desplazamiento al momento de aplicar una fuerza máxima permisible por la agarradera, se realizó enseguida una prueba con el doble de la fuerza máxima usando la limitación de las zonas de agarre en SA1.

### 8.3.1.1.2.2. Doble de fuerza máxima

La prueba se realizó con la fuerza de 235 N en cada cara delimitada, esto se representa en la Figura 8-13, mostrando una diferencia muy alta tanto en esfuerzos como en desplazamientos en comparación a lo mostrado en las Figuras 8-3 c), 8-5 c) y 8-6 c) .

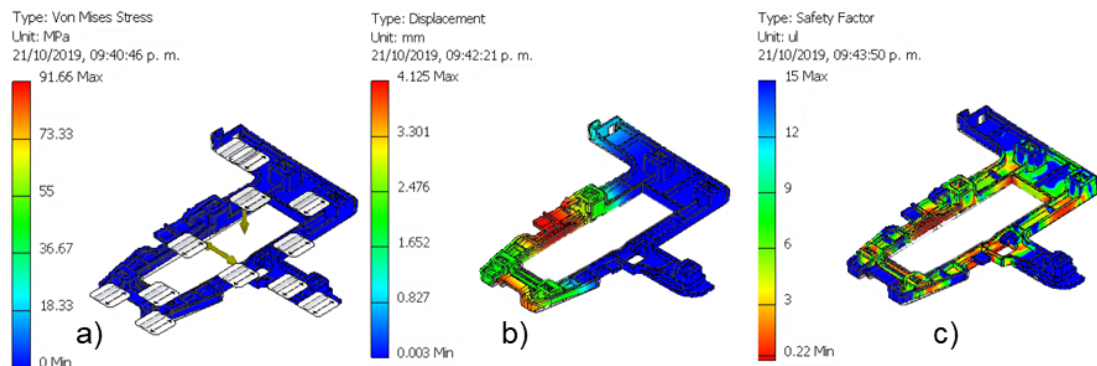


Figura 8-13. Limitación de zona de SA1 con doble de fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Los resultados dieron una disminución a 91.66 MPa para el esfuerzo, 4.125 mm para el desplazamiento y el factor de seguridad aumentó hasta un valor de 0.22. En este caso el efecto de usar una fuerza de 235 N con un área delimitada

presenta un cambio notorio que, al aplicarlo a toda la cara, por lo que es de vital importancia saber el área en la que se realizará el agarre. También con estos datos se denota que el factor de seguridad se encuentra en la zona plástica por lo que, si sucede un accidente en la zona de agarre con esta fuerza, el SA1 quedaría inservible para la aplicación de pegado.

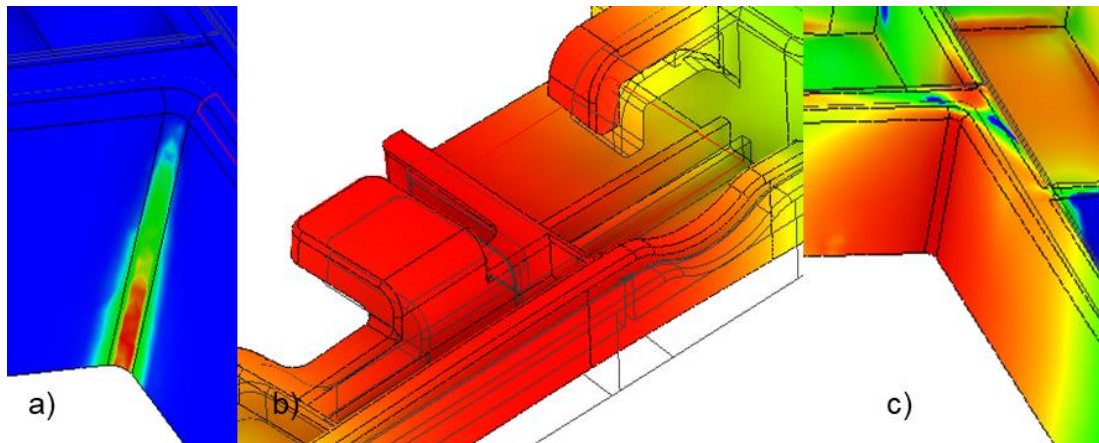


Figura 8-14. Zonas de impacto con limitación de zona de SA1 con doble de fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

En cuestión a las zonas de impacto se siguen manteniendo en los mismos lugares, solo con un aumento del área a causa de aumentar la fuerza.

### 8.3.1.1.3. Efecto de la aceleración en SA1

En esta sección se discuten las simulaciones en las que se desplazó el SA1 de un lugar a otro, en todos los casos se consideró con el efecto de la gravedad, la primera simulación se realizó con una aceleración igual a cero, la segunda con 0.5 veces la aceleración de la gravedad, la tercera fue con la aceleración de la gravedad y, por último, con 3 veces la aceleración de la gravedad.

Las simulaciones se realizaron para conocer si al levantar el SA1 se puede generar más desplazamientos en las zonas aledañas a la zona de agarre y si aumentaban los esfuerzos.

### 8.3.1.1.3.1. Sin aceleración

En la Figura 8-15 se presentan el esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad en SA1 al momento de levantarlo de la mesa solo con el efecto de la gravedad.

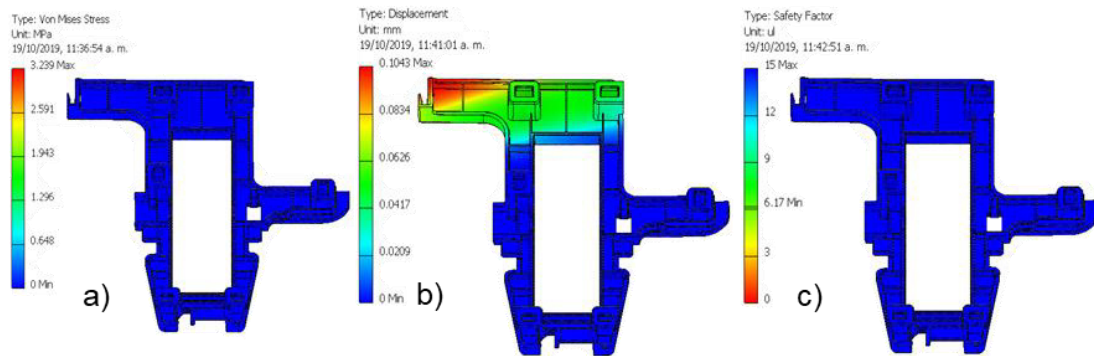


Figura 8-15. Limitación de zona de SA1 sin aceleración a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Al momento de desplazar SA1, el esfuerzo tuvo un valor de 3.239 MPa, el desplazamiento de 0.1043 mm y el factor de seguridad de 6.17.

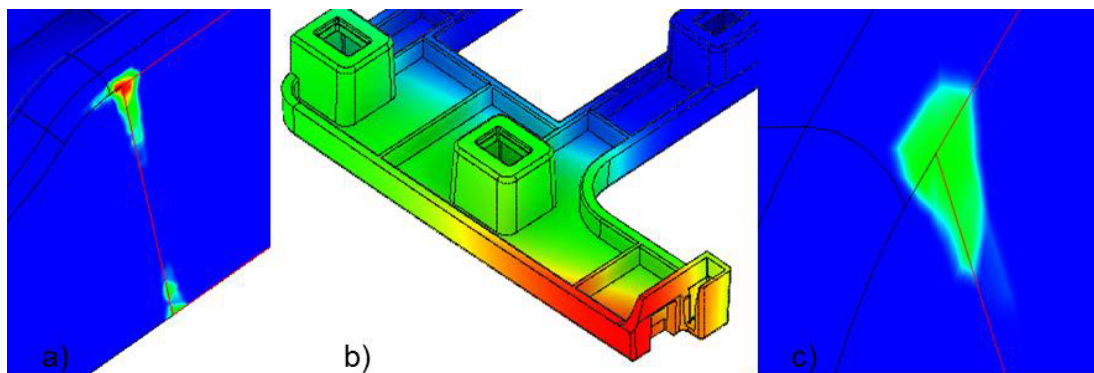


Figura 8-16. Zonas de impacto con limitación de zona de SA1 sin aceleración a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Las zonas de desplazamientos y esfuerzos al momento de trasladar SA1 fueron diferentes a comparación de las simulaciones realizadas con MF<sub>3</sub>, ahora los desplazamientos estuvieron en los extremos de SA1, mientras que los esfuerzos cerca de la zona de agarre.

### 8.3.1.1.3.2. Aceleración de 0.5g

En esta simulación se empleó una aceleración igual a 0.5g, se puede apreciar en la Figura 8-17 que hubo un aumento en los esfuerzos y desplazamientos en SA1.

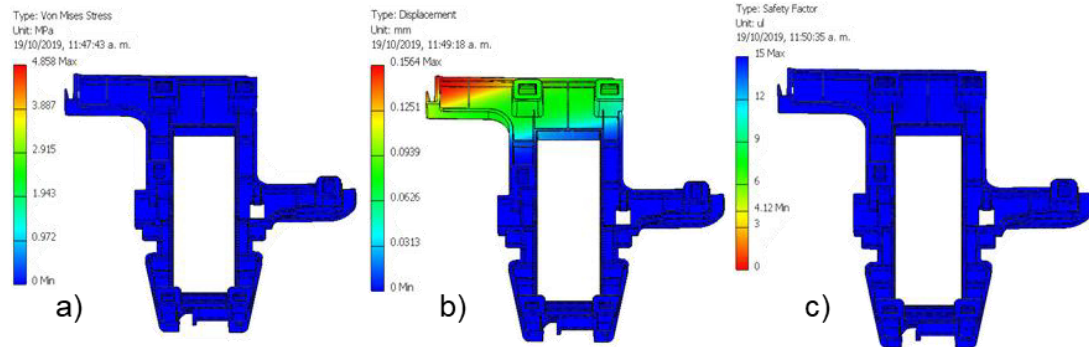


Figura 8-17. Limitación de zona de SA1 con  $a = 0.5g$  a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Los esfuerzos aumentaron hasta 4.858 MPa, los desplazamientos hasta tener un valor de 0.1564 mm y el factor de seguridad disminuyó a 4.12.

### 8.3.1.1.3.3. Aceleración de 1g

En la Figura 8-18 se muestran los resultados obtenidos al aumentar la aceleración hasta el valor de la aceleración de la gravedad, como se puede notar, los esfuerzos y desplazamientos son proporcionales al aumento de la aceleración, mientras que el factor de seguridad es inversamente proporcional.



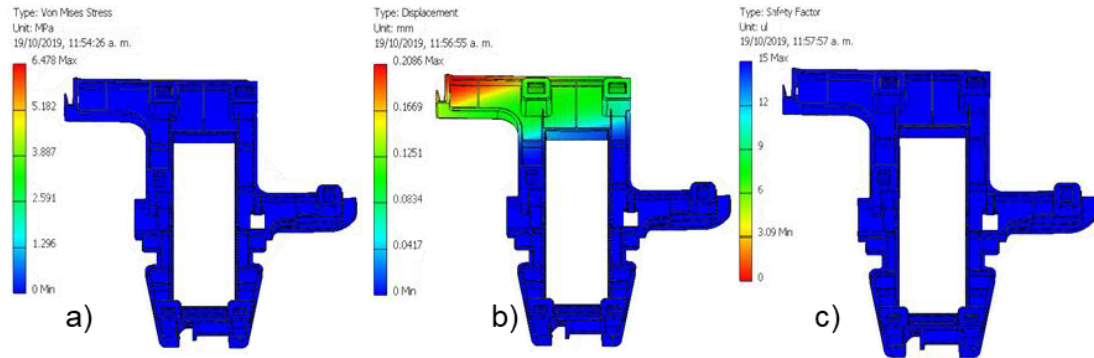


Figura 8-18. Limitación de zona de SA1 con  $a = 1g$  a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Los esfuerzos aumentaron hasta 6.478 MPa, los desplazamientos hasta 0.2068 mm y el factor de seguridad disminuyó hasta 3.09.

#### 8.3.1.1.3.4. Aceleración de 3g

Al aumentar la aceleración a tres veces la de la gravedad, se puede notar en la Figura 8-19, el factor de seguridad tuvo un valor no muy favorable para el proceso de pegado al momento de trasladarlo.

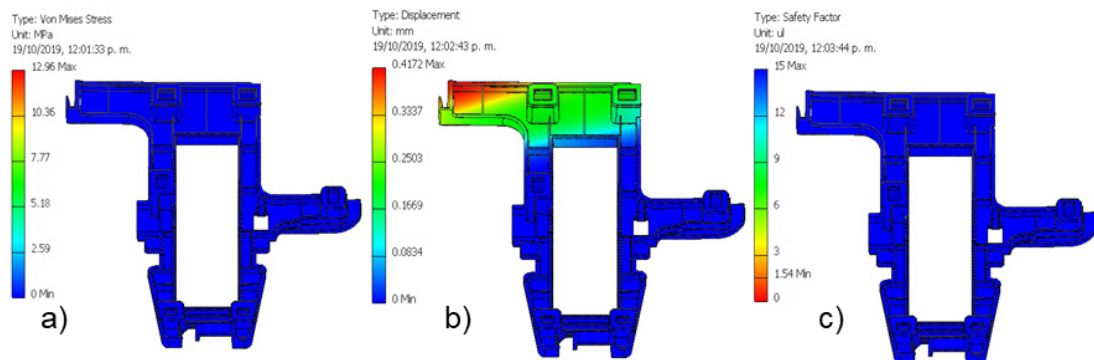


Figura 8-19. Limitación de zona de SA1 con  $a=3g$  a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Los esfuerzos aumentaron a 12.96 MPa provocando que se tuviera un valor de 1.54 en el factor de seguridad, por otra parte, los desplazamientos alcanzaron los 0.4172 mm. Debido a que al aumentar más la aceleración se podían tener factores de seguridad de 1 o menor se detuvieron las simulaciones en este punto para SA1 y se procedió a realizar las mismas simulaciones en SA2.

### 8.3.1.2. SA2

A diferencia de SA1, SA2 tiene varias secciones en su figura debido a la restauración de geometrías, por lo que se aplicó una fuerza de 235 N en la zona seccionada donde se haría el agarre. Los esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad se presentan en la Figura 8-20.

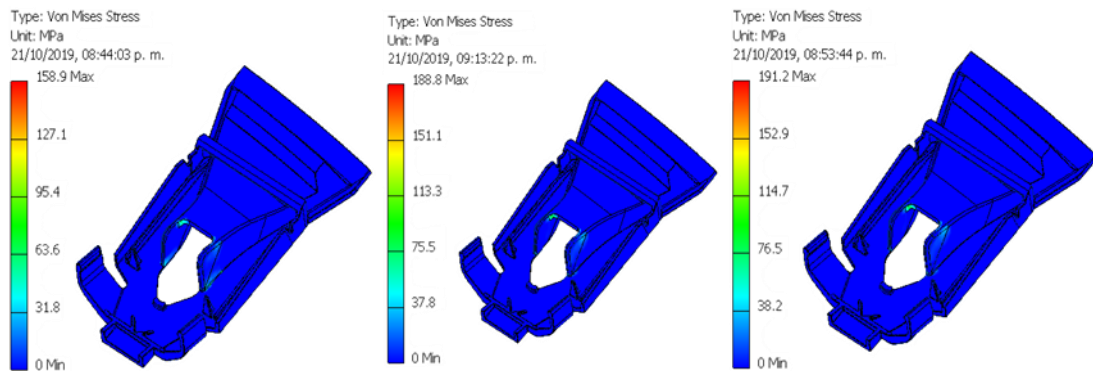


Figura 8-20. Esfuerzos de SA2 a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>.

Los esfuerzos presentados en la Figura 8-20 muestran un valor de 158.9 MPa para MF<sub>1</sub>, 188.9 MPa para MF<sub>2</sub> y 191.2 MPa para MF<sub>3</sub>. Estos valores tan altos de esfuerzos se concentran en ciertas regiones representadas en la Figura 8-21. En este caso las regiones fueron diferentes entre MF<sub>1</sub> y MF<sub>2</sub>, pero entre MF<sub>2</sub> y MF<sub>3</sub> eran prácticamente la misma región.

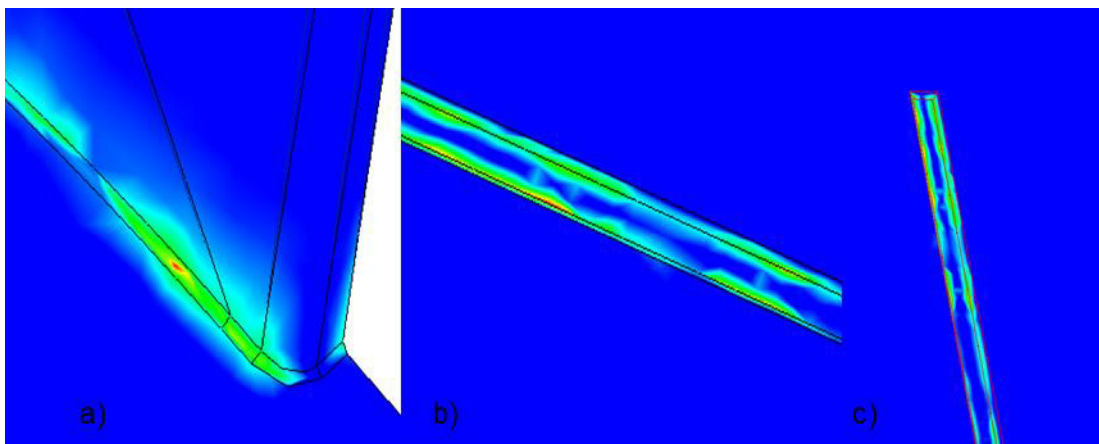


Figura 8-21. Zonas de mayor esfuerzo de SA2 en a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>

El desplazamiento en SA2 presentado en la Figura 8-22 no llegó a tener un gran cambio entre los diferentes tipos de métodos, para MF<sub>1</sub> tuvo un valor de  $41.32 \times 10^{-2}$  mm, para MF<sub>2</sub> el desplazamiento fue de  $62.56 \times 10^{-2}$  mm y para MF<sub>3</sub> de  $62.73 \times 10^{-2}$  mm.

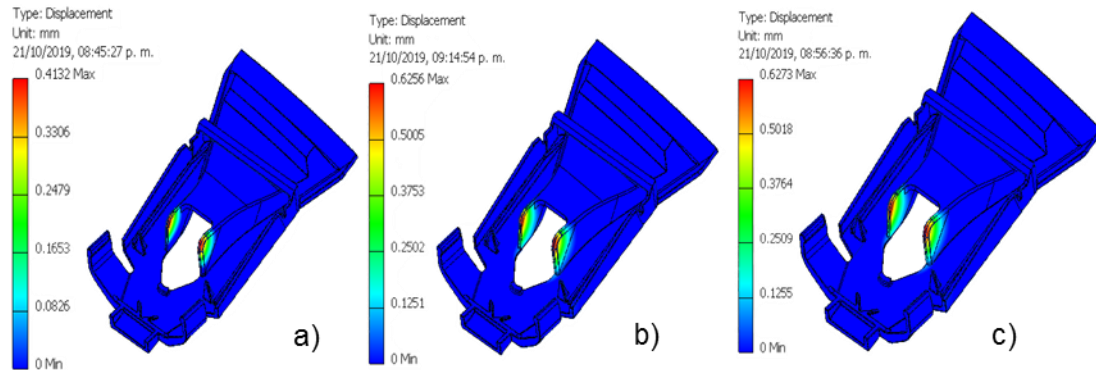


Figura 8-22. Comparación entre los desplazamientos de SA2 entre a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>

Aunque los esfuerzos tuvieron variaciones en los diferentes métodos de fijación, el factor de seguridad no presentó una variación muy significativa. Esto se puede apreciar en la Figura 8-23.

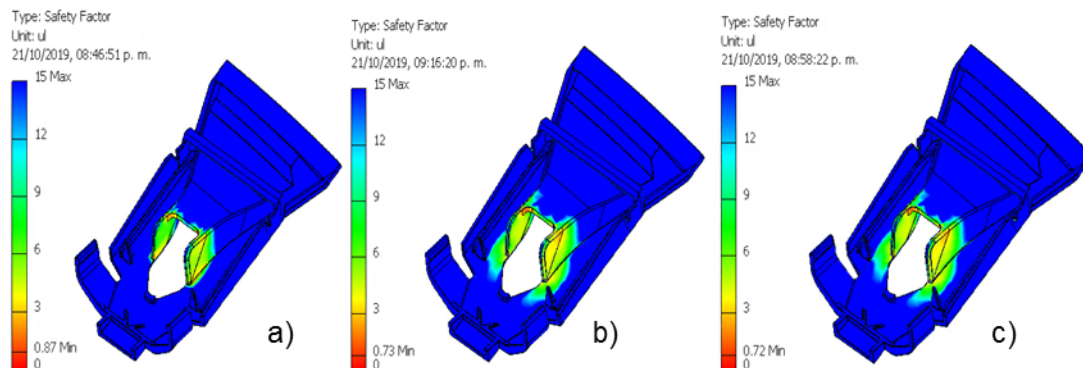


Figura 8-23. Factor de seguridad de SA2 en a) MF<sub>1</sub>, b) MF<sub>2</sub> y c) MF<sub>3</sub>

El que tuvo un mayor factor de seguridad fue el MF<sub>1</sub> con 0.87, seguido del MF<sub>2</sub> con 0.73 y, por último, el MF<sub>3</sub> con 0.72.

### 8.3.1.2.1. Efecto de la gravedad en SA2 con la fuerza de agarre

Se harán simulaciones realizadas en SA1, pero ahora en SA2 haciendo uso de MF<sub>3</sub>, delimitando ahora las zonas de agarre de SA2 con MF<sub>4</sub>. Primero se mostrará el caso sin gravedad.

#### 8.3.1.2.1.1. Sin gravedad

Al usar el MF<sub>3</sub> con una fuerza de 20 N en cada zona de agarre, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 8-24.

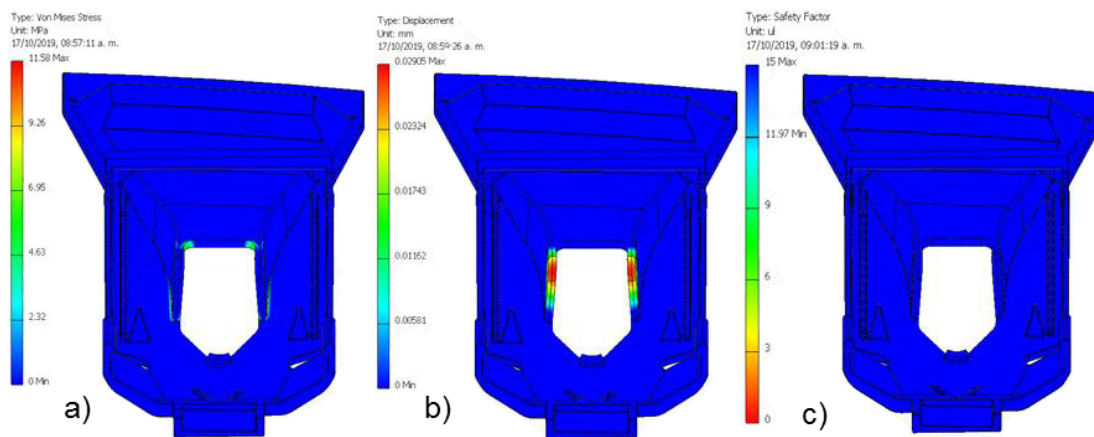


Figura 8-24. Fuerza de agarre en SA2 sin gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Los esfuerzos fueron de 11.58 MPa, desplazamientos de  $2.905 \times 10^{-2}$  mm y factor de seguridad de 11.97. Aún y cuando el esfuerzo resultó mayor que en SA1, debido a que SA2 es de PEI-GF20, se tuvo un factor de seguridad mayor que el de SA1.

#### 8.3.1.2.1.2. Con gravedad

Con la simulación de gravedad el único cambio fue aplicarle la fuerza de gravedad a SA2. Los efectos dados por la gravedad se presentan en la Figura 8-25.

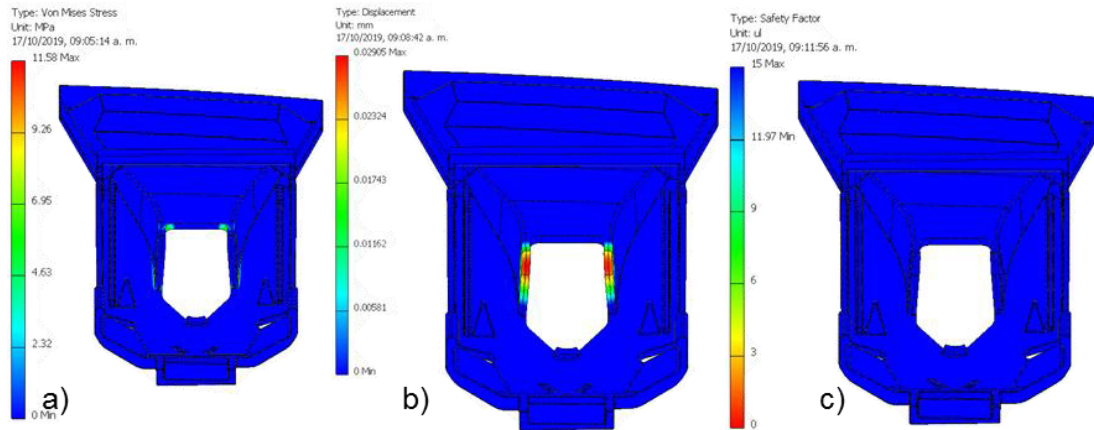


Figura 8-25. Fuerza de agarre en SA2 con gravedad a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

El efecto de la gravedad en SA2, no llegó a mostrar algún cambio en los esfuerzos, desplazamientos ni en el factor de seguridad.

Por lo tanto, se procedió con las simulaciones del efecto que tiene el aumentar la fuerza en las zonas de agarre.

### 8.3.1.2.2. Efecto de la fuerza con limitaciones de zona para SA2

#### 8.3.1.2.2.1. Fuerza máxima

La simulación se realizó con una fuerza de 117.5 N en cada cara de las zonas de agarre delimitadas. En la Figura 8-26 se muestran los resultados para los esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad.

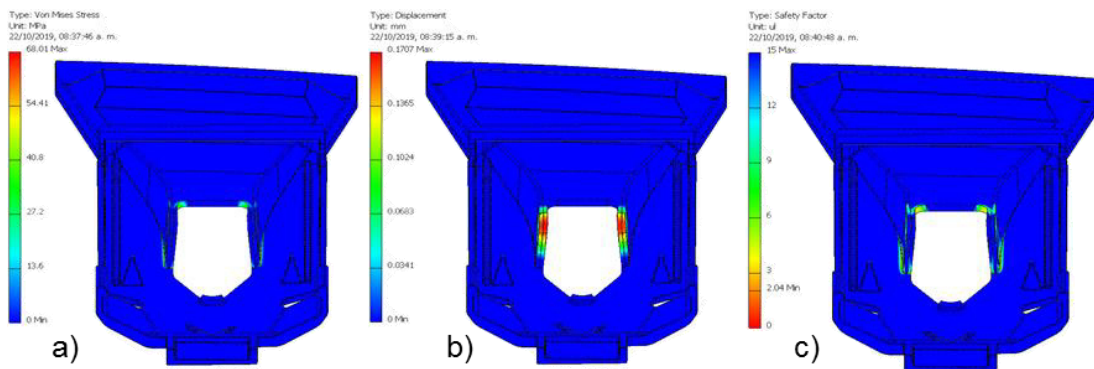


Figura 8-26. Limitación de zona de SA2 con fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

El esfuerzo fue de 68.01 MPa, el desplazamiento de 0.1707 mm y el factor de seguridad de 2.04. En este caso al aumentar la fuerza hasta el límite máximo de la herramienta robótica provocaba una disminución en el factor de seguridad llegando al valor mínimo aceptable, por lo que el aumento de la fuerza debería de deformarlo de manera plástica.

Para verificar si se llegaba a la zona plástica se procedió a aumentar la fuerza hasta 235 N.

### 8.3.1.2.2. Doble de fuerza máxima

En la Figura 8-27 se presentan los resultados para una fuerza de 235 N en cada cara de las zonas de agarre de SA2. Al igual que en SA1, al delimitar las zonas en donde se aplica la fuerza se obtienen resultados diferentes a los mostrados en la sección 8.3.1.2.

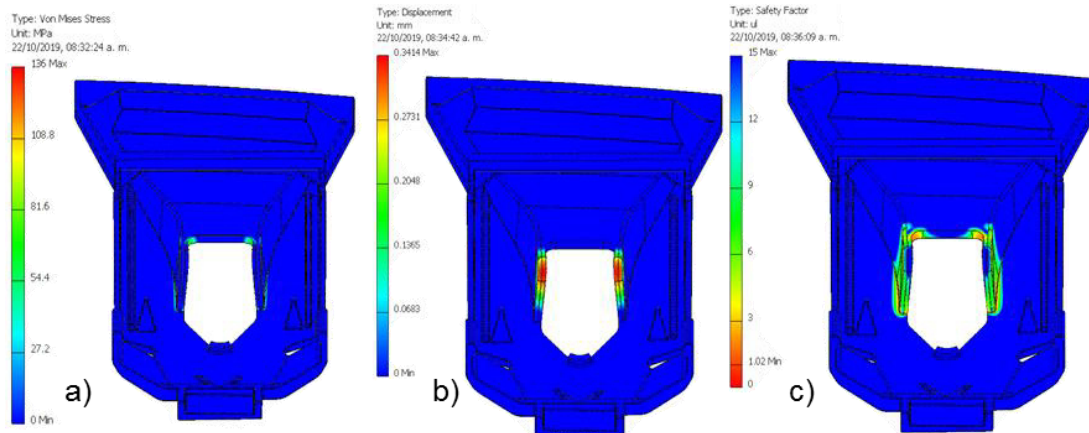


Figura 8-27. Limitación de zona de SA2 con doble de fuerza máxima a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

En SA2 se presentaron esfuerzos de 136 MPa, desplazamientos de 0.3414 mm y un factor de seguridad de 1.02. Al aumentar la fuerza hasta un valor de 235 N, no se paso el límite elástico, por lo que SA2 era completamente funcional ante fuerzas aplicadas en las caras de las zonas de agarre hasta un valor de 235 N, siendo el limitante en este caso el SA1.

### 8.3.1.2.3. Efecto de la aceleración en SA2

De acuerdo con los resultados anteriores la aceleración no debería de afectarle de manera significativa a SA2, para verificar esto se realizaron las simulaciones con las mismas condiciones que en SA1.

#### 8.3.1.2.3.1. Sin aceleración

En la Figura 8-28 se muestran los resultados de esfuerzo y desplazamientos al momento de querer trasladar SA2 de un lugar a otro, el método de fijación ocupado fue MF4.

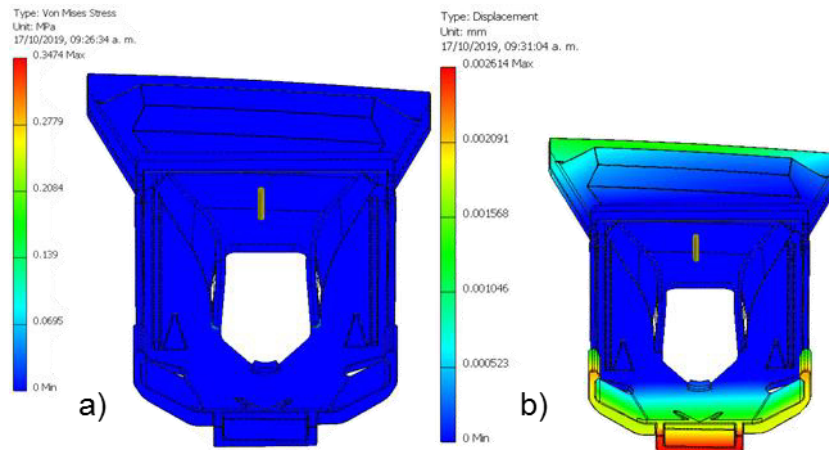


Figura 8-28. Limitación de zona de SA2 sin aceleración a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Al estar suspendido y solo tener el efecto de la gravedad resulta que los esfuerzos son demasiado pequeños siendo de 0.3474 MPa y los desplazamientos en los extremos de SA2 tienen un valor de  $2.614 \times 10^{-3}$  mm.

#### 8.3.1.2.3.2. Aceleración de 0.5g

En la Figura 8-29 se representa la simulación realizada con 0.5g, se puede apreciar un aumento en los valores de esfuerzo y desplazamiento.

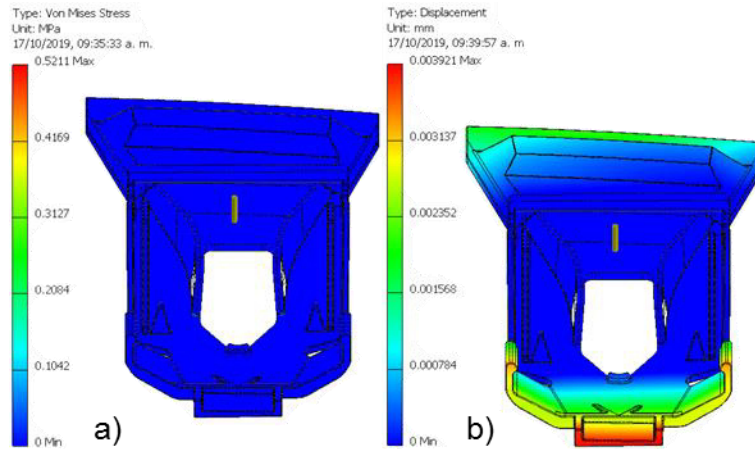


Figura 8-29. Limitación de zona de SA2 con  $a = 0.5g$  a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Con la aceleración de  $0.5g$  se tuvo un esfuerzo de  $0.5211$  MPa y un desplazamiento de  $3.921 \times 10^{-3}$  mm.

### 8.3.1.2.3.3. Aceleración de $1g$

Se aumentó aceleración hasta un valor de  $1g$  y los resultados de la simulación se representan en la Figura 8-30.

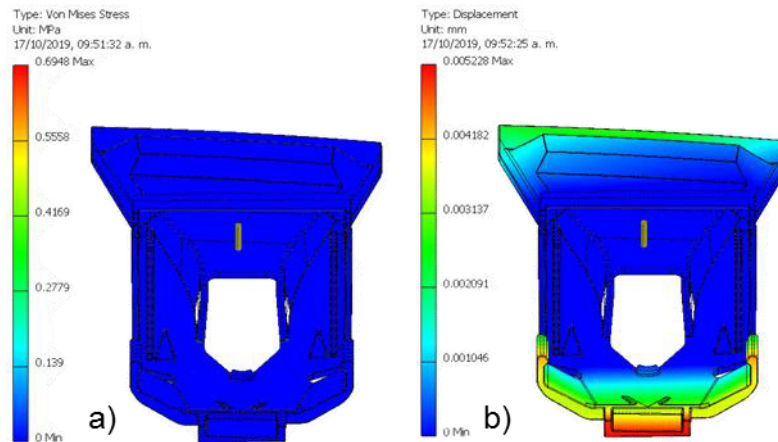


Figura 8-30. Limitación de zona de SA2 con  $a = 1g$  a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los esfuerzos aumentaron a un valor de  $0.6948$  MPa y los desplazamientos de igual manera aumentaron hasta tener un valor de  $5.288 \times 10^{-3}$  mm.



#### 8.3.1.2.3.4. Aceleración de 3g

Se aumentó el valor de la aceleración hasta 3g y los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 8-31.

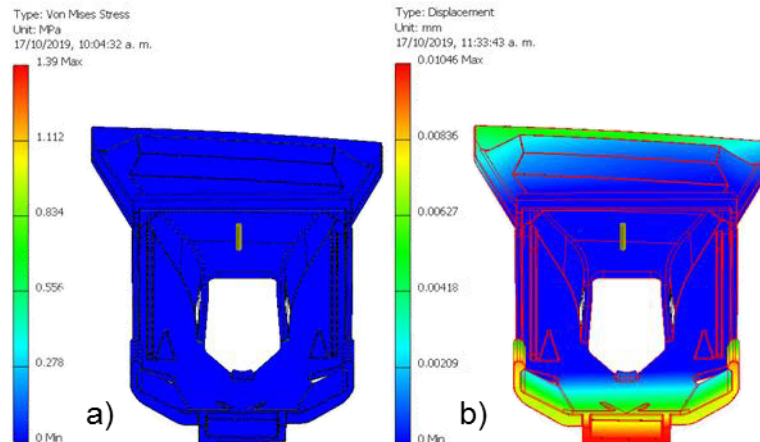


Figura 8-31. Limitación de zona de SA2 con  $a = 3g$  a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Con una aceleración de 3g el esfuerzo llegó a un valor de 1.39 MPa y el desplazamiento aumento a  $10.46 \times 10^{-2}$  mm. Con los resultados mostrados de la aceleración se puede asegurar que ni la fuerza de agarre ni la aceleración afectarán a SA2 y que se debe de trabajar con las limitantes de SA1.

#### 8.3.2. Dedo de herramienta robótica (MF<sub>5</sub>, MF<sub>6</sub> y MF<sub>7</sub>)

Los cambios en el método de fijación influyen más en los esfuerzos que en los desplazamientos. Esos cambios se pueden apreciar en las Figuras 8-32 y 8-33, en ellos se ocupó aluminio 6061 en el dedo de la agarradera.

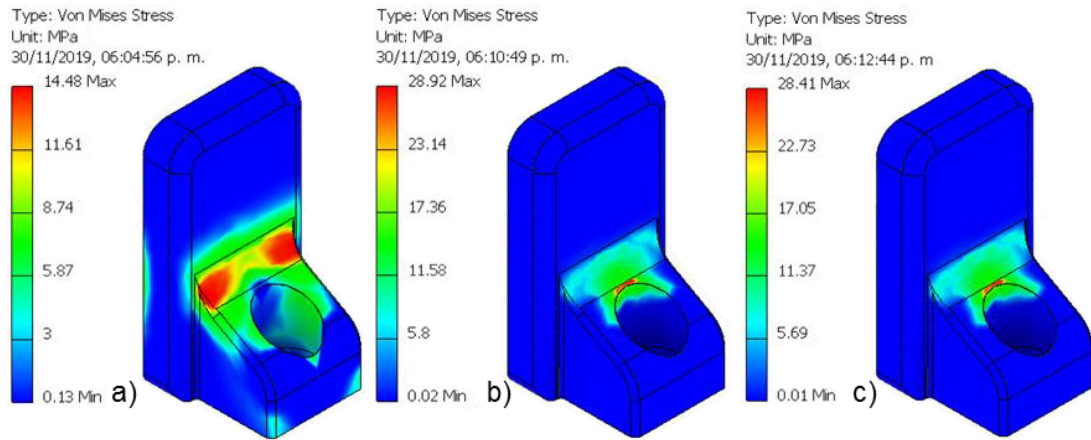


Figura 8-32. Esfuerzos en el dedo de aluminio 6061 con a) MF5, b) MF6 y c) MF7.

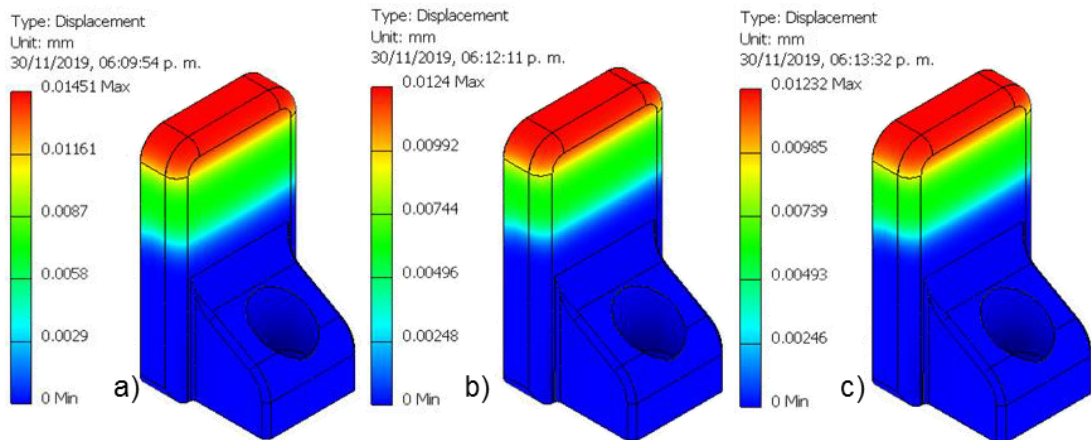


Figura 8-33. Desplazamientos del dedo de aluminio 6061 con a) MF5, b) MF6 y c) MF7.

Al hacer el cambio de MF<sub>5</sub> a MF<sub>6</sub> los esfuerzos aproximadamente se duplicaron y de MF<sub>6</sub> a MF<sub>7</sub> se mantienen prácticamente iguales. En cuestión a los desplazamientos se puede apreciar que solo disminuyen  $2 \times 10^{-3}$  mm aproximadamente de MF<sub>5</sub> a MF<sub>7</sub>, y MF<sub>6</sub> tiene un desplazamiento aproximado a MF<sub>7</sub> por lo que este cambio no es muy significativo. En la Tabla 8-7 se presentan los esfuerzos y desplazamientos para el aluminio 6061 bajo MF<sub>5</sub>, MF<sub>6</sub>, y MF<sub>7</sub>.

Tabla 8-7. Esfuerzos y desplazamientos debido a la fijación del elemento.

	MF <sub>5</sub>	MF <sub>6</sub>	MF <sub>7</sub>
Desplazamiento $10^{-3}$ (mm)	14.51	12.4	12.32
Esfuerzo (MPa)	14.48	28.92	28.41

El MF<sub>7</sub> es la restricción que se apega más a la realidad al momento de realizar el ensamble, el MF<sub>6</sub> o MF<sub>7</sub> pueden ser usados, ya que no muestran una variación alta y servirán para describir de una mejor manera el sistema de esfuerzos en el dedo de la agarradera.

### 8.3.3. Dedo metálico con almohadilla de silicón (MF<sub>7</sub>)

En esta sección se explican los resultados de implementar el método MF<sub>7</sub> en el modelo final del dedo metálico con la almohadilla de silicón bajo una fuerza de 235 N.

Los primeros resultados a mostrar en la Figura 8-34 son los de los esfuerzos que se presentaron en el dedo de la agarradera con los materiales previamente seleccionados: aluminio 6061, acero AISI 4340 242 HR y acero inoxidable AISI 304.

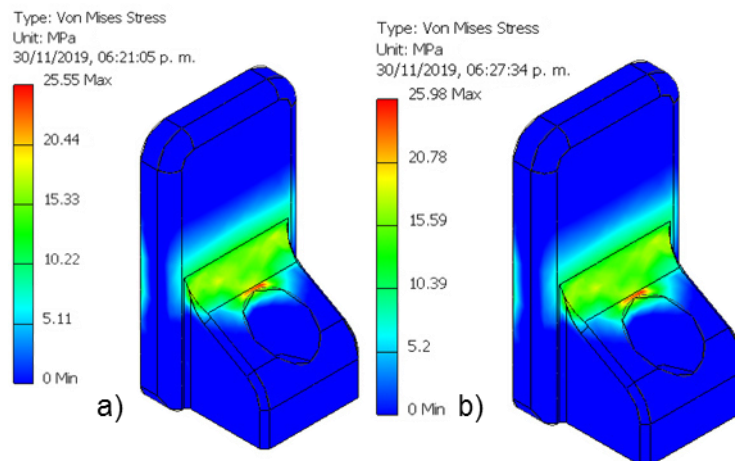


Figura 8-34. Esfuerzos en el dedo con a) aluminio 6061 y acero AISI 4340, y b) acero inoxidable AISI 304.

Para el aluminio 6061 y acero AISI 4340 242 HR el valor máximo de esfuerzo fue de 25.55 MPa y para el acero inoxidable fue de 25.98 MPa. Por lo que el empleo de la almohadilla de silicón disminuyó los esfuerzos en el dedo de la agarradera.

En los desplazamientos solo se presentó una diferencia significativa entre el aluminio 6061 y el acero AISI 4340 242 HR. Los desplazamientos en el dedo metálico se presentan en la Figura 8-35.

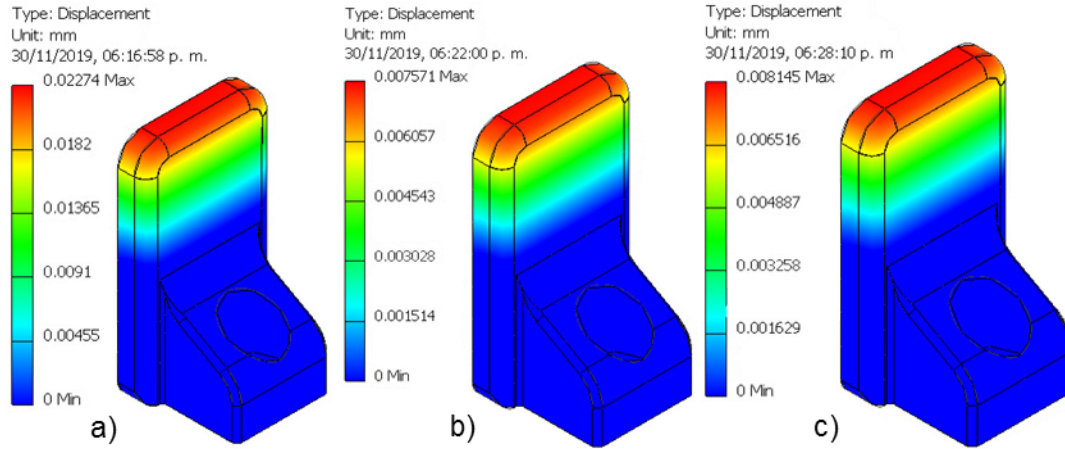


Figura 8-35. Desplazamientos en el dedo con a) aluminio 6061, b) acero AISI 4340 242 HR y c) acero inoxidable AISI 304.

Por la implementación de la goma de silicón aumentaron los desplazamientos, en el aluminio 6061 se presentó un desplazamiento máximo de  $22.74 \times 10^{-3}$  mm, en el acero AISI 4340 de  $7.57 \times 10^{-3}$  mm y en el acero inoxidable AISI 304 de  $8.15 \times 10^{-3}$  mm.

Con la goma de silicón se tuvo que los esfuerzos y desplazamientos llegaron a ser independientes del material del dedo de la herramienta robótica, por lo que en la Figura 8-36 se muestran los valores obtenidos tanto para esfuerzo como para el desplazamiento en la almohadilla de silicón.

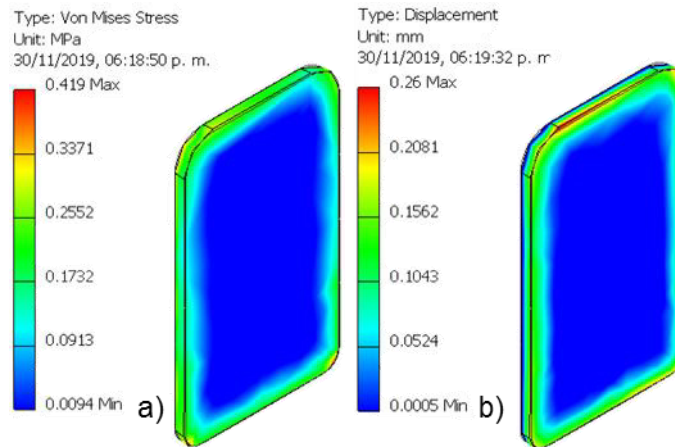


Figura 8-36. Resultados de a) esfuerzos y b) desplazamientos en la almohadilla de silicón.

El valor del esfuerzo en la almohadilla de silicón fue de 0.419 MPa y su desplazamiento es de 0.26 mm.

### 8.3.4. Ensamble (MF<sub>8</sub> y MF<sub>9</sub>)

A los métodos MF<sub>8</sub> y MF<sub>9</sub> utilizados para describir el comportamiento de agarre en los soportes ADAS se les realizó una comparación entre los componentes, para ver si se llegaban a presentar diferencias por el tipo de restricciones. Primeramente, se hizo un análisis de esfuerzos para ambos métodos en el dedo de aluminio 6061, representándose en la Figura 8-37.

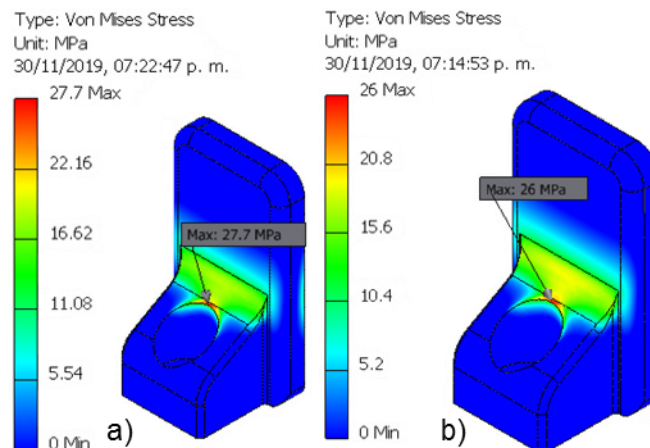


Figura 8-37. Diferencias de esfuerzos en el dedo a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

Los esfuerzos en MF<sub>9</sub> aumentaron en 1.7 MPa en comparación al MF<sub>8</sub>, siendo un valor no tan significativo al cambiar el tipo de restricción.

Por consiguiente, se realizó un análisis de los desplazamientos, esto se representa en la Figura 8-38.

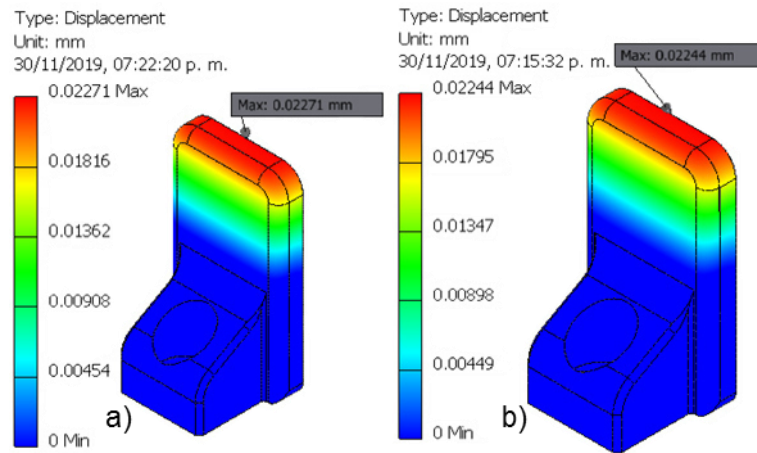


Figura 8-38. Diferencias de desplazamientos en el dedo a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

El aumento en los desplazamientos fue mínimo siendo el aumento de  $2.7 \times 10^{-4}$  mm para MF<sub>9</sub>.

El factor de seguridad apenas disminuyó 0.65 unidades para MF<sub>9</sub>, esto se puede apreciar en la Figura 8-39.

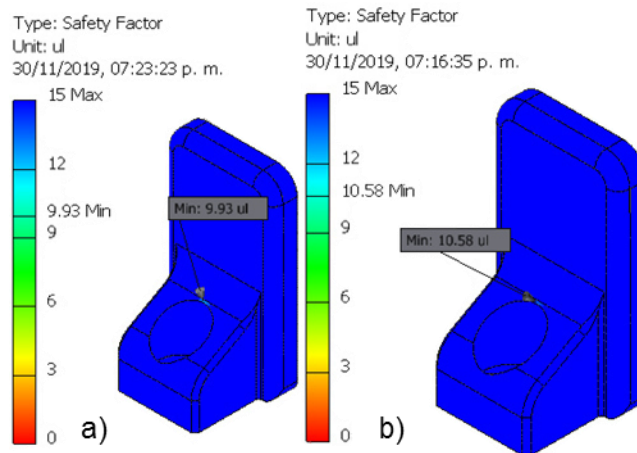


Figura 8-39. Diferencias en el factor de seguridad en el dedo a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

En la almohadilla de silicón no se tuvo alguna diferencia entre ocupar el MF<sub>9</sub> o el MF<sub>8</sub>, los valores de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad se

mantuvieron con valores muy similares o iguales. Los valores se representan en la Figura 8-40.

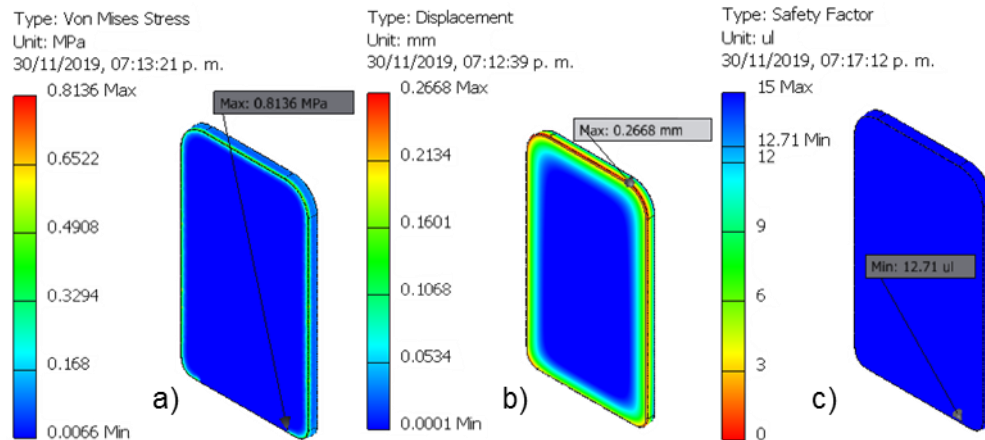


Figura 8-40. Comportamiento de los a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad de la almohadilla de silicón en MF<sub>9</sub> y MF<sub>8</sub>.

Para S3 con MF<sub>9</sub> un aumento apreciable en cuestión al esfuerzo en ciertas zonas a comparación de MF<sub>8</sub>, ese esfuerzo no llegó a afectar la seguridad de la pieza. En la Figura 8-41 se representa los valores de esfuerzo.

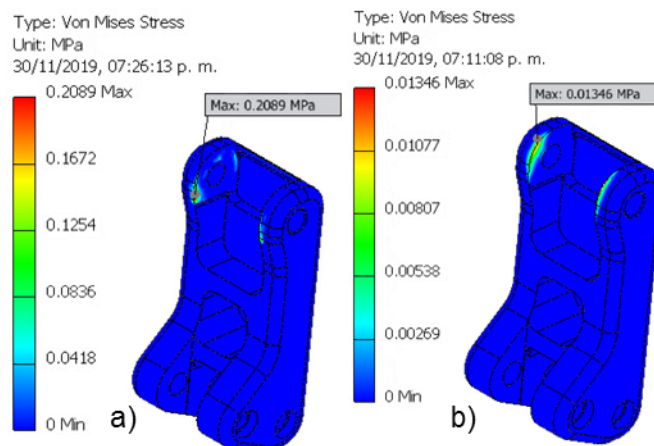


Figura 8-41. Diferencias de esfuerzos en S3 a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

El aumento en el esfuerzo en S3 con MF<sub>9</sub> es de 0.19 MPa aproximadamente en relación a S3 con MF<sub>8</sub>.

Los desplazamientos se concentraron más en una de las zonas de S3, esto se puede apreciar en la Figura 8-42, con MF<sub>9</sub> se tuvo un aumento de  $2.96 \times 10^{-5}$  mm en relación a MF<sub>8</sub>.

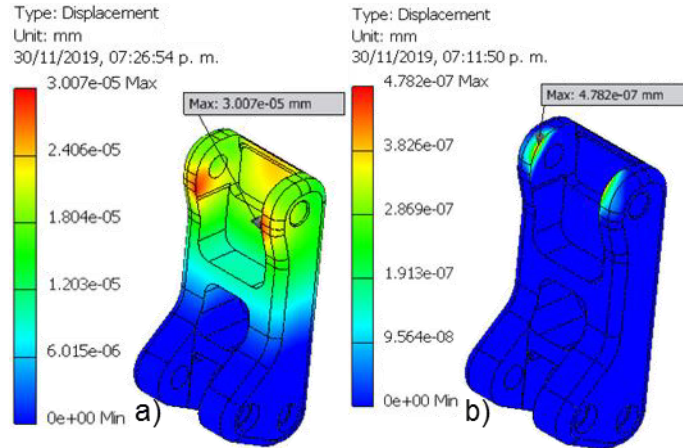


Figura 8-42. Diferencias de desplazamientos en S3 a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

Para S2 los esfuerzos disminuyeron con MF<sub>9</sub>, pero aumentó la zona en la que se tiene una concentración de esfuerzos. Los esfuerzos se representan en la Figura 8-43.

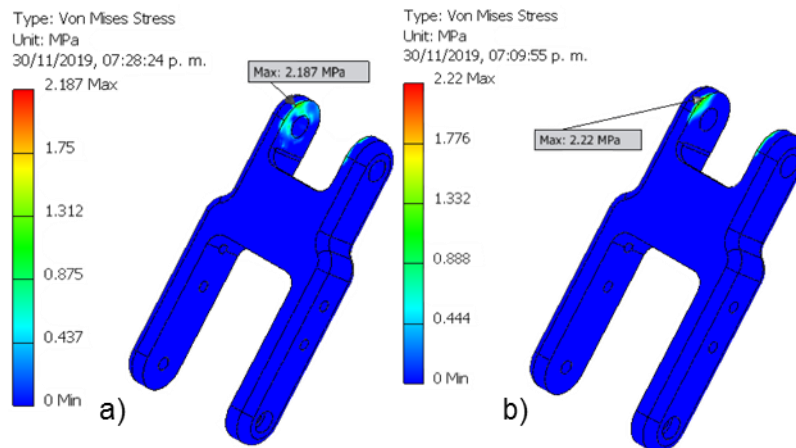


Figura 8-43. Diferencias de esfuerzos en S2 a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

En S2 los esfuerzos no aumentaron, en su lugar existió una disminución en MF<sub>9</sub> de  $3.3 \times 10^{-2}$  MPa con respecto a MF<sub>8</sub>.



Los desplazamientos en S2 con MF<sub>9</sub> se presentaron en una zona más amplia que con MF<sub>8</sub>, esto se demuestra en la Figura 8-44, el aumento del desplazamiento en MF<sub>9</sub> fue de  $1.493 \times 10^{-4}$  mm.

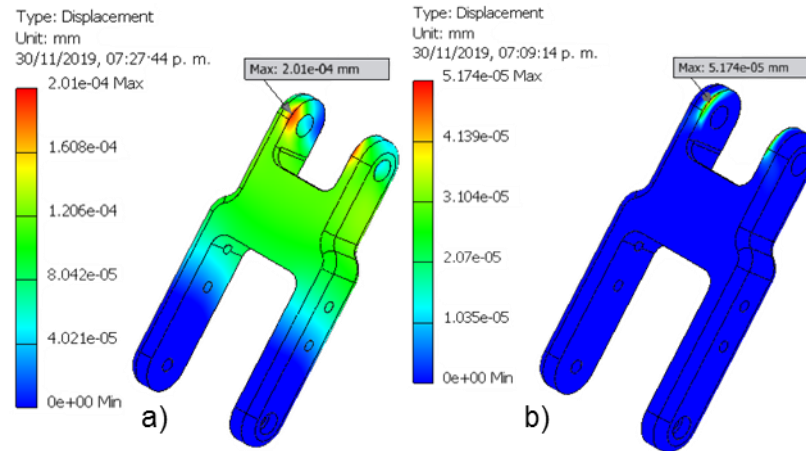


Figura 8-44. Diferencias de desplazamientos en S2 a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

En S1 los esfuerzos no llegan a tener un cambio considerable ya que prácticamente fueron iguales, la diferencia entre MF<sub>9</sub> y MF<sub>8</sub> fue de 0.007 MPa, esto se presenta en la Figura 8-45.

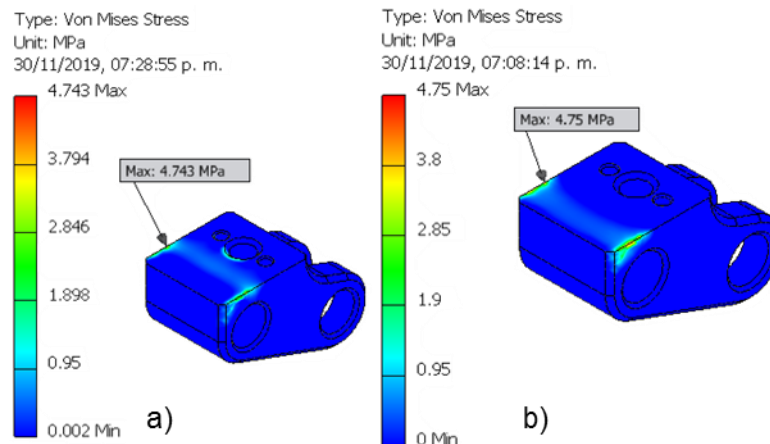


Figura 8-45. Diferencias de esfuerzos en S1 a) MF<sub>9</sub> y b) MF<sub>8</sub>.

Los resultados de esfuerzos y desplazamientos entre ambas fijaciones no llegaron a tener variaciones elevadas, por lo que se puede escoger cualquiera de los métodos para representar el agarre, en caso de que los desplazamientos

lleguen a ser significativos para el proceso se debe de elegir MF<sub>9</sub>. La fuerza ejercida en ambos métodos fue de 235 N.

### 8.3.4.1. Efecto de la apertura.

Al momento de hacer cambios en la posición de la agarradera se toman valores de apertura de 85 mm (abierto), 42.5 mm (media carrera) y 0 mm (cerrado). En las Figuras 8-46 hasta 8-55 se comparan los componentes a diferentes aperturas.

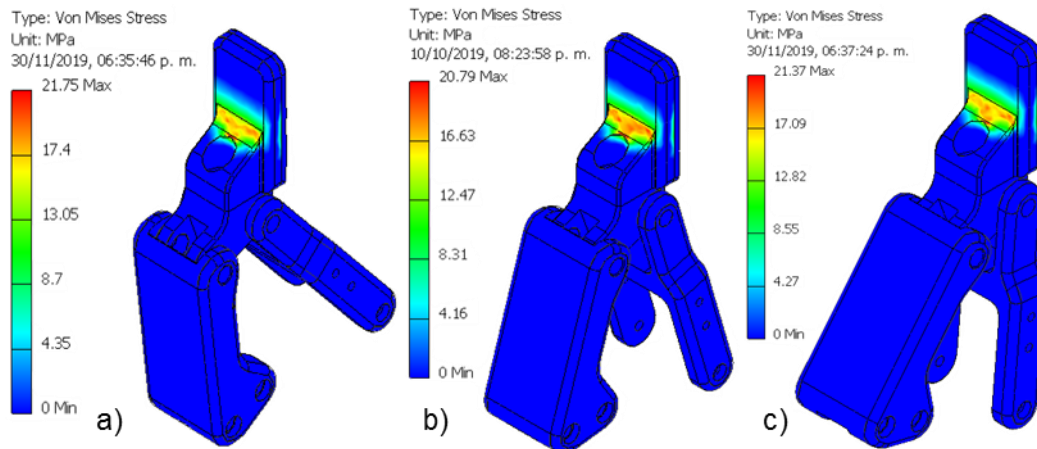


Figura 8-46. Esfuerzos en el dedo con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

En la Figura 8-46 se puede notar que existieron cambios en los esfuerzos del dedo del agarre, pero apenas fueron significativos. Los valores máximos iban desde los 20.79 MPa hasta los 21.75 MPa.

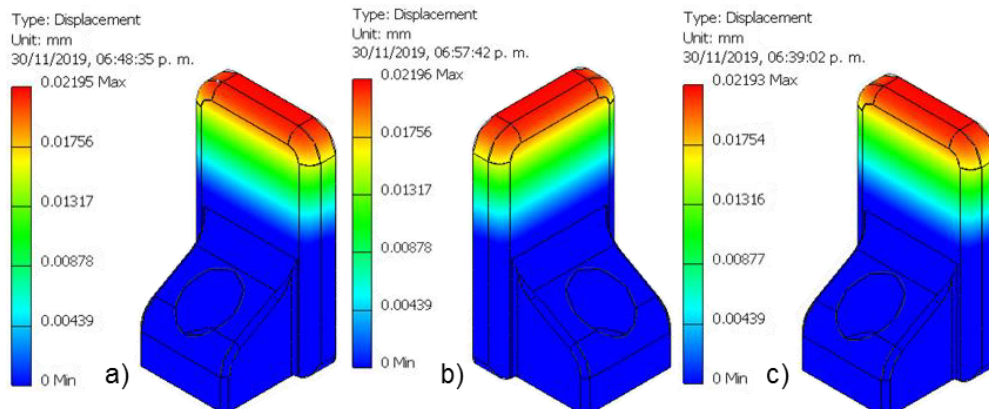


Figura 8-47. Desplazamientos en el dedo con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

En la Figura 8-47 los cambios en los desplazamientos son muy mínimos por lo que se pueden considerar constantes con un valor de  $21.95 \times 10^{-3}$  mm aproximadamente.

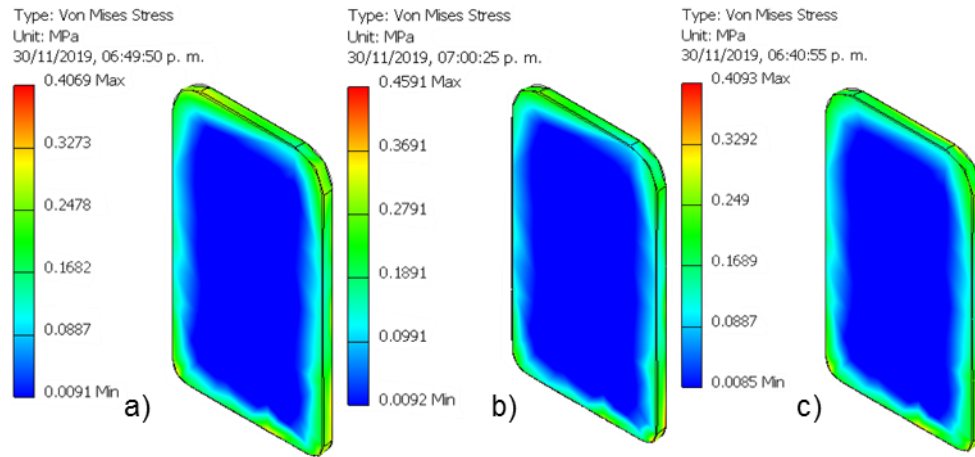


Figura 8-48. Esfuerzos en la almohadilla de silicón con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

En la Figura 8-48 se pudo apreciar que la almohadilla de silicón no tuvo cambios significativos en sus esfuerzos. Los valores fueron desde los 0.4069 MPa hasta los 0.4591 MPa.

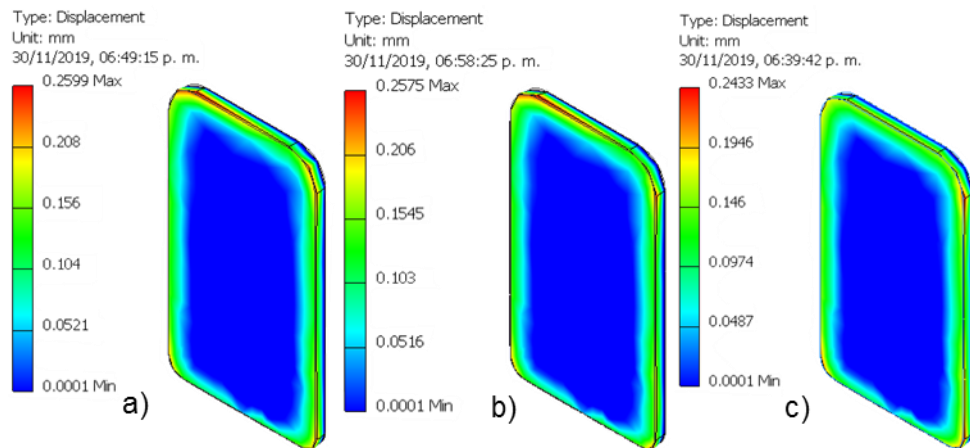


Figura 8-49. Desplazamientos en la almohadilla de silicón con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

Al igual que con los esfuerzos, los desplazamientos representados en la Figura 8-49 no llegaron a tener una variación tan alta entre las diferentes aperturas, los valores estuvieron entre 0.2433 mm y 0.2599 mm.

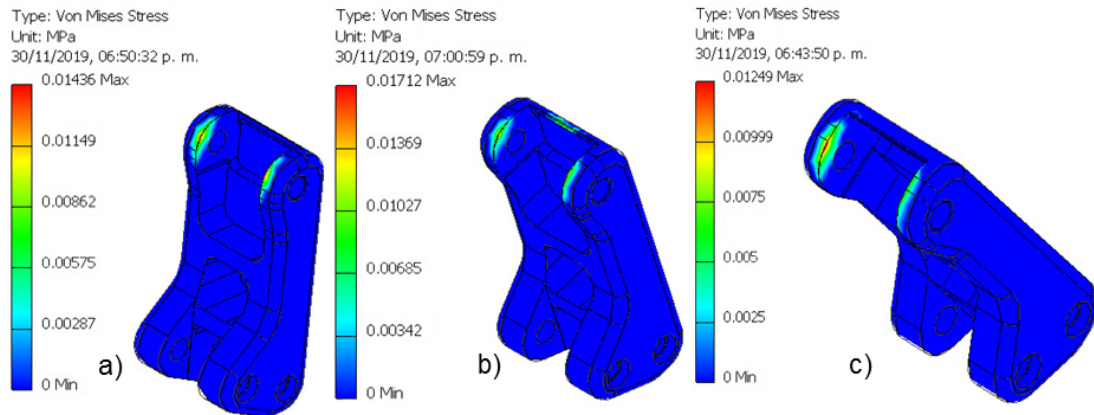


Figura 8-50. Esfuerzos en el S3 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

En la Figura 8-50 los valores de esfuerzo de S3 en diferentes aperturas tienen valores entre  $12.49 \times 10^{-3}$  MPa hasta  $17.12 \times 10^{-3}$  MPa. Los esfuerzos no demostraron cambios significativos.

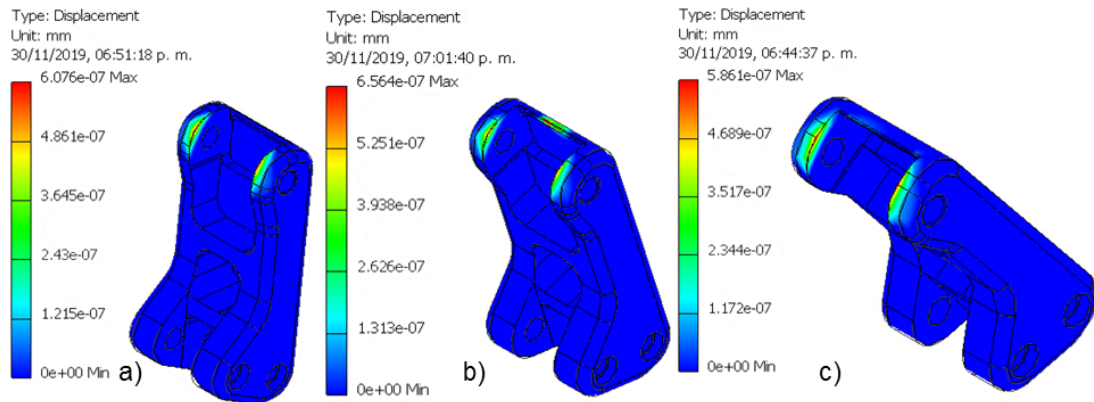


Figura 8-51. Desplazamientos en S3 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

En la Figura 8-51 los valores de desplazamiento para S3 con diferentes aperturas van desde  $5.861 \times 10^{-7}$  mm hasta  $6.56 \times 10^{-7}$  mm. Los desplazamientos se mantuvieron con cambios poco significativos.

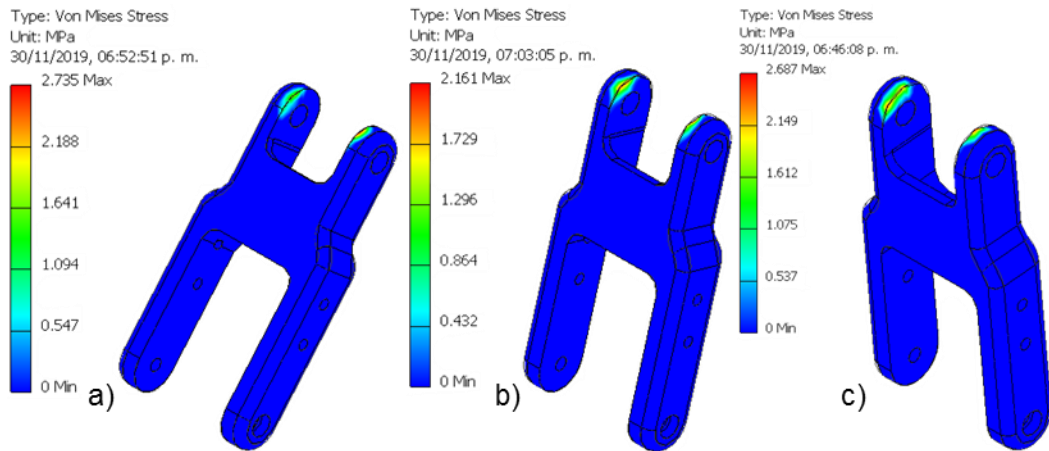


Figura 8-52. Esfuerzos en S2 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

Para la Figura 8-52 los valores de esfuerzo en S2 con diferentes aperturas van desde 2.161 MPa hasta 2.735 MPa. Los cambios en los valores de esfuerzo son poco significativos.

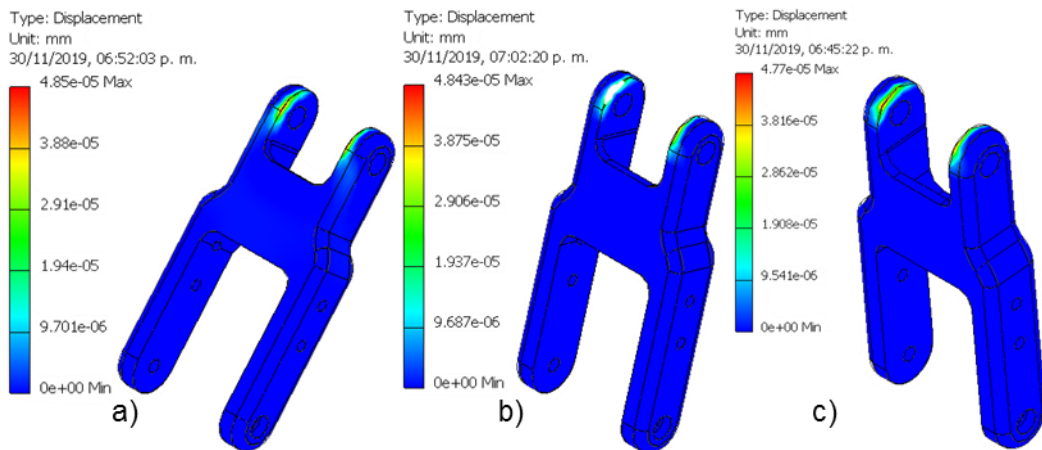


Figura 8-53. Desplazamientos en S2 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

Para la Figura 8-53 los valores de desplazamiento en S2 con diferentes aperturas van desde  $4.77 \times 10^{-5}$  mm hasta  $4.85 \times 10^{-5}$  mm. Los desplazamientos tienen cambios poco significativos.

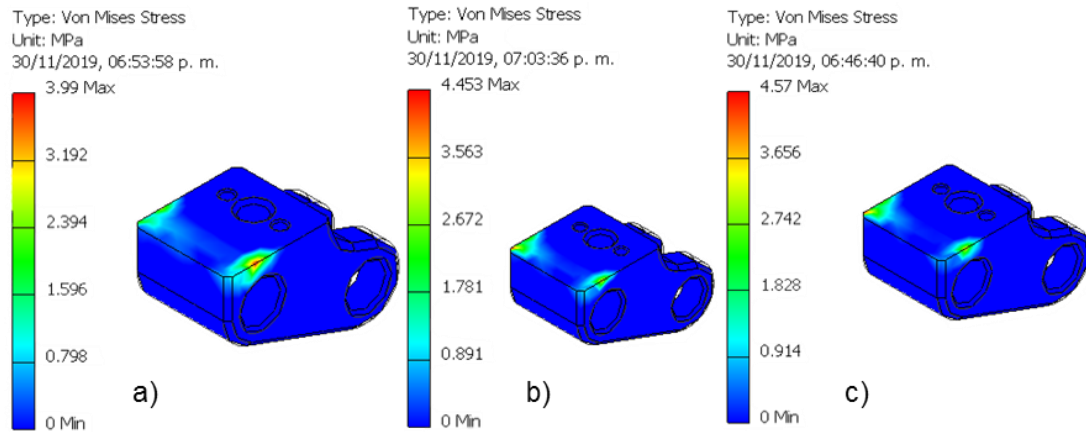


Figura 8-54. Esfuerzos en S1 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

Para la Figura 8-54 los valores de esfuerzo en S1 con diferentes aperturas van desde 3.99 MPa hasta 4.57 MPa. Los valores de esfuerzo tienen cambios poco significativos.

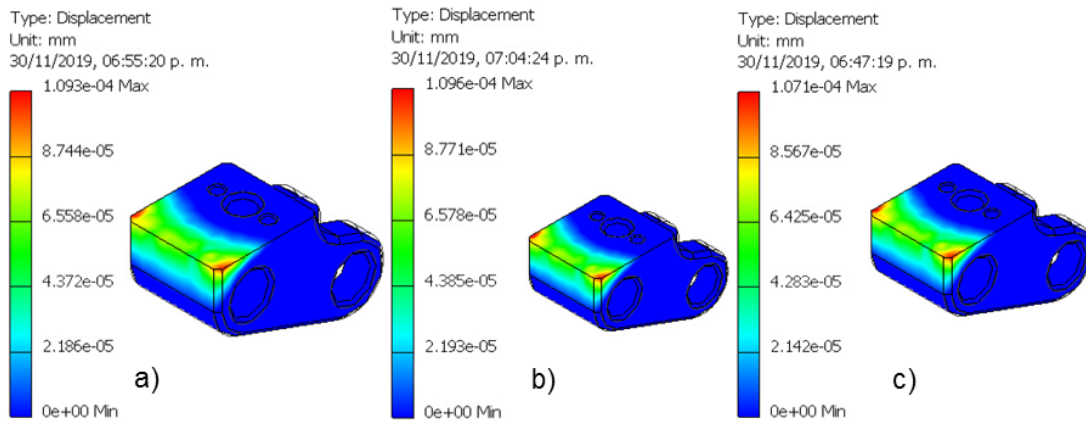


Figura 8-55. Desplazamientos en S1 con diferentes aperturas a) abierto, b) media carrera y c) cerrado.

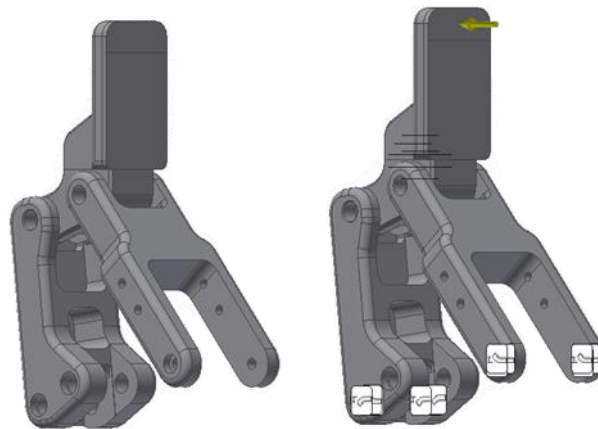
Para la Figura 8-55 los valores de desplazamiento en S1 con diferentes aperturas van desde  $1.093 \times 10^{-4}$  mm hasta  $1.071 \times 10^{-4}$  mm. Los valores de desplazamientos en S1 se mantienen con una variación poco significativa.

Como se pudo apreciar no existió un cambio tan significativo en los esfuerzos y desplazamientos en los componentes de la herramienta robótica cuando se le aplicó una fuerza de 235 N en diferentes posiciones, por lo que cualquier simulación realizada con una posición diferente no tendrá una variación

significativa en el resultado final. También se pudo notar que en las diferentes aperturas existieron diferentes elementos y nodos en la discretización, eso se pudo deber a que se ocupó la malla automática, la malla empleada fue de 1 para el tamaño promedio de los elementos y los demás valores se dejaron por defecto.

#### **8.3.4.2. Efectos de fuerza con limitación en el ensamble para SA1**

La zona delimitada para SA1 se presenta en la Figura 8-56, como se puede apreciar se utilizó el MF<sub>9</sub> debido a los desplazamientos que se pueden generar. El área delimitada consta de 8 mm de altura correspondiente a la altura que tiene la zona de agarre de SA1.



*Figura 8-56. Zona delimitada en la herramienta robótica para SA1.*

Al delimitar la herramienta robótica se procedió a realizar las simulaciones con fuerzas de 235 N, 117 N y 20 N en la zona delimitada.

##### **8.3.4.2.1. Doble de fuerza máxima**

La primera simulación que se realizó fue con una fuerza de 235 N en la zona delimitada, lo primero que se puede notar en la Figura 8-57 es el aumento de los esfuerzos y desplazamientos en el dedo a comparación de lo presentado en la sección 8.3.4

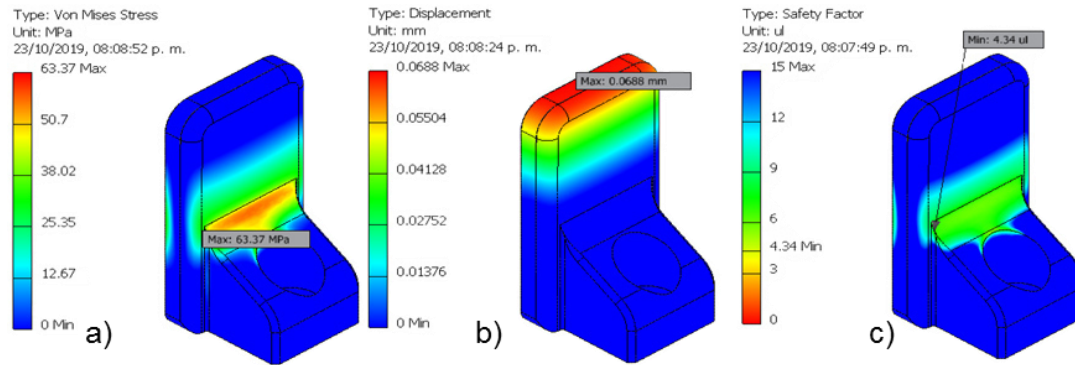


Figura 8-57. Dedo con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

En la zona delimitada del dedo se tuvieron esfuerzos de 63.37 MPa y desplazamientos de  $6.88 \times 10^{-2}$  mm, el factor de seguridad disminuyó hasta un valor de 4.34.

En la Figura 8-58 se presentan los resultados de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad en la almohadilla de silicón.

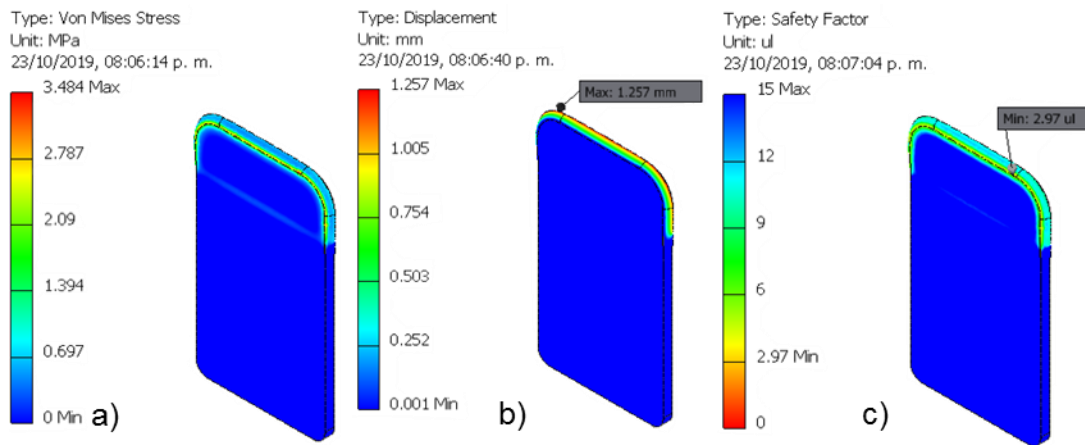


Figura 8-58. Almohadilla de silicón con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

En la almohadilla de silicón se tuvo un esfuerzo de 3.484 MPa, un desplazamiento de 1.257 mm y un factor de seguridad de 2.97. Al tener un factor de seguridad de 2.97, la fuerza de 235 N no deformará la almohadilla de silicón.

En la Figura 8-59 se muestran los resultados de desplazamiento y esfuerzo para S3.



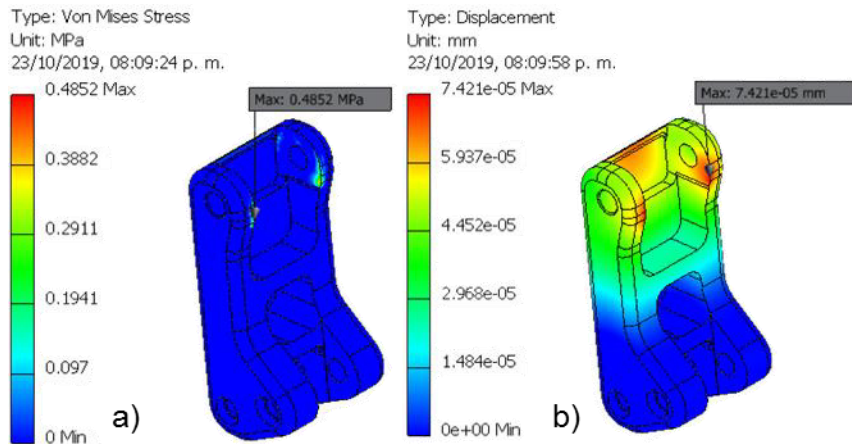


Figura 8-59. S3 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

En S3 se presentó un esfuerzo de apenas 0.4852 MPa y un desplazamiento de  $7.421 \times 10^{-5}$  mm. A diferencia de lo presentando en las otras simulaciones S3, S2 y S1 no llegaron a tener una variación alta en los valores de esfuerzo y desplazamiento. En la Figura 8-60 se presentan los resultados para S2 y en la Figura 8-61 se presentan los resultados de S1.

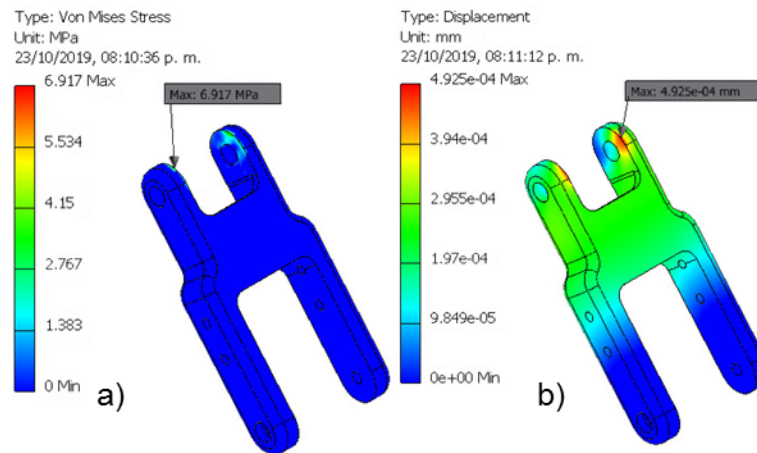


Figura 8-60. S2 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

En S2 se presenta un esfuerzo de 6.917 MPa y un desplazamiento de  $4.925 \times 10^{-4}$  mm.

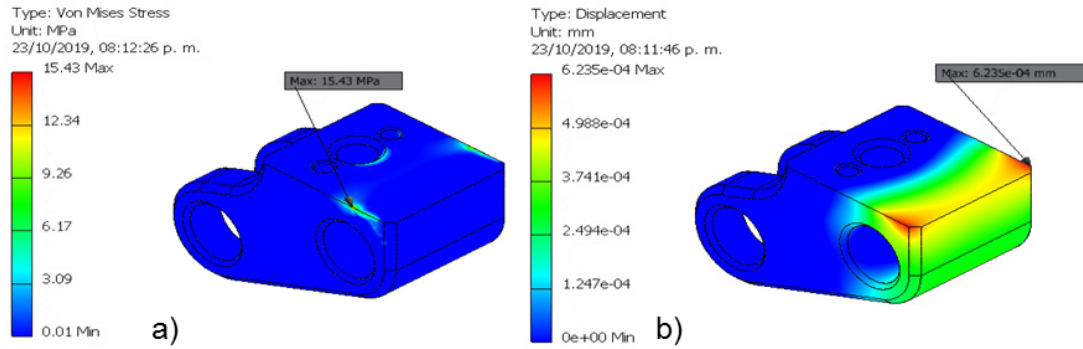


Figura 8-61. S1 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

En S1 se presentó un esfuerzo más elevado en comparación con lo mostrado en la sección 8.3.4, el valor fue de 15.43 MPa y el desplazamiento de  $6.235 \times 10^{-4}$  mm.

### 8.3.4.2.2. Fuerza máxima

En la segunda simulación se cambió la fuerza de 235 N por la de 117.5 N en la misma zona delimitada. En la Figura 8-62 se muestran los resultados obtenidos.

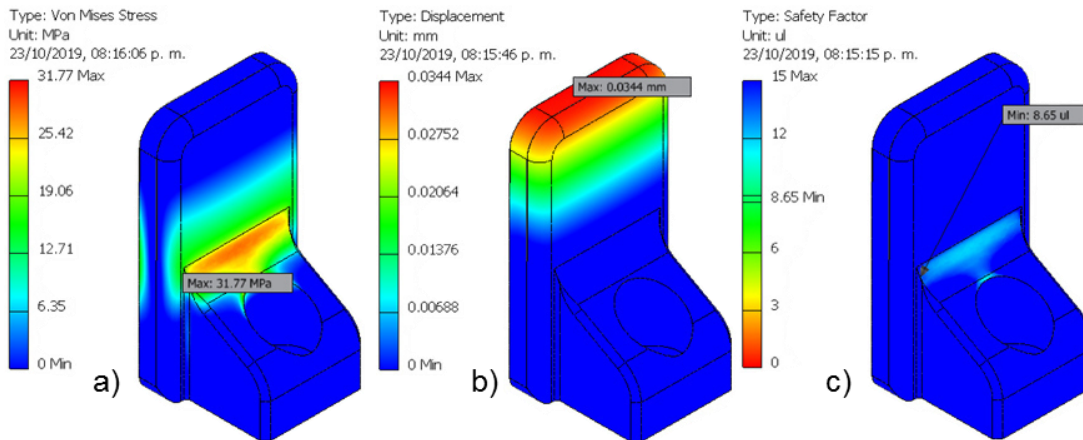


Figura 8-62. Dedo con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

Los esfuerzos en el dedo de la agarradera fueron de 31.77 MPa, el desplazamiento es de  $3.44 \times 10^{-2}$  mm y el factor de seguridad es de 8.65.

En la Figura 8-63 se presentan los resultados de esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad de la almohadilla de silicón.

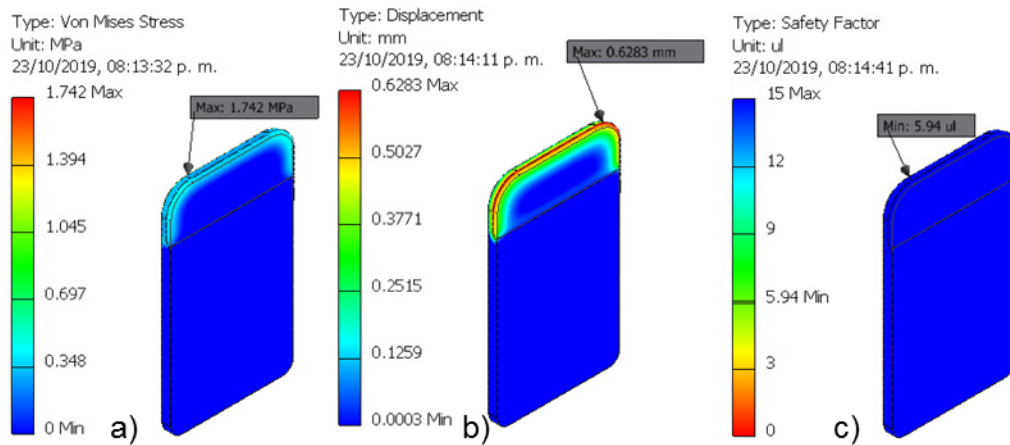


Figura 8-63. Almohadilla de silicón con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

El esfuerzo en la almohadilla de silicón fue de 1.742 MPa, el desplazamiento de 0.6283 mm y el factor de seguridad fue de 5.94.

En la Figuras 8-64, 8-65 y 8-66 se presentan los resultados para S3, S2 y S1, respectivamente.

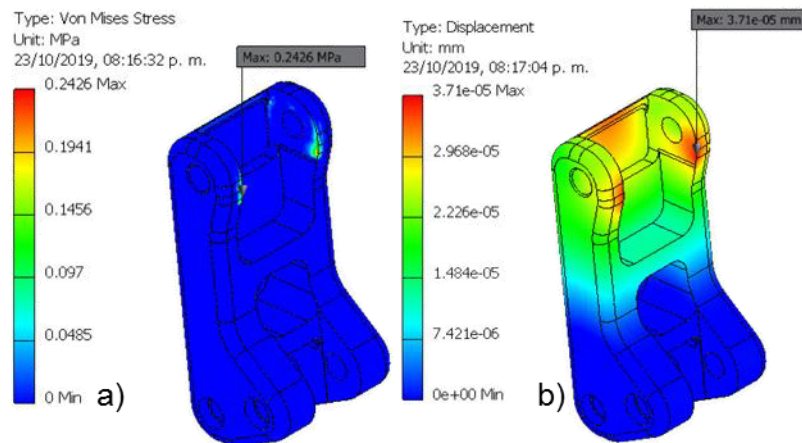


Figura 8-64. S3 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

El esfuerzo fue de 0.2426 MPa y el desplazamiento es de  $3.71 \times 10^{-5}$  mm. Al disminuir la fuerza de aplicación se puede notar que en S3, S2 y S1 empiezan a disminuir los valores de esfuerzo y desplazamiento en las Figuras 8-65 y 8-66.

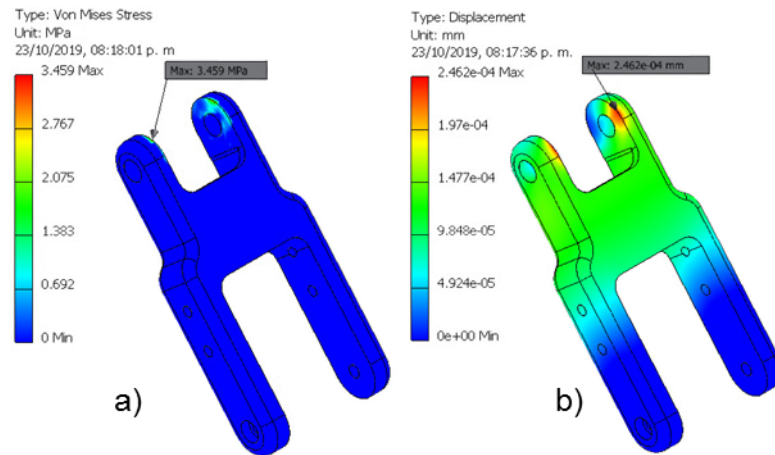


Figura 8-65. S2 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

El esfuerzo en S2 tuvo valores de 3.459 MPa y para el desplazamiento de  $2.462 \times 10^{-4}$  mm.

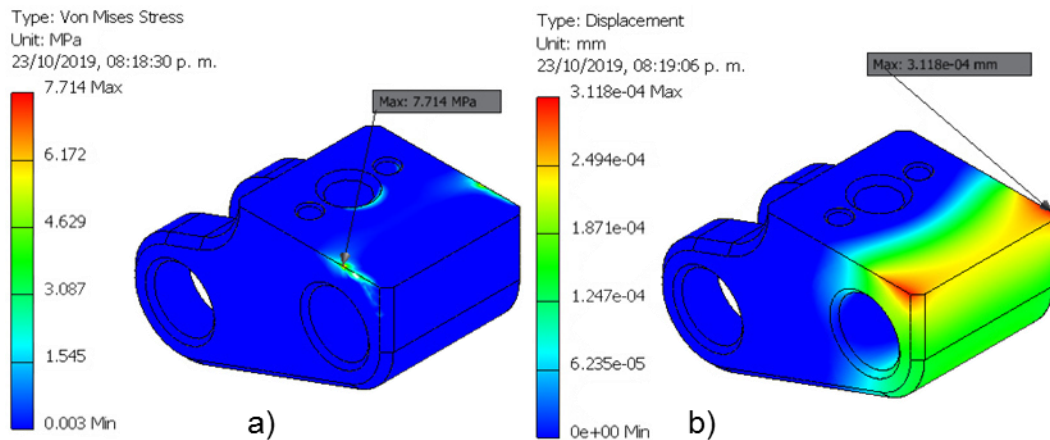


Figura 8-66. S1 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

El esfuerzo en S1 tuvo valores de 7.714 MPa y para el desplazamiento de  $3.118 \times 10^{-4}$  mm.

### 8.3.4.2.3. Fuerza de agarre

La última simulación para la limitación de SA1 fue con la aplicación de una fuerza de 20 N, con ésta se pudieron ver disminuciones en los esfuerzos y desplazamientos, debido a la disminución de la fuerza aplicada en la herramienta. En la Figura 8-67 se presentan los resultados para el dedo de la herramienta.

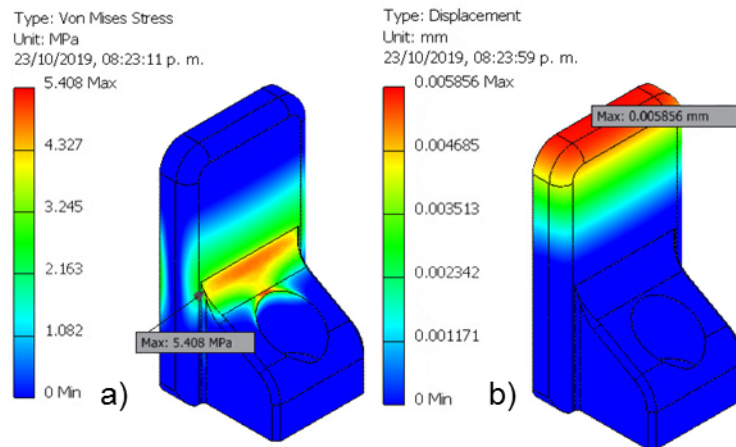


Figura 8-67. Dedo con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

En el dedo de la agarradera los esfuerzos disminuyeron hasta un valor de 5.408 MPa y los valores de desplazamiento disminuyeron hasta un valor de  $5.856 \times 10^{-3}$  mm.

En la Figura-8-68 se presentan los resultados para la almohadilla de silicón.

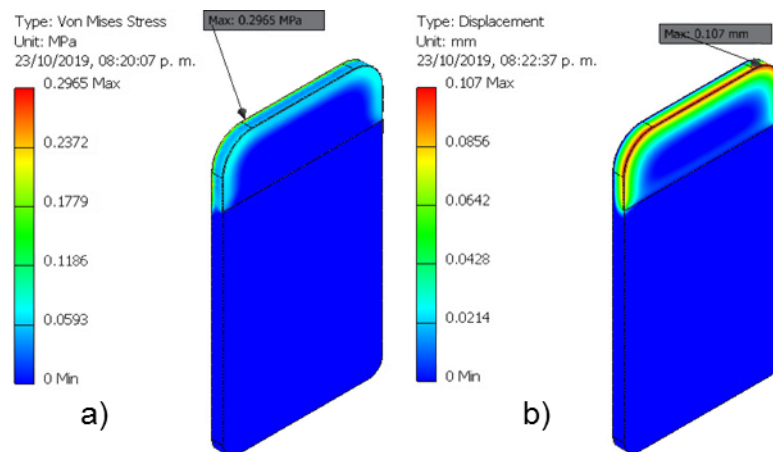


Figura 8-68. Almohadilla de silicón con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los esfuerzos en la almohadilla de silicón disminuyeron hasta un valor de 0.2965 MPa y los desplazamientos llegan a tener un valor de 0.107 mm.

Las Figuras 8-69, 8-70 y 8-71 corresponden a los resultados de esfuerzos y desplazamientos S3, S2 y S1, respectivamente.

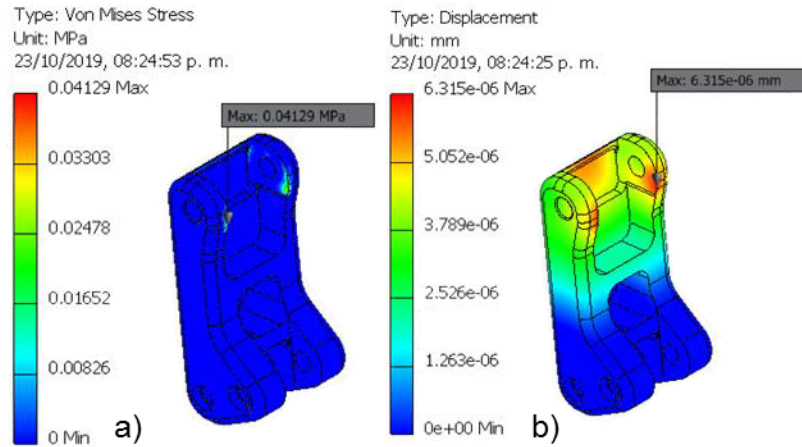


Figura 8-69. S3 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los esfuerzos en S3 quedaron con un valor de  $4.129 \times 10^{-2}$  MPa y un desplazamiento de  $6.315 \times 10^{-6}$  mm.

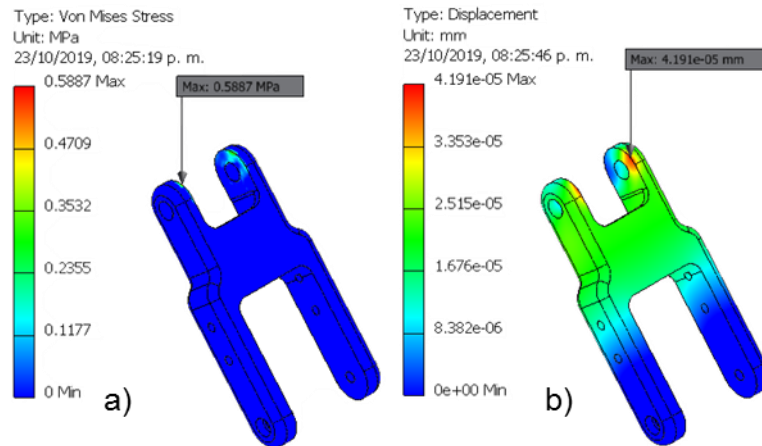


Figura 8-70. S2 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los esfuerzos en S2 disminuyeron hasta un valor de 0.5887 MPa y el desplazamiento tuvo un valor de  $4.191 \times 10^{-5}$  mm.

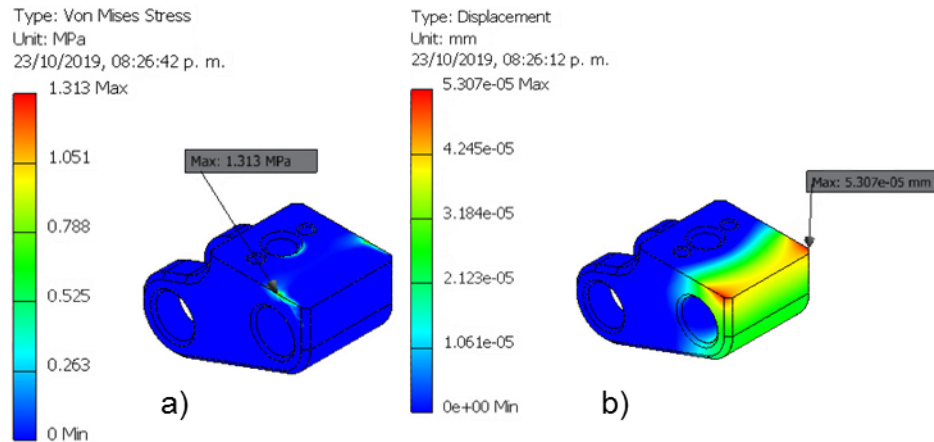


Figura 8-71. S1 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA1 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los esfuerzos en S1 disminuyeron hasta un valor de 1.313 MPa y el desplazamiento tuvo valores de  $5.307 \times 10^{-5}$  mm.

### 8.3.4.3. Efectos de fuerza con limitación en el ensamble para SA2

La segunda zona limitada fue para la zona de agarre de SA2 en donde se tuvo en la zona de contacto un área de 11 mm x 12 mm. La representación de esta área se encuentra en la Figura 8-72.

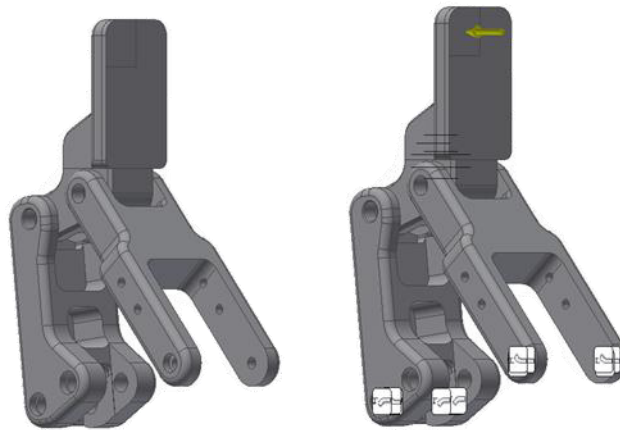


Figura 8-72. Zona delimitada en goma de silicona para SA2.

Al tener la zona delimitada se procedió a realizar las simulaciones con las mismas restricciones de fuerza y métodos de fijación que en SA1.

### 8.3.4.3.1. Doble de fuerza máxima

En la Figura 8-73 se presentan los resultados del esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad para el dedo de la agarradera.

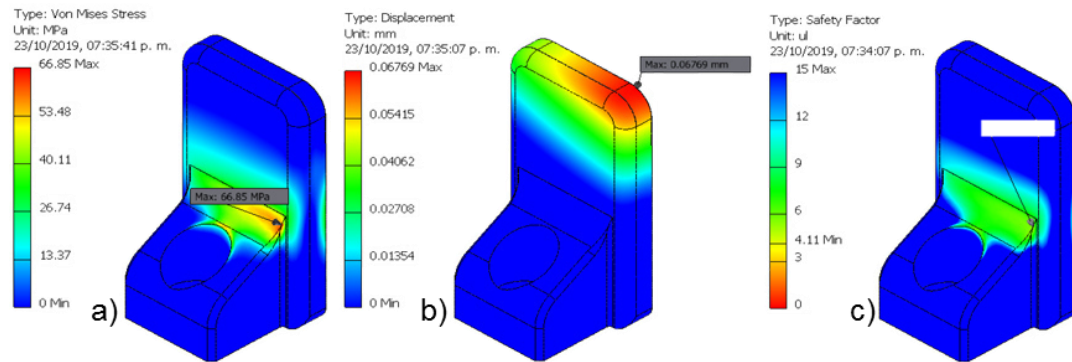


Figura 8-73. Dedo con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

En el dedo de la agarradera se presentó un esfuerzo de 66.85 MPa, un desplazamiento de  $6.769 \times 10^{-2}$  mm y un factor de seguridad de 4.11. La zona del desplazamiento se concentró en la zona en la que se ejerció la fuerza de 235 N.

Los esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad en la almohadilla de silicón con una fuerza de 235 N se presentan en la Figura 8-74.

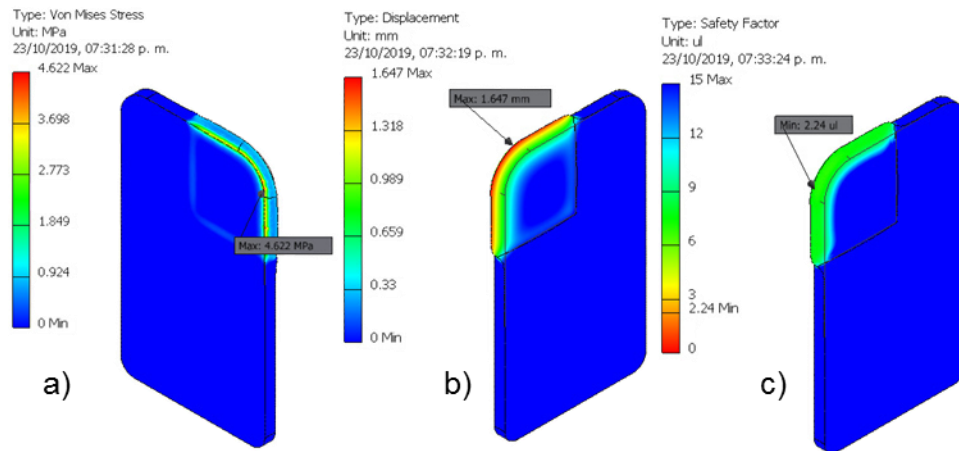


Figura 8-74. Almohadilla de silicón con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

El esfuerzo en la almohadilla de silicón fue de 4.622 MPa, se tuvo un desplazamiento de 1.647 mm y un factor de seguridad de 2.24. El desplazamiento



fue mayor al espesor que tiene la goma de silicona, el factor de seguridad indica que el material no llegó al límite elástico por lo que la silicona se estiró hacia los lados para poder llegar a tener ese desplazamiento.

Las Figuras 8-75, 8-76 y 8-77 representan a S3, S2 y S1, respectivamente.

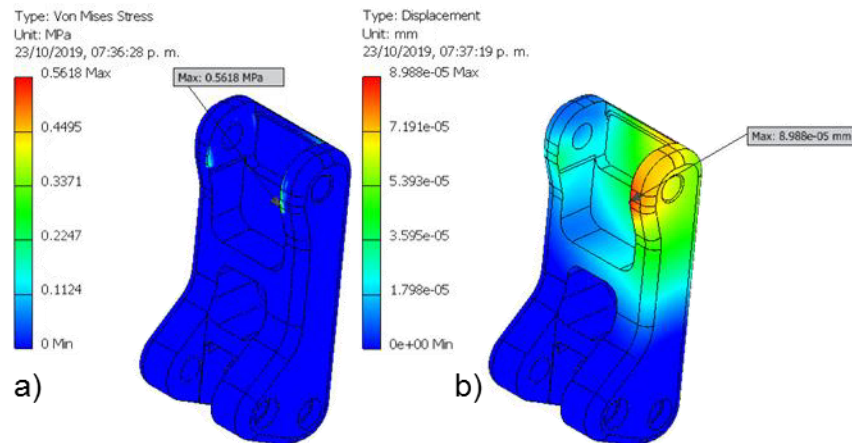


Figura 8-75. S3 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

El esfuerzo en S3 tuvo valores de 0.5618 MPa y un desplazamiento de  $8.988 \times 10^{-5}$  mm. La zona de desplazamiento se presentó mayoritariamente en el lado en el que se ejerció la fuerza de 235 N.

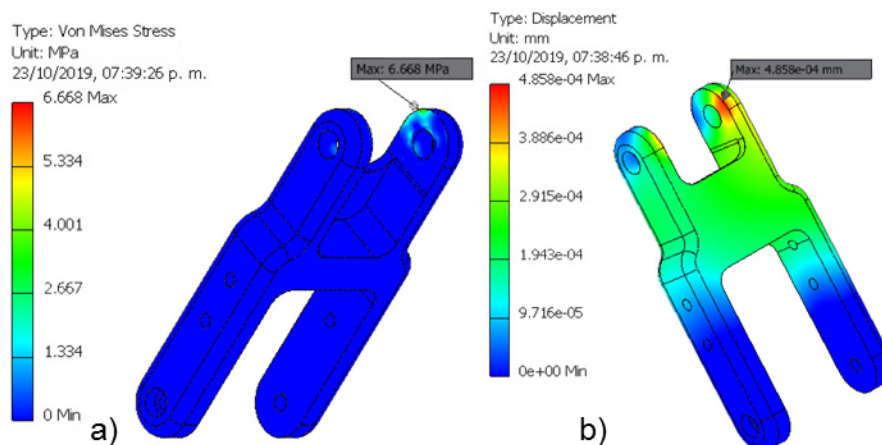


Figura 8-76. S2 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

En S2 se tuvo un esfuerzo de 6.668 MPa y un valor de desplazamiento de  $4.858 \times 10^{-4}$  mm.

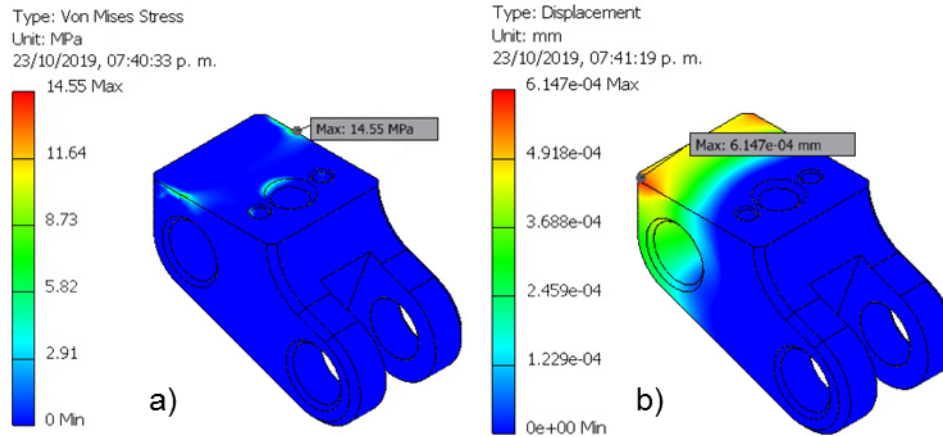


Figura 8-77. S1 con doble fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Para S1 se tuvo un valor de esfuerzo de 14.55 MPa y un desplazamiento de  $6.147 \times 10^{-4}$  mm.

### 8.3.4.3.2. Fuerza máxima

La segunda simulación realizada con la delimitación de SA2 fue con una fuerza de 117.5 N. En la Figura 8.78 se presentan los resultados para el dedo de la agarradera.

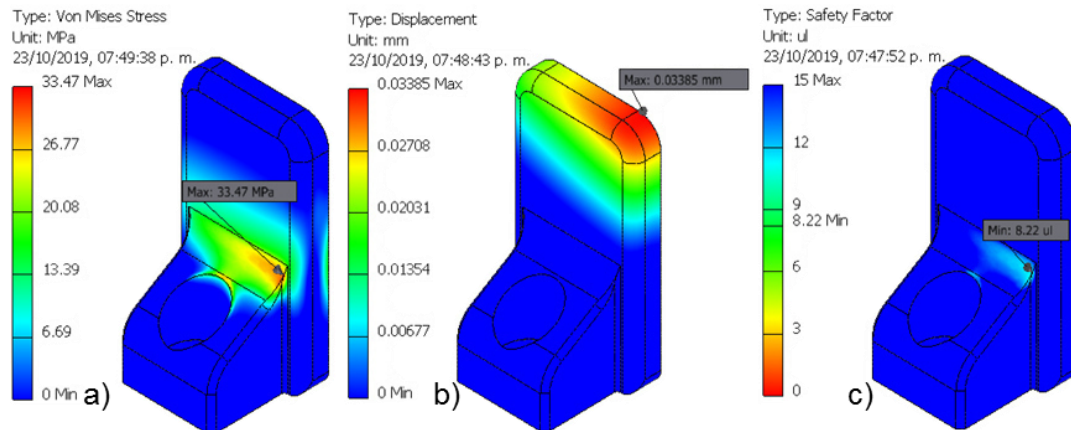


Figura 8-78. Dedo con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de Seguridad.

El esfuerzo en el dedo disminuyó hasta un valor de 33.47 MPa, el desplazamiento disminuyó a  $3.385 \times 10^{-2}$  mm y el factor de seguridad aumentó a 8.22.

En la Figura 8-79 se presentan los resultados para la almohadilla de silicón.

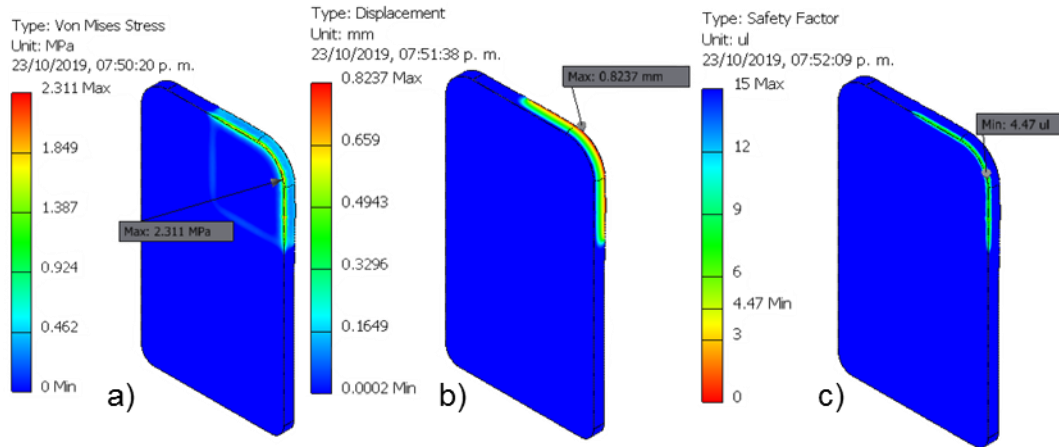


Figura 8-79. Almohadilla de silicón con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos, b) desplazamientos y c) factor de seguridad.

El esfuerzo en la almohadilla de silicón fue de 2.311 MPa, el desplazamiento de 0.8237 mm y el factor de seguridad de 4.47. En este caso al aplicar una fuerza de 117.5 N, no llegó a haber un desplazamiento que rebasara el espesor de la almohadilla de silicón.

En las Figuras 8-80, 8-81 y 8-82 se presentan los resultados de S3, S2 y S1, respectivamente.

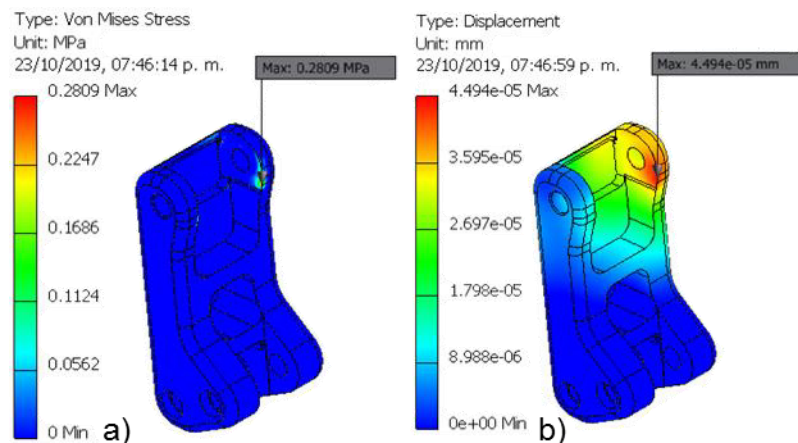


Figura 8-80. S3 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

El esfuerzo en S3 fue de 0.2809 MPa y el desplazamiento de  $4.494 \times 10^{-5}$  mm.

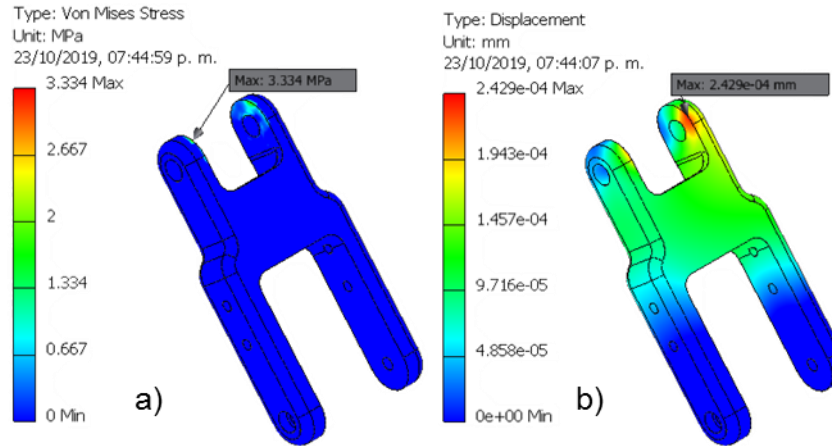


Figura 8-81. S2 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

El esfuerzo en S2 fue de 3.334 MPa y el desplazamiento de  $2.429 \times 10^{-4}$  mm.

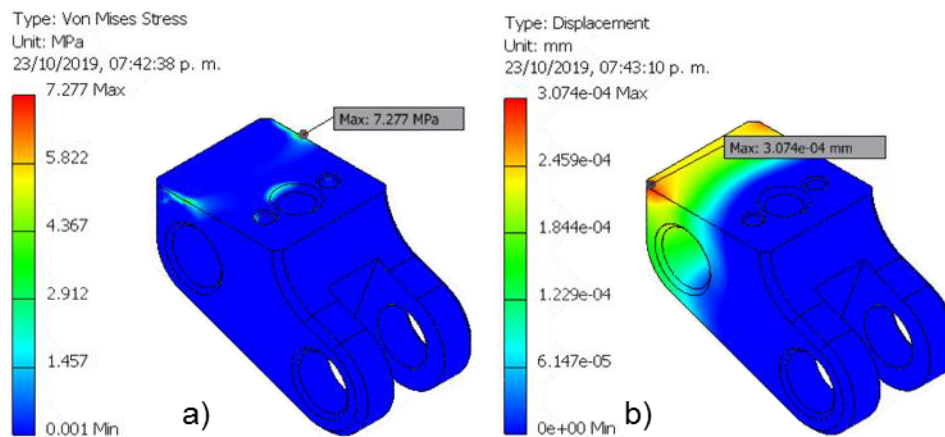


Figura 8-82. S1 con fuerza máxima y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

El esfuerzo en S1 fue de 7.277 MPa y el desplazamiento de  $3.074 \times 10^{-4}$  mm.

### 8.3.4.3.3. Fuerza de agarre

La última simulación con la delimitación de la zona de agarre para SA2 fue con la fuerza de 20 N. La Figura 8-83 representa los resultados de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad del dedo de la herramienta robótica.

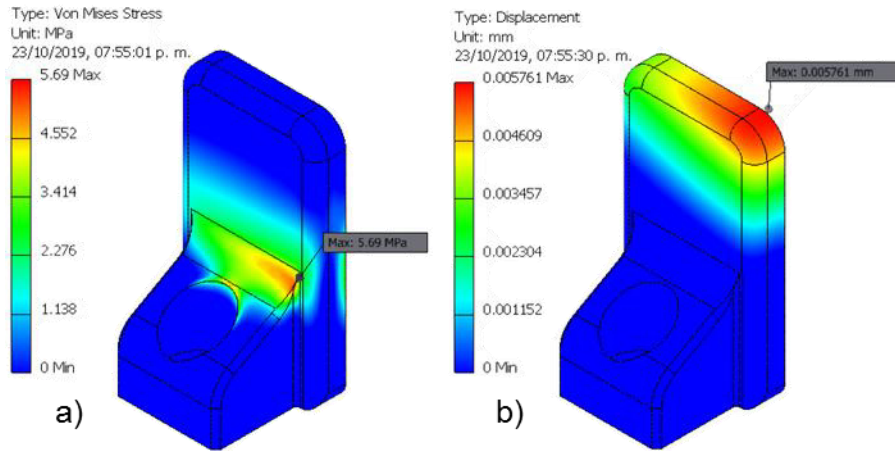


Figura 8-83. Dedo con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Al aplicar la fuerza de 20 N en el dedo se tuvieron valores de esfuerzo de 5.69 MPa y de desplazamiento de  $5.761 \times 10^{-3}$  mm.

En la Figura 8-84 se representan los resultados para la almohadilla de silicón.

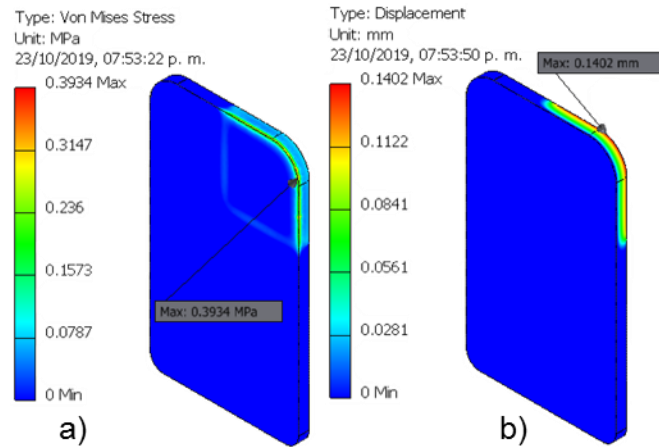


Figura 8-84. Almohadilla de silicón con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Se tuvo un esfuerzo de 0.3934 MPa y un desplazamiento de 0.1402 mm. Los desplazamientos disminuyeron, siendo favorable para la aplicación.

En las Figuras 8-85, 8-86 y 8-87 se representan los resultados para S3, S2 y S1, respectivamente.

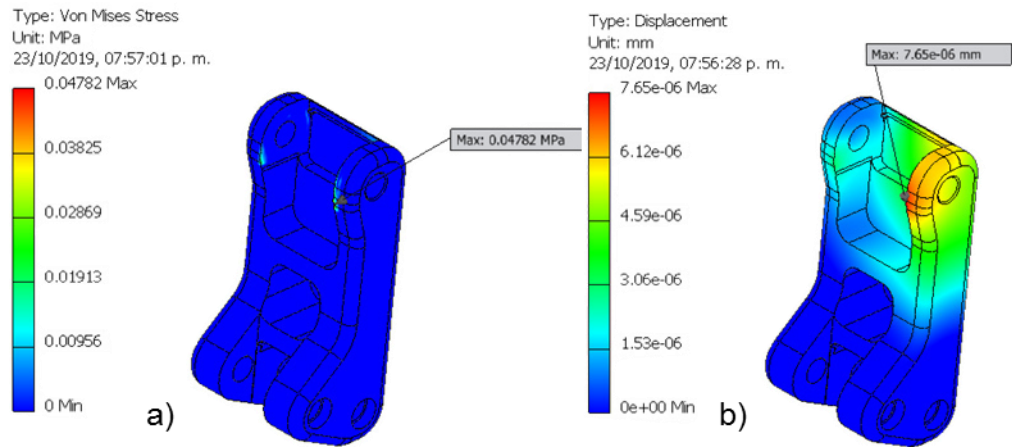


Figura 8-85. S3 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los valores de esfuerzo para S3 fue de  $4.782 \times 10^{-2}$  MPa y de desplazamiento de  $7.65 \times 10^{-6}$  mm.

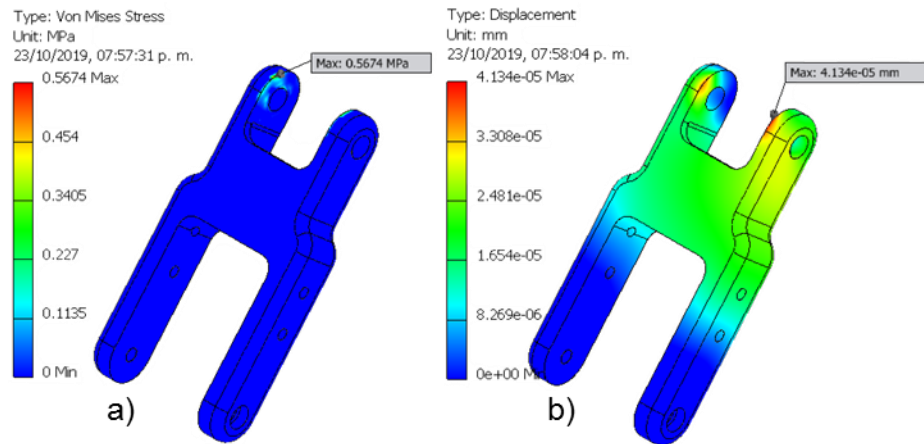


Figura 8-86. S2 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los valores de esfuerzo para S2 fueron de 0.5674 MPa y de desplazamiento de  $4.134 \times 10^{-5}$  mm.

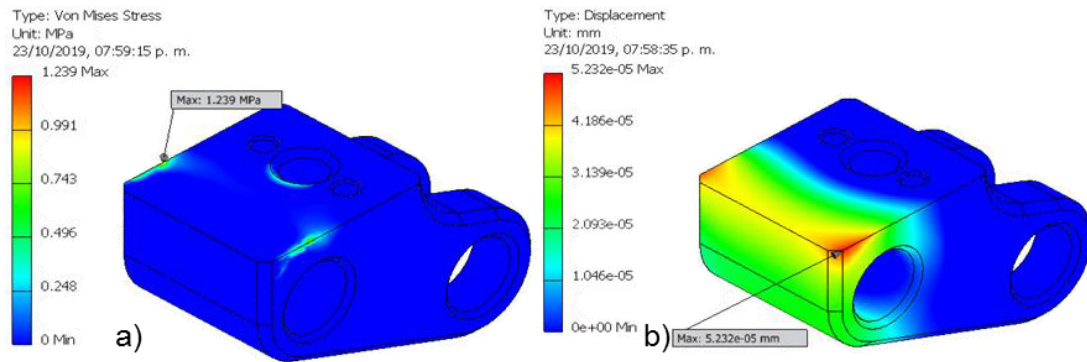


Figura 8-87. S1 con fuerza de agarre y limitación de zona ensamble para SA2 a) esfuerzos y b) desplazamientos.

Los valores de esfuerzo para S1 fueron de 1.239 MPa y de desplazamiento de  $5.232 \times 10^{-5}$  mm.

## 8.4. Análisis de convergencia

### 8.4.1. Ensamble

La malla automática con la que cuenta Inventor 2019 no llega a tener una tendencia al aumento del número de elementos conforme disminuya su valor del tamaño de elemento medio, como se puede apreciar en la Figura 8-88.

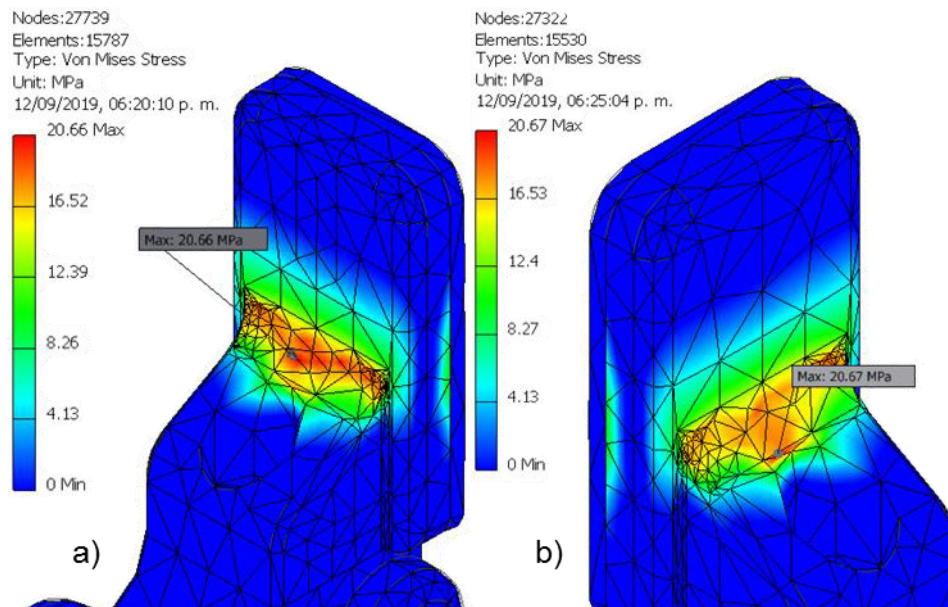


Figura 8-88. Diferencias entre la cantidad de nodos y elementos entre a) malla de 0.8, b) malla de 0.6

Debido a que no se tenía un control sobre el comportamiento de la malla, se realizó un mallado de forma manual en cada pieza para llegar a la convergencia. La convergencia de los componentes de la agarradera se presenta en las Figuras 8-89 hasta 8-93.

Para la herramienta robótica ensamblada se usó el MF<sub>8</sub> con una fuerza de 235 N en la cara que estaba en contacto con los soportes ADAS y se empezó a realizar el análisis desde 4532 elementos, siendo esta cantidad de elementos el de menor tamaño que se logró conseguir.

En la Figura 8-89 presentan los esfuerzos y desplazamientos en la almohadilla de silicona, tanto los esfuerzos como los desplazamientos comenzaron a aumentar hasta llegar a un valor de 625,862 elementos, en donde el esfuerzo llegó a un valor de 0.8136 MPa y el desplazamiento a un valor de 0.2668 mm. El valor final del mallado para almohadilla de silicón fue de 0.4 mm.

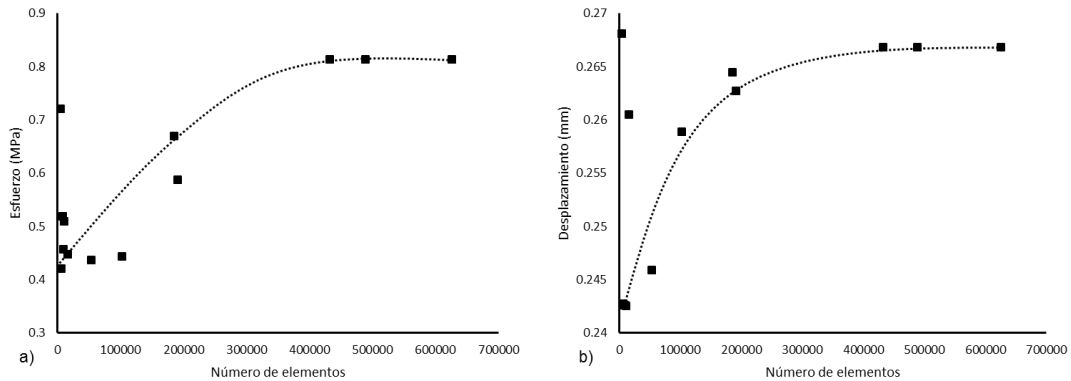


Figura 8-89. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en la almohadilla de silicona.

En la Figura 8-90 se representan los esfuerzos y desplazamientos en el dedo utilizando aluminio 6061. A partir de los 200,000 elementos es cuando se presentó una estabilidad en los desplazamientos y esfuerzos, al llegar a los 625,862 elementos los esfuerzos tuvieron un valor de 26 MPa y los desplazamientos de  $22.44 \times 10^{-3}$  mm. El valor final del mallado en el dedo fue de 0.6 mm.



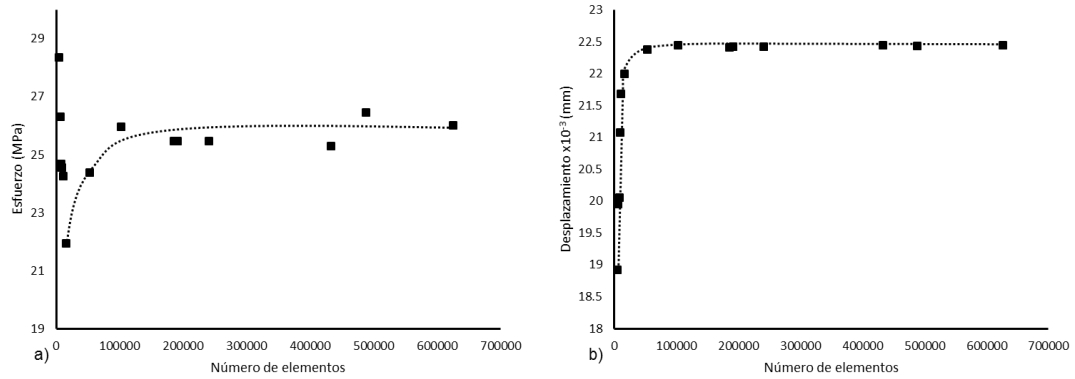


Figura 8-90. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en el dedo de aluminio.

En la Figura 8-91 se muestran los esfuerzos y desplazamientos de S3, el comportamiento de ambos empezó a ser constante a partir de los 100,000 elementos y al llegar al valor de 625,862 el esfuerzo llegó a ser de  $13.46 \times 10^{-3}$  MPa y los desplazamientos de  $4.782 \times 10^{-7}$  mm. El valor final del mallado en S3 fue de 1.2 mm.

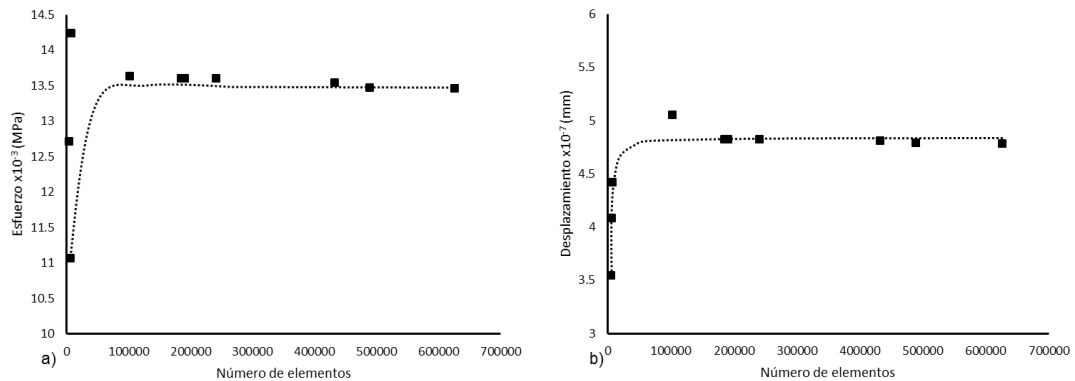


Figura 8-91. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en S3.

En la Figura 8-92 se muestran los esfuerzos y desplazamientos de S2, en el cual con un valor de 600,000 elementos se empezó a ver la convergencia, al tener un valor de 625,862 elementos los esfuerzos tuvieron un valor de 2.22 MPa

y los desplazamientos de  $5.174 \times 10^{-5}$  mm. El valor final del mallado en S2 fue de 1.2 mm.

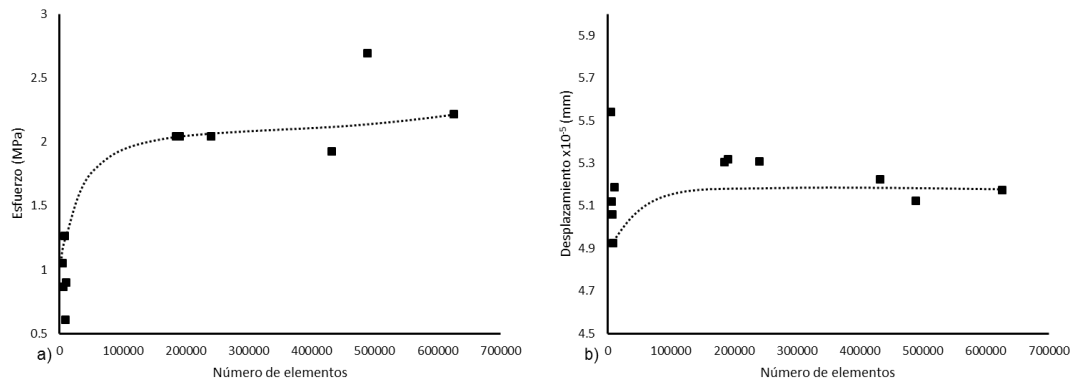


Figura 8-92. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en S2.

En la Figura 8-93 se presentan los esfuerzos y desplazamientos de S1, que al igual que S2 fue con un valor de 600,000 elementos cuando se empezó a notar la divergencia y al tener 625,862 elementos se tuvo un esfuerzo de 4.75 MPa y un desplazamiento de  $1.152 \times 10^{-4}$  mm. El valor final del mallado en S1 fue de 1.2 mm.

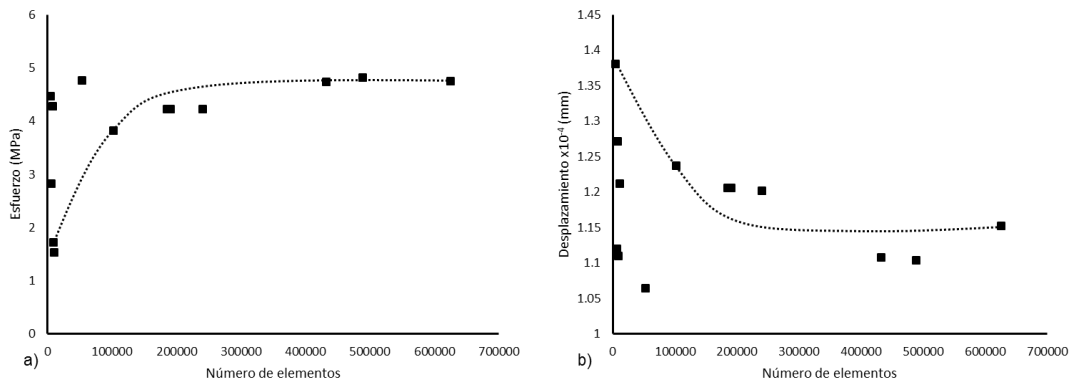


Figura 8-93. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en S1.

### 8.4.2. SA1

Para SA1 se empleó una fuerza de 117.5 N en las zonas donde se realiza el agarre, el mallado realizado en SA1 tuvo que ser semiautomático debido a que SA1 contiene muchas partes seccionadas debido a la restauración de su geometría. El valor del mallado en las zonas de agarre fue de 0.4 mm, ese

tamaño fue elegido debido a la información revelada por la convergencia del ensamble en la almohadilla de silicón y el dedo metálico, en las otras zonas de SA1 se estuvo cambiando el tamaño del elemento promedio de la malla automática con el cual cuenta Inventor.

En la Figura 8-94 se presentan los esfuerzos y desplazamientos de SA1 al cambiar el número de elementos, al tener un número de elementos de 926,230 se tuvieron valores de esfuerzo de 2.301 MPa y desplazamientos de  $8.02 \times 10^{-3}$  mm. El valor del mallado del método automático es de 0.006.

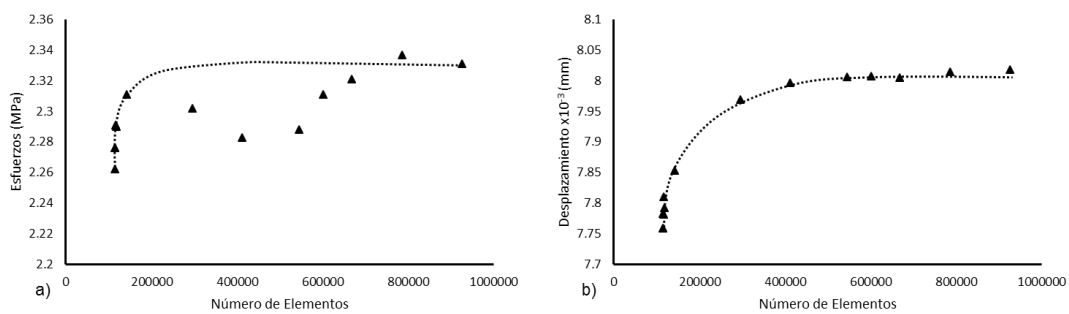


Figura 8-94. Convergencia de a) esfuerzos y b) desplazamientos en SA1.

### 8.4.3. SA2

En SA2 se aplicaron las mismas condiciones que en SA1 en cuestión a fuerza y tipo de mallado. En la Figura 8-95 se presenta la convergencia de SA2, en donde, al tener un valor de 100,000 elementos empezó a tener un comportamiento constante, el esfuerzo con los 926,230 elementos fue de 94.12 MPa y los desplazamientos fueron de 0.24 mm. El valor final del mallado fue igual al de SA1.

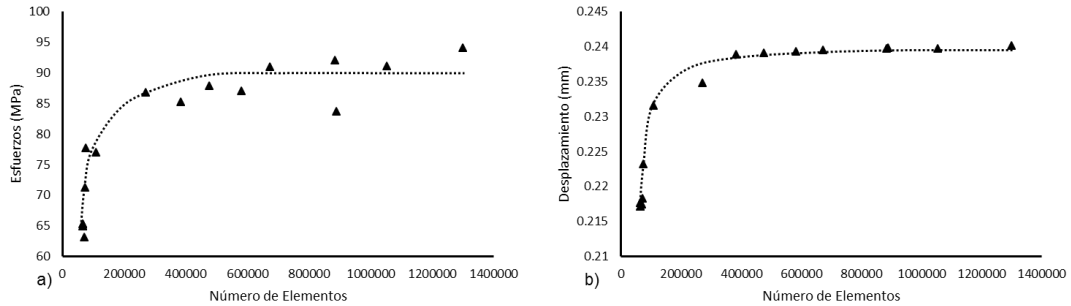


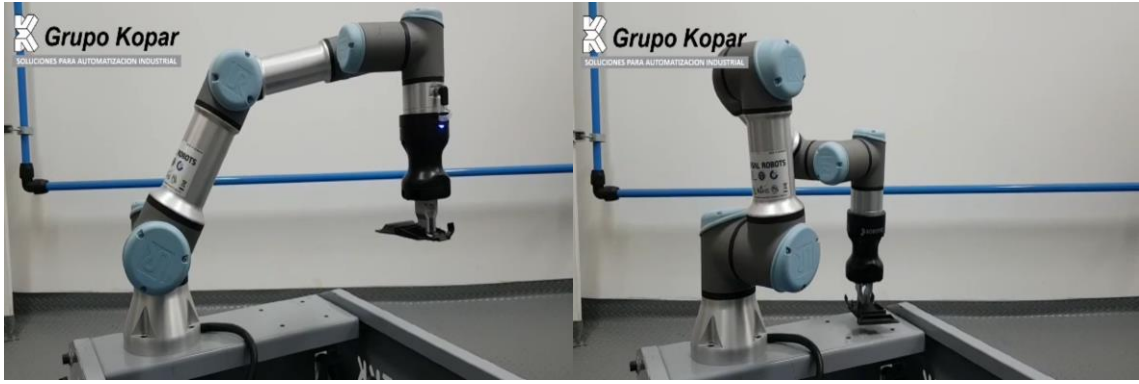
Figura 8-95. Convergencia de los a) esfuerzos y b) desplazamientos en SA2.

### 8.5. Prueba física del agarre de los soportes ADAS

En esta sección se muestran las pruebas de agarre en los soportes ADAS, realizadas con el apoyo del grupo Kopar, en el cual se muestran las pruebas en los dos soportes ADAS de que el robot UR5e puede realizar el agarre de las piezas, el método a elegir por el grupo Kopar fue el MF<sub>3</sub> con las limitaciones de MF<sub>4</sub>. La herramienta robótica que se ocupó no fue la propuesta en este proyecto sino una versión más simplificada siendo Hand-E. En la Figura 8-96 y 8-97 se puede apreciar el agarre y el desplazamiento de las piezas de un lugar a otro. La fuerza de agarre y la distancia por recorrer fueron dados por el grupo Kopar.



Figura 8-96. Zona de agarre del SA1 con translación a otro lugar.



*Figura 8-97. Zona de agarre del SA2 con translación a otro lugar.*

# CAPÍTULO 9

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 9.1. Conclusiones

El aluminio 6061 como material asignado en el dedo de la herramienta robótica tiene la ventaja de tener resistencia a la corrosión y al aplicarle la fuerza de agarre llega a tener valores de aproximadamente  $6 \times 10^{-3}$  mm en desplazamiento, esto hace que el acero AISI 4340 y acero inoxidable AISI 304 estarían demás en esta aplicación.

En las simulaciones de la cara del dedo que estaría en contacto con los soportes ADAS, empleando la fuerza máxima que podía ejercer la herramienta siendo de un valor de 235 N en conjunto y una fuerza en caso de una falla inesperada de 470 N en conjunto, resultó que el aluminio 6061 se comportaba de una manera adecuada ante una falla inesperada teniendo un valor de seguridad de aproximadamente 4, lo que nos indicaba que el dedo de aluminio 6061 no llegaría a deformarse de manera permanente y en cuestión a los desplazamientos llegaron a tener un valor de  $6 \times 10^{-2}$  mm aproximadamente. Lo anterior mostraba demostraba que al realizar el proceso de pegado no se afectaría la tolerancia deseada en el proceso.

Con la herramienta se concluye que el movimiento efectuado por ésta al realizar el agarre no afectaba significativamente en los resultados de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad. En cuestión a los componentes S3, S2 y S1 se pudo notar que la fuerza empleada en el agarre no tuvo un gran efecto en ellos.

Para los componentes ADAS se observó que al emplear una aceleración en el robot colaborativo se tuvo un efecto inverso en el factor de seguridad y

proporcional al desplazamiento, es decir, a mayor aceleración se obtuvieron mayores desplazamientos en los soportes ADAS pero un menor factor de seguridad como lo visto en los resultados de las secciones 8.3.1.1.3 y 8.3.1.2.3. La aceleración en el robot colaborativo dependería del tamaño, material y diseño que tuviera el soporte ADAS, es decir, a mayor tamaño con límites elásticos pequeños y diseños complicados con zonas de agarre muy finas se tendría que el factor de seguridad del soporte ADAS sería vulnerable a las aceleraciones. Es en el SA1 donde no se podría emplear una aceleración mayor a  $3g$ , ya que con este tuvo un factor de seguridad de 1.54 y, al contrario de SA1, SA2 se mantuvo con un factor de seguridad alto al emplear en él la aceleración de  $3g$ .

El mejor método de fijación mostrado por las simulaciones fue el MF<sub>1</sub>, el cual consistió en un sistema de vacío que no permitía ningún movimiento en los soportes ADAS, pero debido a que el empleo de un sistema de vacío elevaría los costos del proceso de pegado y al tener los resultados de las simulaciones de las limitaciones presentadas en MF<sub>4</sub> con MF<sub>3</sub>, mostraron a MF<sub>3</sub> como una opción viable en la elección del método de fijación. Al emplear MF<sub>3</sub> solo es viable con un valor de fuerza máximo de 40 N para SA1 y SA2, ya que con este valor de fuerza se tiene un valor de factor de seguridad de 2.57 para SA1 y 11.97 para SA2.

El aumento en la fuerza de agarre en los soportes ADAS resultó contraproducente, ya que se reducía su factor de seguridad tal como se observó con MF<sub>1</sub> con respecto a SA1 que presentó valores de 6.91 en el factor de seguridad, mientras que en SA2 se mantiene con valores de 0.87.

Con las ecuaciones utilizadas se tiene un método para calcular la fuerza de agarre necesaria con base en el tamaño, forma y material del soporte ADAS a levantar. Se debe tener en cuenta que entre mayor sea el tamaño del soporte más fácil se deformará. Si se desea realizar simulaciones para los otros dispositivos ADAS se recomienda tomar en cuenta las restricciones que se realizaron en esta tesis y el tipo de mallado usado.

## 9.2. Recomendaciones

Implementar las simulaciones de elemento finito para los soportes ADAS con los valores de fuerza y valores frontera empleados en la tesis para verificar las simulaciones realizadas.

Confirmar que el dedo empleado en la herramienta robótica puede realizar el agarre en la mayoría de los componentes ADAS que se tengan en el mercado de repuesto. Además, se tiene que confirmar que el método MF<sub>3</sub>, la fuerza de agarre y las aceleraciones propuestas se puedan trabajar con los soportes ADAS en baja, media y alta producción, así como la facilidad de interactuar con la interfaz del robot colaborativo.

Por último, se recomienda comparar el robot UR5e con el robot Techman proporcionado por el grupo IAS y verificar si el sistema de visión integrado en el Techman es igual de eficaz que implementar una cámara Cognex con una iluminación externa.

Este proyecto de tesis tiene la finalidad de colaborar con el mercado de repuesto de parabrisas de autos autónomos que lleven consigo sistemas ADAS para la industria 4.0. Además, con la finalidad de validar la tolerancia geométrica se asegura que la calibración de los parabrisas será la adecuada respecto al sistema de pegado de los soportes ADAS, esto ayudará a dar seguridad a las personas que compren vehículos de esa índole al momento de activar los dispositivos en su automóvil.



## REFERENCIAS

- [1] Almada-lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES) Cyber-physical Systems. *Journal of Innovation Management*, 3 (4), 16–21.
- [2] Bell Rae, J. y Binder, A. K. (2018). Automotive industry - The modern industry. Britannica.com. *Britannica*. Recuperado el 30 de enero del 2019 de:  
<https://www.britannica.com/technology/automotive-industry/The-modern-industry>.
- [3] Foner, E., y Garraty, J. A. (1991). Automobile History. *The Reader's Companion to American History*. Boston, USA: Houghton-Mifflin
- [4] Tigadi, A., Gujanatti, R. y Gonchi G. (2016). Advanced Driver Assistance Systems. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 4 (3), 151-158.
- [5] Mentor a Siemens Business. Designing and Developing Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Recuperado el 01 de febrero del 2019 de:  
<https://www.mentor.com/embedded-software/multimedia/designing-and-developing-advanced-driver-assistance-systems--adas->
- [6] Waschl, H., Komanolvsky, I. y Willemns, F. (2019). *Control Strategies for Advanced Driver Assistance Systems and Autonomous Driving Functions Development, Testing and Verification*. Cham, Switzerland: Springer
- [7] Shaout, A., Colella, D., y Awad, S. (2012). Advanced driver assistance systems - Past, present and future. *ICENCO'2011 - 2011 7th International Computer Engineering Conference: Today Information Society What's Next?*, 72–82.
- [8] eeNews Europe. (2014). SoC architecture optimised for Advanced Driver Assistance Systems. Recuperado el 05 febrero del 2019 de:  
<https://www.eenewseurope.com/news/soc-architecture-optimised-advanced-driver-assistance-systems>

- [9] Safelite AutoGlass. Windshield repair services. Recuperado el 09 de febrero del 2019 de: <https://www.safelite.com/windshield-repair>
- [10] Safelite AutoGlass. Recalibrado de la cámara del parabrisas. Recuperado el 11 de febrero del 2019 de: <https://espanol.safelite.com/windshield-camera-recalibration>
- [11] The New York Times. (2019). When the Windshield Helps Drive the Car, a repair is'nt so simple. Recuperado el 15 de febrero del 2019 de: <https://www.nytimes.com/2019/02/07/business/windshield-repairs.html>
- [12] EMC Insurance. New Technologies Complicate Winshield Replacement. Recuperado el 18 de febrero del 2019 de: <https://www.emcins.com/losscontrol/insights-d/2018/06/windshield-replacement/>
- [13] Aceautoglass. What is Advanced Technology Glass/ Advanced Driver Assist Systems? Recuperado el 20 de febrero del 2019 de: <https://www.aceautoglass.net/advanced-glass/>
- [14] Allstate. (2018). Does Car Insurance Cover Windshield Damage? Recuperado el 24 de febrero del 2019 de: <https://www.allstate.com/tr/car-insurance/windshield-damage.aspx>
- [15] AutoGlass All Glass Windscreens. What is ADAS Windscreen Calibration. Recuperado el 26 de febrero del 2019 de: <https://www.autoglass.ie/adas-windscreen-calibration/>
- [16] NU PROPERTY CASUALTY 360°. (2018). ADAS recalibration is driving windshield repair back into the shop. Recuperado el 28 de febrero del 2019 de: <https://www.propertycasualty360.com/2018/11/28/adas-recalibration-is-driving-windshield-repair-ba/>
- [17] Nissan Cerritos. (2017). Video: How to Use Nissan Intelligent Cruise Control. *Cerritos*. Recuperado el 01 de marzo del 2019 de: <https://www.cerritosnissan.com/blog/2017/march/30/video-how-to-use-nissan-intelligent-cruise-control.htm>

- [18] Motorpasion. (2015). Cómo funciona el control de velocidad de cruceo y cuándo usarlo para ganar seguridad. Recuperado el 02 de marzo del 2019 de:  
<https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/como-funciona-el-control-de-velocidad-de-crucero-y-cuando-usarlo-para-ganar-en-seguridad>
- [19] Circula Seguro. (2013). ¿Cómo funciona el control de cruceo? Recuperado el 05 de marzo del 2019 de:  
<http://www.circulaseguro.com/como-funciona-el-control-de-crucero/>
- [20] Frequently Asked Questions for all thing Toyota. How do I operate my cruise control on my vehicle? Recuperado el 08 de marzo del 2019 de:  
[http://toyota.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/7886/~/~how-do-i-operate-the-cruise-control-in-my-vehicle%3F](http://toyota.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/7886/~/~how-do-i-operate-the-cruise-control-in-my-vehicle%3F)
- [21] Driving tests. (2019). How to Use Cruise Control: 7 Specific Things You Need to Know Well. Recuperado el 12 de marzo del 2019 de:  
<https://driving-tests.org/beginner-drivers/how-to-use-cruise-control/>
- [22] Coburn, M. J., Lin, J. A., Wozniak, L. K., Kim, R. S., Fontaeus, P. A. y Taylor, D. S. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,322, 721.
- [23] YouTube<sup>MX</sup>. EN | Bosch Adaptive Cruise Control (ACC). Recuperado el 17 de marzo del 2019 de:  
[https://www.youtube.com/watch?v=own\\_VaRZ9M8](https://www.youtube.com/watch?v=own_VaRZ9M8)
- [24] Audi MediaCenter. (2017). Driver Assistance Systems. Recuperado el 20 de marzo del 2019 de: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/technology-lexicon-7180/driver-assistance-systems-7184>
- [25] HELLA TECH WORLD – The Workshop’s Friend. Adaptive Cruise Control – Adjusting ACC Sensor. Recuperado el 23 de marzo del 2019 de:  
<https://www.hella.com/techworld/uk/Technical/Car-electronics-and-electrics/Adaptive-Cruise-Control-38634/>
- [26] Fujinami, T., Mase, Y., Hagiwara, H. y Ohachi, J. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,196,023.

- [27] Wolf, J. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,207,705.
- [28] García, R. y Geiss, M. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,315,600.
- [29] TOYOTA. Pre- crash Safety System (Milimeter wave radar type).  
Recuperado el 28 de marzo de 2019 de:  
[http://www.toyota.com.cn/innovation/safety\\_technology/safety\\_technology/pre-crash\\_safety/](http://www.toyota.com.cn/innovation/safety_technology/safety_technology/pre-crash_safety/)
- [30] De Mersseman, B., Eriksson, O. y Andersson, R. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,042,050.
- [31] Lynam, N. R. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,308,186.
- [32] Volvo Cars Global Newsroom. Blind Spot Information System (BLIS).  
Recuperado el 03 de abril del 2019 de:  
<https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/photos/8152>
- [33] Spampinato, G., Curti, S., Guarneri, N. I. y Bruna, A. R. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,242,272.
- [34] YouTube<sup>MX</sup>. Niro – Lane Departure Warning System (For US).  
Recuperado el 05 de abril del 2019 de:  
<https://www.youtube.com/watch?v=P5Cs0WLCLRQ>
- [35] Schneider, I., Roeckl, P., Petermann, M., Kahler, P. y Wittorf, M. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,246,000.
- [36] Tomozawa, M., Kato, M., Tachibana, H., Imai, N., Yamashita, T., Hoshino, T., ..., Takahashi, K. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,239,520.
- [37] NEW ATLAS. (2016). How self-parking car technology Works: the first step to autonomous vehicles. Recuperado el 08 de abril del 2019 de:  
<https://newatlas.com/how-self-parking-works/46684/>
- [38] Katsuhara, Y. (2019). Estados Unidos Patente No. 10,297,131.
- [39] Zhang, C., Wu, X., Zheng, Xi. y Yu, S. (2019). Driver Drowsiness Detection using Multi-Channel Second Order Blind Identifications. *IEEE Access*, vol. 7, 11829-11843.

- [40] Bosch Invented for life. Driver drowsiness detection. Recuperado el 12 de abril del 2019 de: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/driver-drowsiness-detection/>
- [41] Safelite AutoGlass. A guide to windshield glass. Recuperado el 15 de abril del 2019 de:  
<https://www.safelite.com/windshield-auto-glass-technology/windshield>
- [42] Bosch Invented for Life. (2018). Bosch DAS 1000 Calibration set: professional adjustment of sensors and cameras of driver assistance systems. Recuperado el 19 de abril del 2019 de: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/bosch-das-1000-calibration-set-professional-adjustment-of-sensors-and-cameras-of-driver-assistance-systems-151808.html>
- [43] Childs, P., (2004). *Mechanical Design* (2 ed). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [44] Norton, R., (1999) *Diseño de Máquinas* (1 ed). México, D.F.: Prentice Hall
- [45] Budynas, R., Nisbett, J., (2008). *Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley* (8 ed). México, D.F.:McGraw Hill Interamericana
- [46] Lawson, B. (2005). *How Designers Think The design process demystified* (4 ed). Great Britain, UK: Architectural Press.
- [47] Morris, A., (2008). *A Practical Guide to Reliable Finite Element Modelling* (1 ed). Inglaterra, UK: Jhon Wiley & Sons, Ltd.
- [48] Tickoo, S. (2015). *Autodesk Inventor 2016 for Designers* (16 ed). Indiana, USA: CAD/CIM Technologies.
- [49] Desai, Chandrakant S., Abel, Jhon F., (1972). *Introduction to the Finite Element Method a Numerical Method for Engineering Analysis* (1 ed). USA: Van Nostrand Reinhold Company.
- [50] Liu, G. R. y Quek, S. S., (2003). *The Finite Element Method A practical course*. Oxford, UK:Butterworth-Heinmann
- [51] Logan, D. L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method* (4 ed). Ontario, Canadá: Thomson.

- [52] Ragab, S. A. y Fayed, H. E. (2018). *Introduction to Finite Element Analysis for Engineers*. Florida, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
- [53] Li, Z., Qiao, Z. y Tang, T. (2018). *Introduction to Finite Difference and Finite Element Methods*. UK: Cambridge University Press.
- [54] Fong, T., Thorpe, C., y Baur, C. (1999). Collaborative Control: A Robot Centric Model for Vehicle Teleoperation. *AAAI Technical Report*, 33-40.
- [55] Michalos, G., Makris, S., Spiliotopoulos, J., Misios, I., Tsarouchi, P., y Chryssolouris, G. (2014). ROBO-PARTNER: Seamless Human-Robot Cooperation for Intelligent, Flexible and Safe Operations in the Assembly Factories on the Future. *Procedia CIRP*, 23, 71-76.
- [56] Weidner, R. y Wulfsberg, J. P., (2014). Concept and exemplary realization of Human Hybrid Robot for supporting manual assembly tasks. *Procedia CIRP*, 23, 53-58.
- [57] Michalos, G., Makris, S., Tsarouchi, P., Guasch, T., Kontovrakis, D. y Chryssolouris, G. (2015). Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. *Procedia CIRP*, 37, 248-253.
- [58] Liu, Z., Liu, Q., Xu, W., Zhou, Z., y Pham, D. T. (2018). "Human Robot Collaborative Manufacturing using Cooperative Game: Framework and Implementation". *Procedia CIRP*, vol. 72, 87-92.
- [59] Zeng, A., Song, S., Yu, K. T., Donlon, E., Hogan, F. R., Bauza, M., ..., Rodriguez, A. (2018). Robotic Pick and Place of Novel Objects in Cutter with Multi-Affordance Grasping and Cross-Domain Image Matching. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3750-3757.
- [60] Matsas, E., Vosniakos, G. C. y Batras, D. (2018). Prototyping proactive and adaptive techniques for human-robot collaboration in manufacturing using virtual reality. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol 50, 168-180.
- [61] Wang, W., Li, R., Chen, Y. y Jia, Y. (2018). Human Intention Prediction in Human Robot Collaborative Tasks. *HRI' 18*, 279-280.

- [62] Nakazawa, N., Kim, I., Inooka, H., y Ikeura, R. (2001). Force control of a robot gripper based on human grasping schemes, *Control Eng. Pract.*, vol. 9 (7), 735–742.
- [63] Arzanpour, S., Fung, J., Mills, J. K., y Cleghorn, W. L. (2006). Flexible fixture design with applications to assembly of sheet metal automotive body parts, *Assem. Autom.*, vol. 26 (2), 143–153, 2006.
- [64] Shiller, Z. y Dubowsky, S. (1989). Robot Path Planing with Obstacles, Actuator, Gripper, and Payload Constraints. *The International Journal of Robotics Research*. 3-18.
- [65] Nishimura, T., Tennomi, M., Yozuke, S., Tsuji, T. y Watanabe, T. (2018). Ligthweing, High-Force Gripper Inspired by Chuck Clamping Devices. *IEEE Robotics and Automation Letter*, vol. 3 (3), 1354-1361.
- [66] Manuales de ROBOTIQ. Recuperado el 10 de octubre del 2019 de: [https://assets.robotiq.com/website-assets/support\\_documents/document/2F-85\\_2F-140\\_Instruction\\_Manual\\_e-Series\\_PDF\\_20190206.pdf](https://assets.robotiq.com/website-assets/support_documents/document/2F-85_2F-140_Instruction_Manual_e-Series_PDF_20190206.pdf)
- [67] Manuales de UR5e Versión 5.0.2. Recuperado el 15 de octubre del 2019 de: [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/40974/UR5e\\_User\\_Manual\\_en\\_US.pdf](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/40974/UR5e_User_Manual_en_US.pdf)
- [68] 3DS. Solidworks 2019 [Software]. 2019. Recuperado el 18 de octubre del 2019 de: <https://www.solidworks.com/es/product/whats-new>
- [69] Autodesk. Inventor Professional 2019 [Software]. (2019). Recuperado el 20 de octubre del 2019 de: <https://www.autodesk.com/products/inventor/free-trial>
- [70] Festo. Selección de componentes de vacío (3.22.2.18) [Software]. (2012). Recuperado el 25 de octubre del 2019 de: [https://www.festo.com/net/es-cl\\_cl/SupportPortal/default.aspx?cat=1597&tab=4&s=t](https://www.festo.com/net/es-cl_cl/SupportPortal/default.aspx?cat=1597&tab=4&s=t)