

REDISEÑO DE CHASIS DE UNA VOLKSWAGEN T2 PICK UP: ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS

ARTÍCULO ORIGINAL

RESUMEN

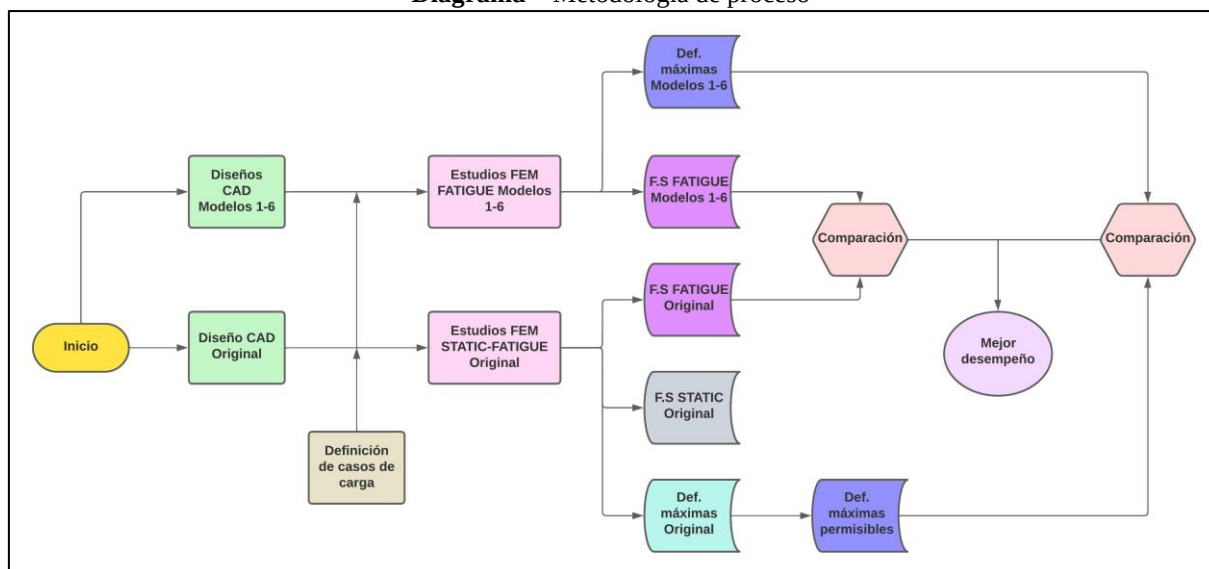
Dentro de la amplia gama de vehículos Volkswagen, la Transporter 2 en su modelo Pick Up, presenta un chasis compuesto por rieles longitudinales, transversales, y elementos estabilizadores o Outriggers, los cuales otorgan un refuerzo a la estructura básica y mejoran la estabilidad del vehículo en maniobras de conducción. Debido a su diseño, el espacio disponible entre sus ejes permite alojar una carga útil de 750 kg, otorgando una buena maniobrabilidad, y haciendo de ésta una óptima camioneta para todos los terrenos. En la actualidad, existen grupos de entusiastas que se dedican a realizar modificaciones en autos clásicos desde aspectos estéticos, hasta cambios importantes a nivel estructural. Dentro de estas modificaciones estructurales, se encuentran los alargues de chasis. En este trabajo, el presente artículo tiene como objetivo evaluar el comportamiento estructural en el chasis Original de una Volkswagen T2- Pick Up y plantear 6 nuevos Modelos, los cuales, puedan presentar alguna ventaja estructural respecto al Original. Se plantean escenarios de carga en Peso, Peso+Aceleración, Peso+Frenado y Peso+Curva, validando factores de seguridad estáticos y en fatiga, en Zonas específicas y, deformaciones totales máximas en régimen elástico para cada pieza. Posteriormente, se comparan estos resultados contra los nuevos Modelos alargados en 60 cm en los rieles longitudinales, teniendo en cuenta opciones de diseño establecidas en los manuales de la Volkswagen. El Modelo 1 representa el alargue del chasis sin ningún tipo de modificación adicional; Modelos 2-3 representan cambios de material y Modelos 4-5-6 implementan refuerzos adicionales en los rieles longitudinales. La metodología usada en el trabajo, se basa en proponer un modelo en Elementos Finitos, y, según el criterio de Von Mises y de Curvas S-N con esfuerzos alternantes, obtener el estado de tensiones y deformaciones según el caso. Los resultados apuntan a que el chasis Original no sufre ningún tipo de fallo estructural para cada escenario de carga. También se determinó que no es conveniente alargar el chasis sin adicionar algún refuerzo estructural, si se opta por elegir un material con un S_{ut} menor al indicado por el acero SAE 1025 del chasis Original debido a que se puede generar una falla en fatiga a los $9.8E5$ ciclos de carga. Finalmente, el Modelo 6 es el que representa menores deformaciones y mayores factores de seguridad para todas las condiciones vs el chasis Original.

Palabras clave: Chasis, Volkswagen, Análisis Estructural, Modificaciones, Fatiga

1. METODOLOGÍA

Se comienza por diseñar los modelos en CAD del chasis Original y las 6 nuevas versiones del mismo. A continuación, se definen las condiciones de operación de carga y se aplican dentro de un estudio *Static Structural* en *Ansys Workbench* planteando las cargas estáticas y cíclicas (Fatiga). Después de ello, se obtienen los resultados del chasis Original en términos de factores de seguridad estáticos promedios (F.S STATIC Original), fatiga (F.S FATIGUE Original) y deformaciones totales máximas (Def. máximas Original). A continuación, se calculan las deformaciones totales máximas permisibles que pueden experimentar los 6 nuevos Modelos (Def. máximas permisibles) a partir de las deformaciones Originales. Se realiza el mismo proceso para cada uno de los 6 nuevos Modelos. El Modelo más eficiente es el que presenta factores de seguridad en fatiga iguales o superiores a los del chasis Original y deformaciones totales máximas iguales o inferiores a las deformaciones totales máximas permisibles de las piezas analizadas. El siguiente diagrama resume las etapas de trabajo de forma ordenada.

Diagrama – Metodología de proceso



Fuente – Autoría propia

2. DESARROLLO

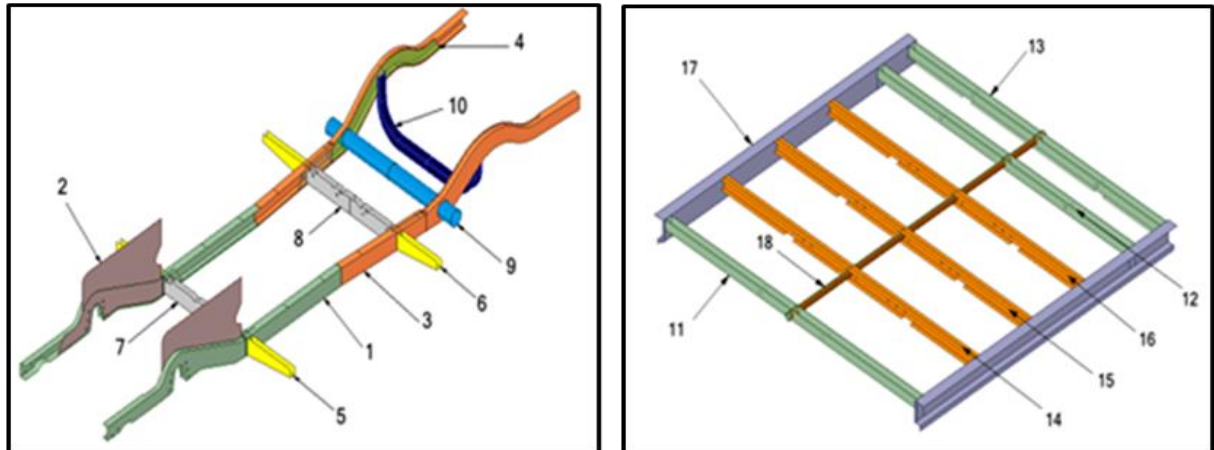
2.1. Geometría

La primera etapa, consiste en definir cada uno de los modelos geométricos junto a las partes relevantes para los análisis, al igual que establecer Zonas específicas para la correspondiente lectura de los resultados y posterior análisis de los mismos.

2.1.1. Caracterización de piezas

Se presentan en los Cuadros 1-2, los nombres de las piezas en el chasis Original descritos por el manual de autopartes de la Volkswagen Transporter 1–T2¹, excluyendo en rojo aquellas estructuras que no son de interés para el análisis.

Ilustración 1 – Elementos estructurales del chasis



Fuente – Autoría propia

Cuadro 1 – Piezas inferiores

Parte	Nombre	Abreviación
1	Side member front	smf
2	Reinforcement side member front	rsmf
3	Side member rear	smr
4	Reinforcement side member rear	rsmr
5,6	Outrigger front – rear	o1 – o2
7,8	Intermediate brace front – rear	ibf - ibr
9	Rear tube	rt
10	Engine mounting frame	emf

Fuente - Autoría propia

¹ (ROBERDS; WHITLOCK, 2011)

Cuadro 2 - Piezas superiores

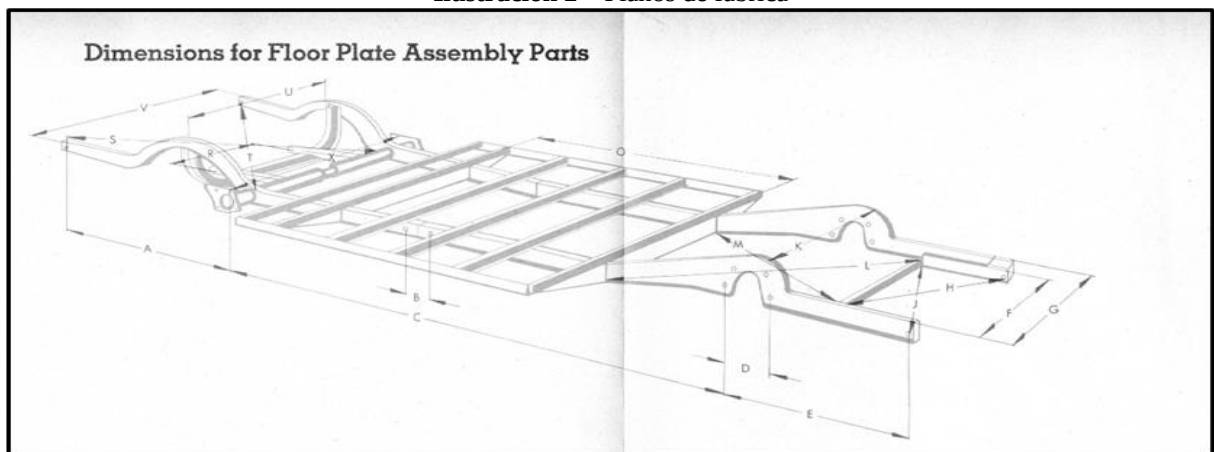
Parte	Nombre	Abreviación
11,12,13	Top hat section 1-2-3	ths1-ths2-ths3
14,15,16	I beam section 1-2-3	ibs1-ibs2-ibs3
17	Lateral member	lm
18	Down tube	dt

Fuente - Autoría propia

2.1.2. Diseños CAD

En esta etapa, se realizó la toma de medidas del chasis Original, verificando algunas distancias con la ayuda de planos de fábrica. Posterior a ello, se diseñó el CAD Original y de los 6 nuevos Modelos a partir de cuerpos de superficie, utilizando el Software Ansys SpaceClaim 2022 R1 de la Suite Ansys Workbench.

Ilustración 2 – Planos de fábrica



Fuente - (“VW Split Bus Frame Dimensions”, 1997)

Ilustración 3 – Levantamiento de medidas de chasis Original

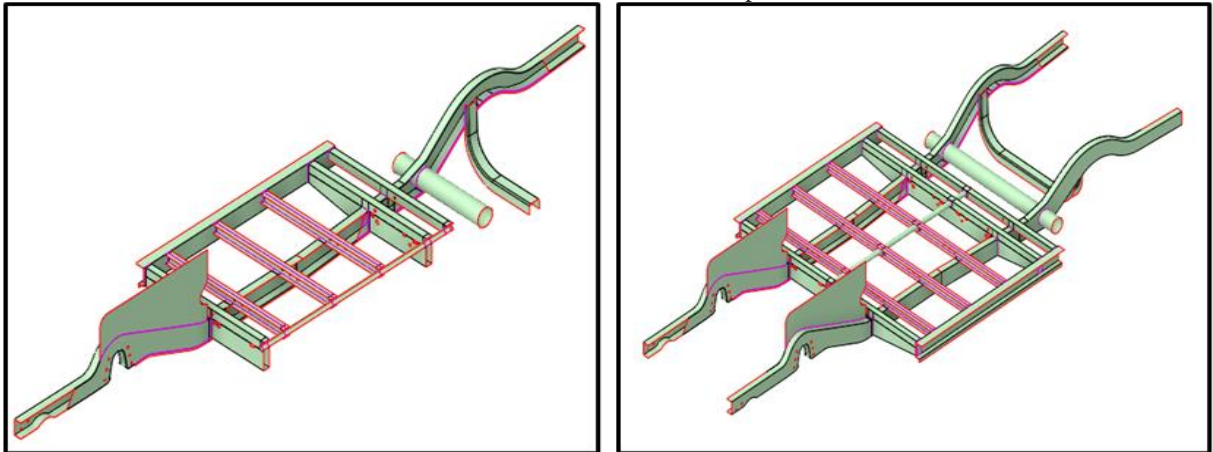


Fuente - Autoría propia

CAD – Modelo Original

Los diseños CAD del chasis original, siguen las partes establecidas en la Ilustración 1. Se diseñan 2 cuerpos de prueba para este modelo; el **Cuerpo A** corresponde únicamente a la mitad del chasis para aprovechar las capacidades *Symmetry* de *Ansys Static Structural*. El **Cuerpo B**, corresponde al chasis en su totalidad, el cual es utilizado en el escenario de Peso+ Curva y pruebas en fatiga².

Ilustración 4 – Diseños CAD Cuerpos A - B



Fuente - Autoría propia

CAD – Modelos 1 a 3

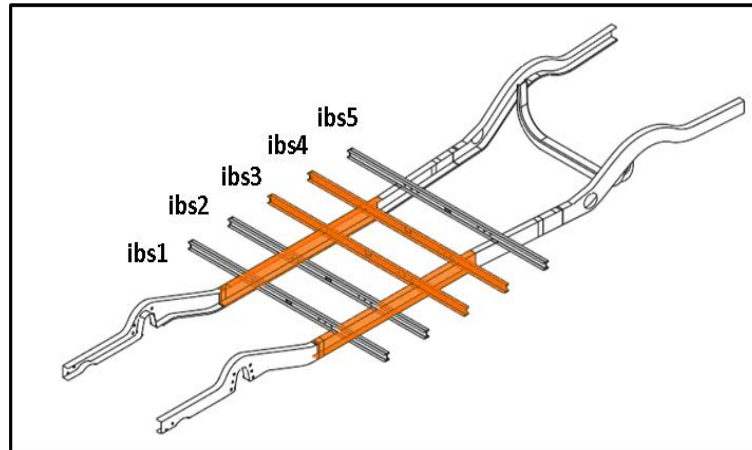
El diseño CAD para los Modelos 1 a 3, introduce la adición en 60 cm aplicado al elemento smf. Adicionalmente, manuales guía de versiones posteriores de Volkswagen Transporter T5³-LT⁴, describen que, al realizar una extensión en el chasis mayor a 350 mm, se debe adicionar un elemento transversal; en este caso se adicionaron dos elementos transversales (ibs3-ibs4) por el tamaño de la extensión. Se diseñó únicamente un **Cuerpo C** del chasis completo, debido a que solo serán analizados los escenarios en fatiga.

² Ansys Static Structural no es compatible para opciones de simetría bajo cargas cíclicas.

³ (Body builder guidelines Transporter T5, 2008)

⁴ (Body builder guidelines LT, 2007)

Ilustración 5 – Adición de elementos transversales ibs3-ibs4

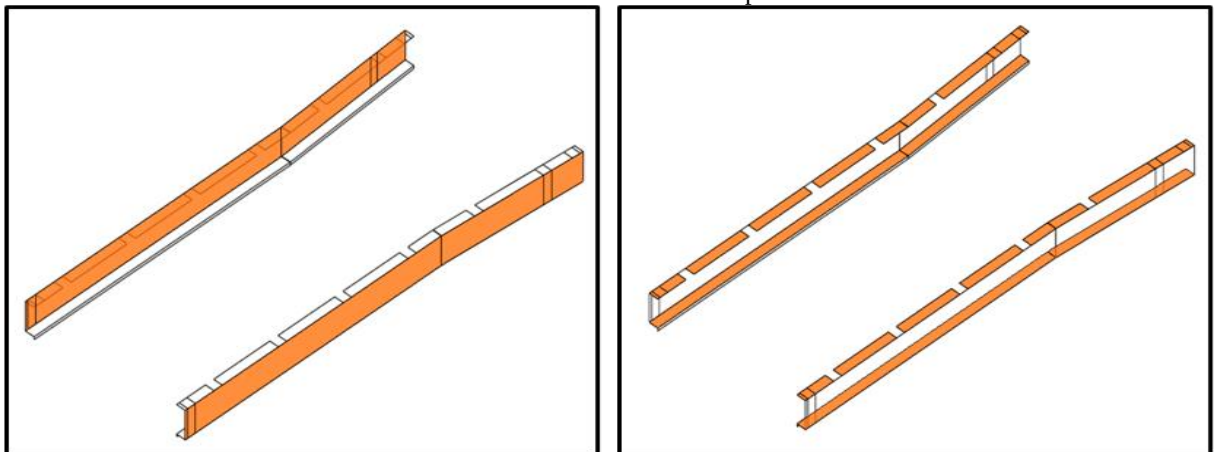


Fuente - Autoría propia

CAD – Modelos 4 y 5

El manual guía de Volkswagen Transporter T5, utiliza refuerzos aplicados a smf-smr. Adicionalmente, la VSB 14 Body And Chassis⁵, sugiere que los refuerzos no sobrepasen el doble del espesor a la pieza donde serán colocados. De esta manera, se refuerzan estas piezas con láminas en calibre 18 (1,21mm) en el alma para generar el **Cuerpo D** (Modelo 4) y en los flanges superiores e inferiores para el **Cuerpo E** (Modelo 5).

Ilustración 7 - Diseños CAD Cuerpos D - E



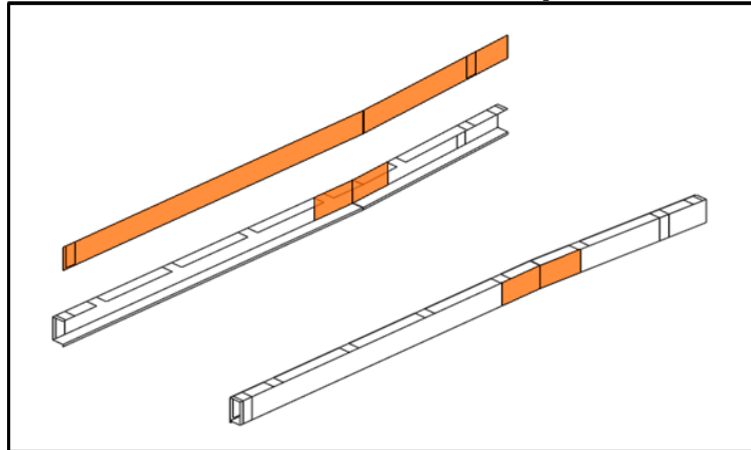
Fuente - Autoría propia

CAD – Modelo 6

El diseño CAD para el Modelo 6, incorpora láminas calibre 18 (1,21 mm) para cerrar los perfiles smf - smr. Adicionalmente, se refuerza la zona de unión entre estas piezas con otra lámina calibre 18 de 30 cm de longitud. Se genera el **Cuerpo F**.

⁵ (“Section LH Body and chassis”, 2011)

Ilustración 8 - Diseño CAD Cuerpo F



Fuente - Autoría propia

2.1.3. Cortes generales

Se realizaron 2 cortes generales en todos los Cuerpos, con el fin de obtener la geometría central del chasis. Posteriormente, se realizaron cortes en las zonas de contacto entre piezas, con el fin de rastrear las tensiones actuantes promedio. La Ilustración 10, muestra 18 “Zonas de control” para los Cuerpos del chasis Original y la Ilustración 11 muestra 24 Zonas para los Cuerpos de los Modelos. Para las deformaciones elásticas, se utilizan los valores máximos de cada pieza.

Ilustración 9 – Cortes generales en el chasis

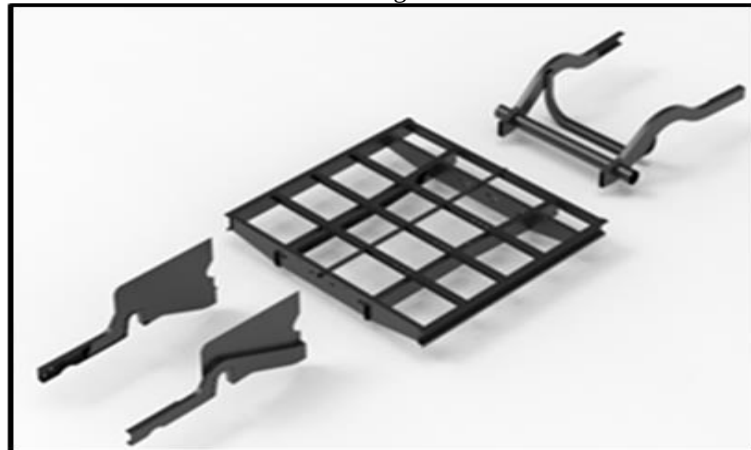
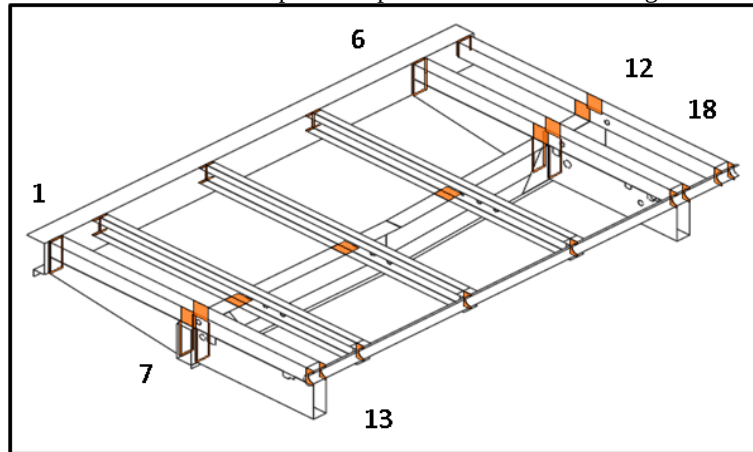


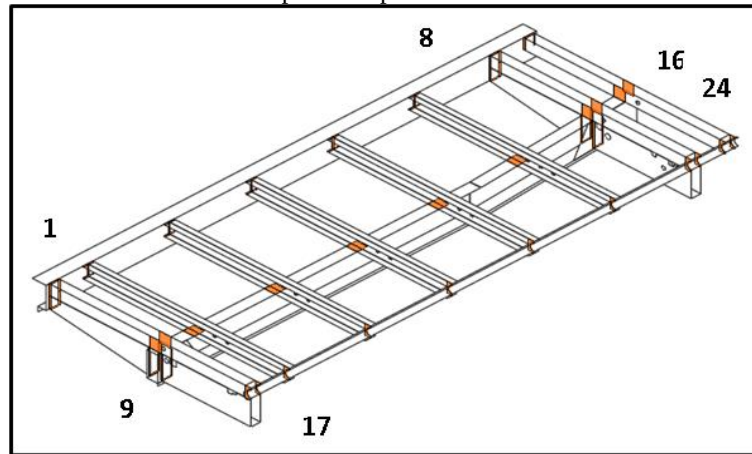
Ilustración – Autoría propia

Ilustración 10 – Superficies para esfuerzos chasis Original



Fuente- Autoría propia

Ilustración 11 – Superficies para esfuerzos chasis Modelos



Fuente - Autoría propia

2.2. Modelo FEM

2.2.1. Materiales

En la Tabla 1 se exponen las propiedades mecánicas estáticas y de fatiga. Manuales guía de versiones posteriores de Volkswagen Transporter T5-LT, recomiendan uso de acero DIN St 1203 y DIN ST 37-2 para realizar los procesos de alargue de chasis.

Tabla 1 – Propiedades mecánicas

Modelo	Material	σ_y (Mpa)	ν	E (Mpa)	Sut (Mpa)
Original - Modelo 1-4-5-6	SAE 1025	250	0.3	200	460
Modelo 2	DIN ST 12-03	280	0.3	200	410
Modelo 3	DIN ST 37-2	235	0.3	200	470

Fuente- Autoría propia

Para obtener las curvas S-N, Ansys Workbench calcula los esfuerzos medios (S_m) como el 87% del esfuerzo último a tensión (Sut) en 10 ciclos de carga. Para la resistencia a la fatiga corregida (S_e) evaluada en 1E6 ciclos de carga, Ansys hace uso del 50% de Sut multiplicado por un factor

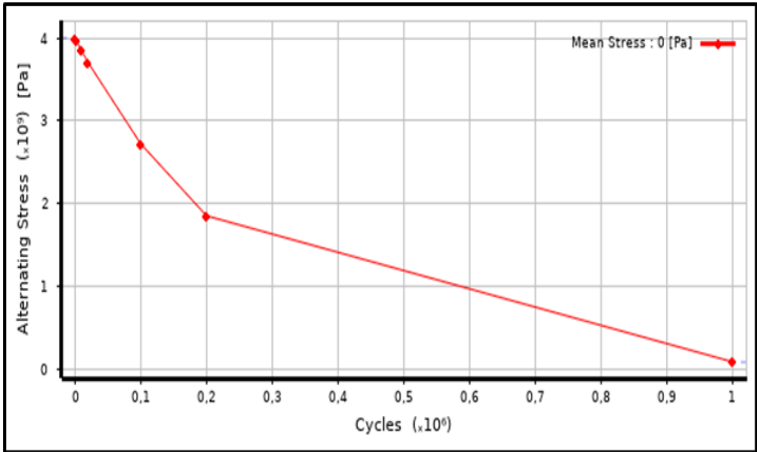
de corrección de 0.37. de esta manera se obtienen dos puntos para proyectar una función logarítmica y obtener las curvas S-N para los materiales bajo las mismas condiciones.

Tabla 2 – Esfuerzos en fatiga

Esfuerzo	N. ciclos	Formulación
Sm	10	Sut(0,87)
Se	1E6	Sut(0,5)(0,37)

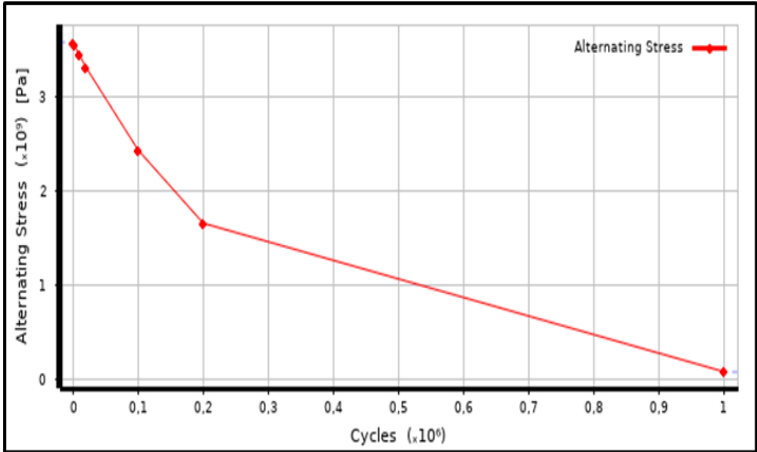
Fuente - Autoría propia

Ilustración 12 – Curvas S-N acero SAE 1025



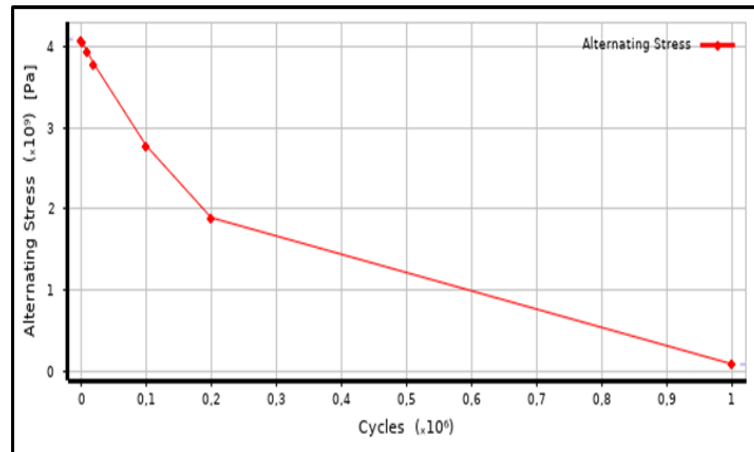
Fuente – Autoría propia

Ilustración 13 – Curvas S-N acero DIN St 12-03



Fuente - Autoría propia

Ilustración 14 – Curvas S-N acero DIN St 37-2



Fuente - Autoría propia

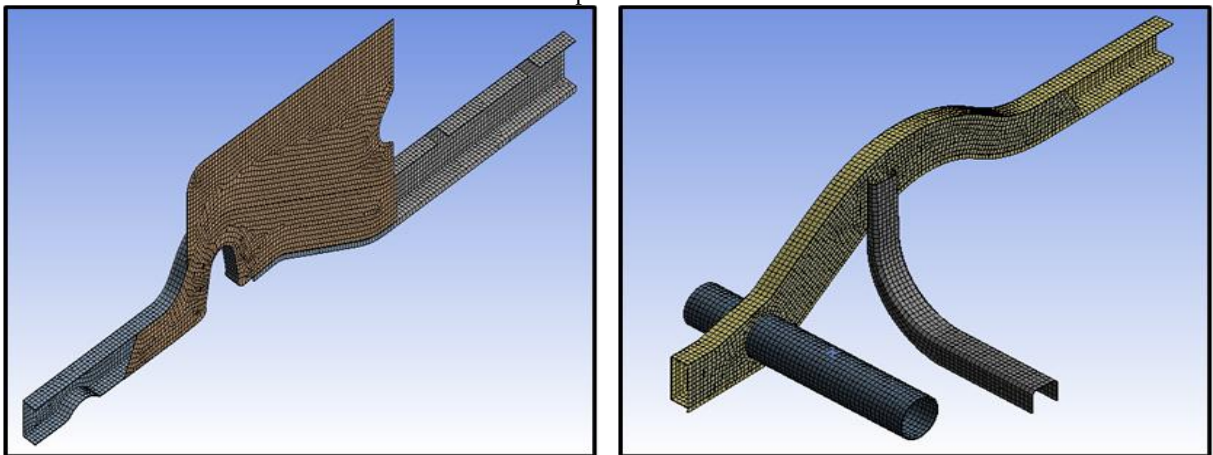
2.2.2. Conexiones

No se representan conexiones de tipo *Contact* para modelar las uniones entre piezas. Para simplificar, se utiliza la herramienta *Merge Topology*.

2.2.3. Mallado

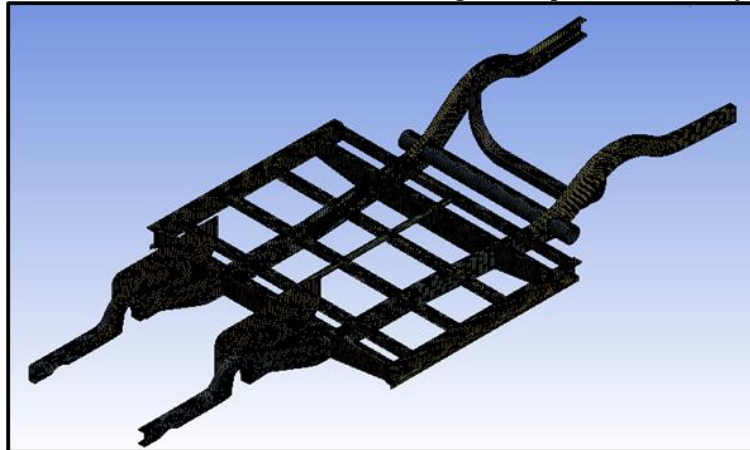
Se utiliza una malla inicial general con un *Mesh Size* de 10 mm aplicado al Cuerpo A para ver el comportamiento de su calidad y la respuesta de resultados. La Ilustración 16 muestra la aplicación de *Symmetry* al mallado.

Ilustración 15 – Aplicación de malla inicial



Fuente – Autoría propia

Ilustración 16 – Visualización de malla general aplicando *Simmetry*

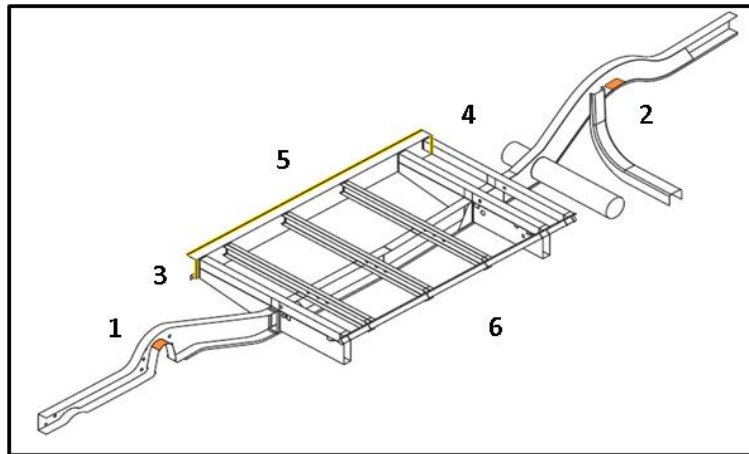


Fuente - Autoría propia

2.2.4. Condiciones de contorno

Ansys Structural Static realiza el mallado para cuerpos de superficie, con elementos *Shell 184*. A continuación, se detallan los elementos con restricción y en la Tabla 3; estas condiciones se repiten para todos los Cuerpos.

Ilustración 17 – Elementos con restricción de movimiento



Fuente – Autoría propia

Tabla 3 – Valores de restricción

Parte	ux	uy	uz	rotx	roty	rotz
1-2	0	0	0	0	0	0
3-4	0	0	0	free	free	free
5	free	0	free	free	free	free
6 (plano de simetría)	free	0	0	free	0	0

Fuente – Autoría propia

2.2.5. Escenarios de operación y cargas

El parámetro *G-Force*, es un indicador de la aceleración a la que se expone un cuerpo en una dirección. Se define como el cociente entre la sumatoria de todas las cargas aplicadas al sistema, diferentes al peso, sobre este valor. *G-Force* se multiplica a las cargas inerciales.

$$G(x, y, z) = \frac{\sum F \neq w(y)}{w(y)}$$

Tabla 4 – Cálculo de *G-Forces*

Caso de carga	Escenario	G-Force formula	Carga útil m (kg)
Flexión Vertical (-y)	Peso	$G(-y) = -\frac{ay}{g} + 1$	785
Flexión Frontal (-y) + (+z)	Peso + Aceleración	$G(-z) = \left(\frac{1}{g}\right) az$	
Flexión Frontal (-y) + (-z)	Peso + Frenado	$G(+z) = -\left(\frac{1}{g}\right) az$	
Flexión Lateral (-y) + (+x)	Peso + Curva	$G(+x) = \left(\frac{1}{g}\right) ax$	

Fuente - Autoría propia

Cálculo de aceleraciones

La Tabla 5 muestra parámetros de tiempo estimados por la experiencia en el manejo del vehículo, y otros valores, se fundamentan en la literatura.

Tabla 5 – Cálculo de aceleraciones

Aceleración	Formula	Parámetros	G-Force final
-ay	-ay= 0	---	G(-y)=1
+az	$az = \frac{V_{\text{máx. acel}}}{t}$	$V_{\text{máx. acel}} = \frac{80\text{km}}{h}$ ⁶ t= 20s	G(-z)=0,12
-az	$-az = -\frac{V_{\text{freno}}}{t}$	$V_{\text{freno}} = \frac{80\text{km}}{h}$ t= 5s	G(+z)⁷=0,47
+ax	$+ax = \frac{V_{\text{curva}}^2}{r}$	$V_{\text{freno}} = \frac{50\text{km}}{h}$ ⁸ r= 30m	G(+x)=0,65

Fuente - Autoría propia

⁶ (Transporter,1953)

⁷ (Euro NCAP,2011), G(+z) puede oscilar entre 0.5-0.6

⁸ (Euro NCAP,2011)

2.2.5.1. Cargas estáticas

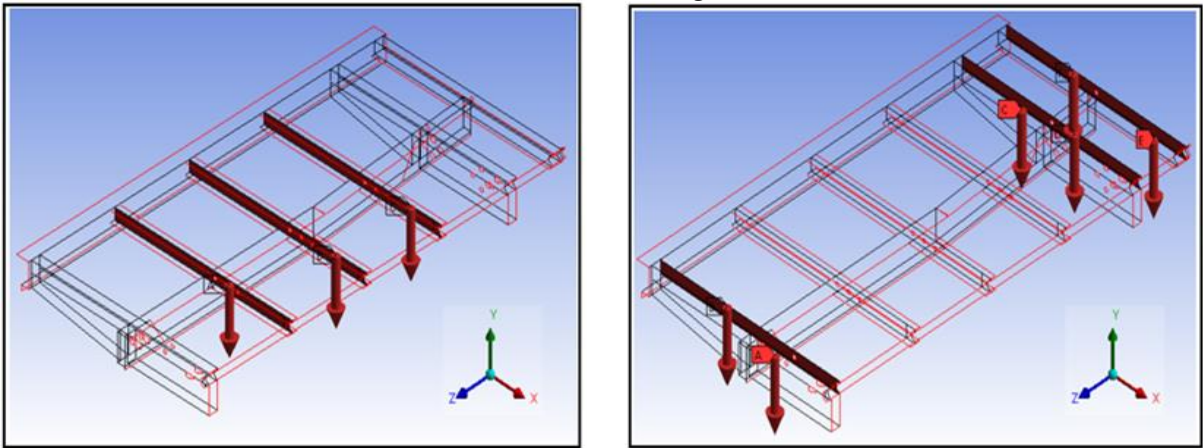
La aplicación de cargas se realizó en las almas de los elementos ibs – ths, utilizando 70% de la carga general aplicada a ibs y un 30% a ths.

Tabla 6 – Cálculo de cargas por escenario

Escenario	Formulas
Peso	$F_y = \frac{(0.7,0.3)^9 * m * g * G(-y)}{(3,5,6)^{10}}$
Peso + Aceleración	$F_y + \left(F_z = \frac{(0.7,0.3) * m * g * G(+z)}{(3,5,6)} \right)$
Peso + Frenado	$F_y + \left(F_z = \frac{(0.7,0.3) * m * g * G(-z)}{(3,5,6)} \right)$
Peso + Curva	$F_y + \left(F_x = \frac{(0.7,0.3) * m * g * G(+x)}{(3,5,6)} \right)$

Fuente – Autoría propia

Ilustración 18 – Aplicación de cargas escenario Peso



Fuente – Autoría propia

2.2.5.2. Cargas en fatiga

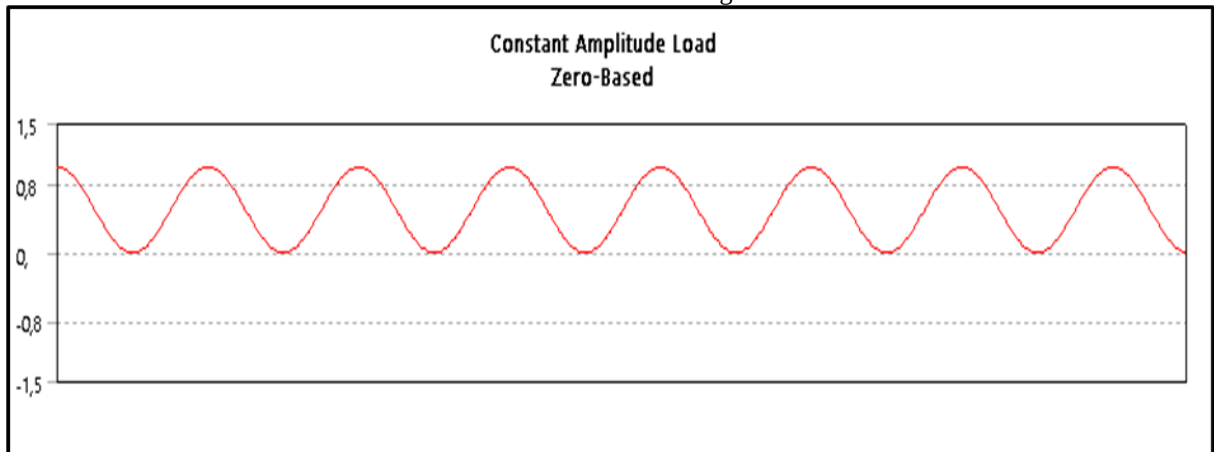
Se eligió el modelo de carga cíclica *Constant Amplitude Load Zero-Based* utilizando únicamente los esfuerzos alternantes promedios. Se introduce un factor de concentración de esfuerzos en fatiga $K_f = 1.5^{11}$

⁹ 0.7 para ibs, 0.3 para ths

¹⁰ 3 para ibs Original, 5 para ibs y 6 para ths en los Modelos

¹¹ Valores típicos en la literatura utilizan valores de KF de 1.2-1.8

Ilustración 19- Modelo de caga cíclica



Fuente – Autoría propia

2.2.6. Resultados de evaluación y condicionales

Las deformaciones totales máximas en los 6 Modelos no deben superar las permisibles. Para ello, las deformaciones totales máximas Originales deben multiplicarse por la proporción del aumento de la distancia entre ejes, obteniéndose así las permisibles. En la Tabla 7 se resumen los factores de seguridad condicionales y las deformaciones permisibles.

- Distancia entre ejes chasis original = 2.4 m.
- Distancia entre ejes chasis alargado = 3 m.

Tabla 7 - Condicionales

Modelo	Fs estático	Def. máx totales	F.s fatiga
Original	$F. s^{12} = \frac{\sigma_y}{(\sigma_{vm})_{prom}} > 1$	def.o	$F. s = \frac{S_e}{(\sigma_a)_{prom} * K_f} > 1$
Modelos 1 a 6	N/A	$\leq \text{def.o} * (1.25)^{13}$	

Fuente – Autoría propia

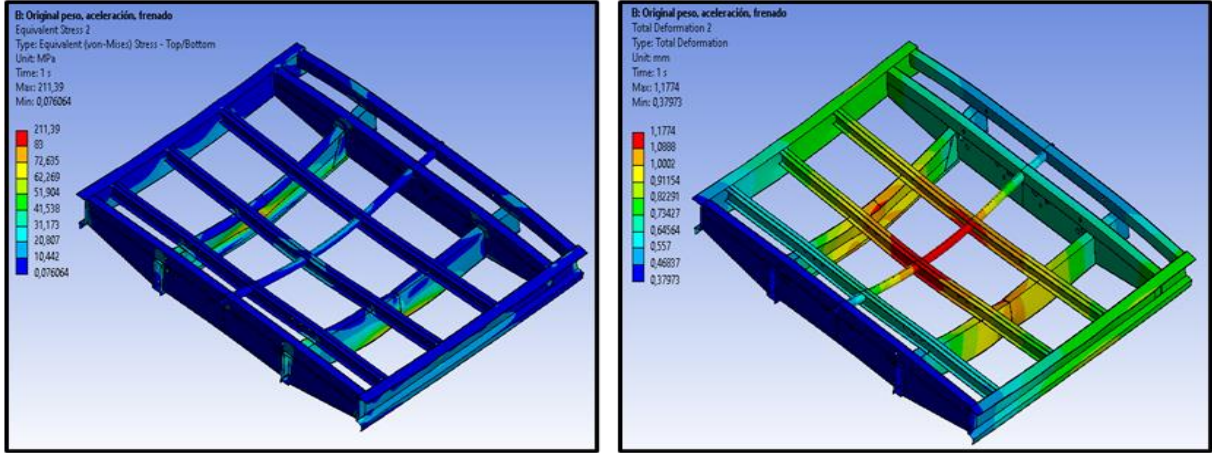
¹² (“Section H - Chassis”, 2019) expone factores de seguridad estáticos próximos de 3

¹³ (“Section LT - Test Procedures”, 2011)

3. RESULTADOS

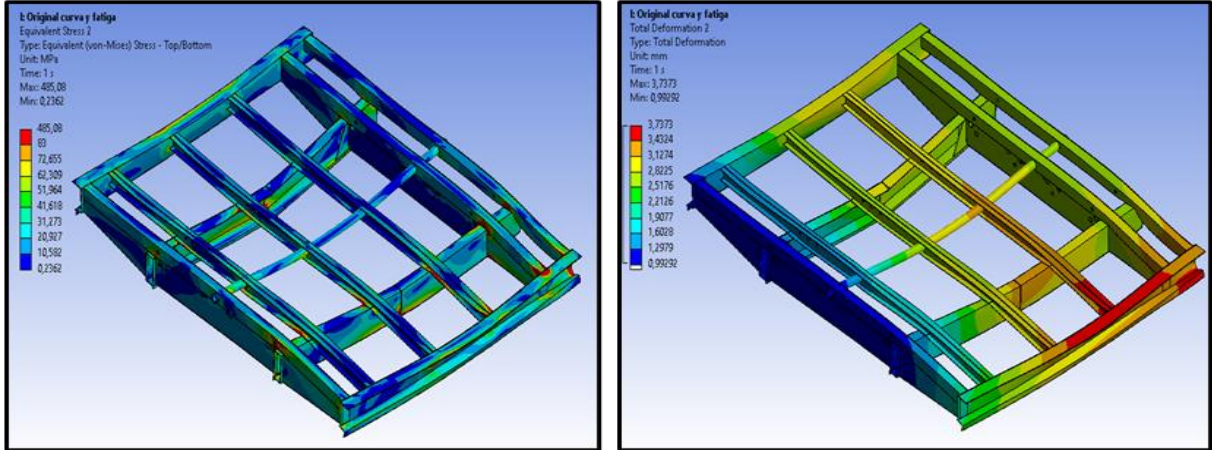
A continuación, se muestran algunos resultados gráficos de esfuerzos y deformaciones.

Ilustración 21 – Peso chasis Original



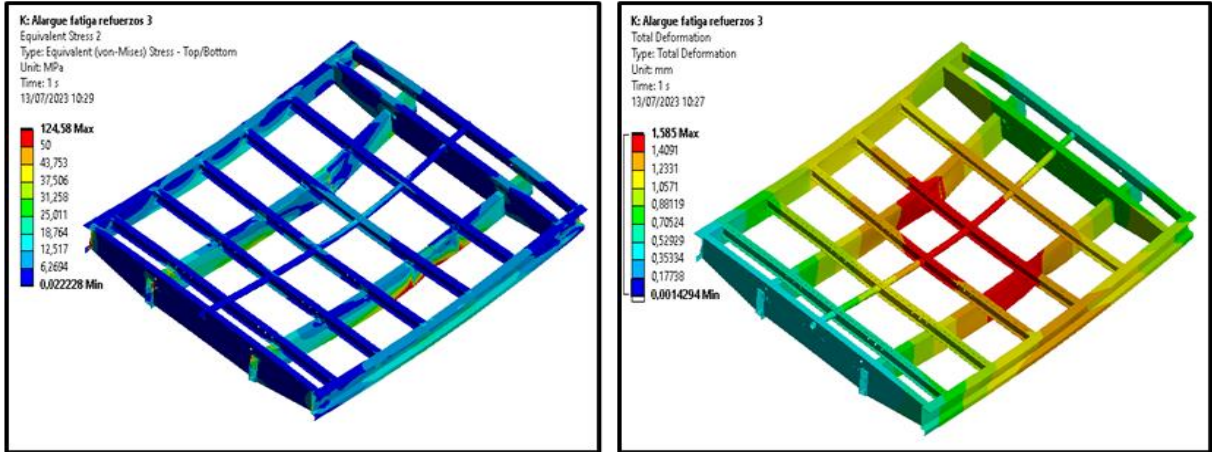
Fuente – Autoría propia

Ilustración 24 - Peso+Curva chasis Original



Fuente – Autoría propia

Ilustración 25 - Peso chasis Modelo 6

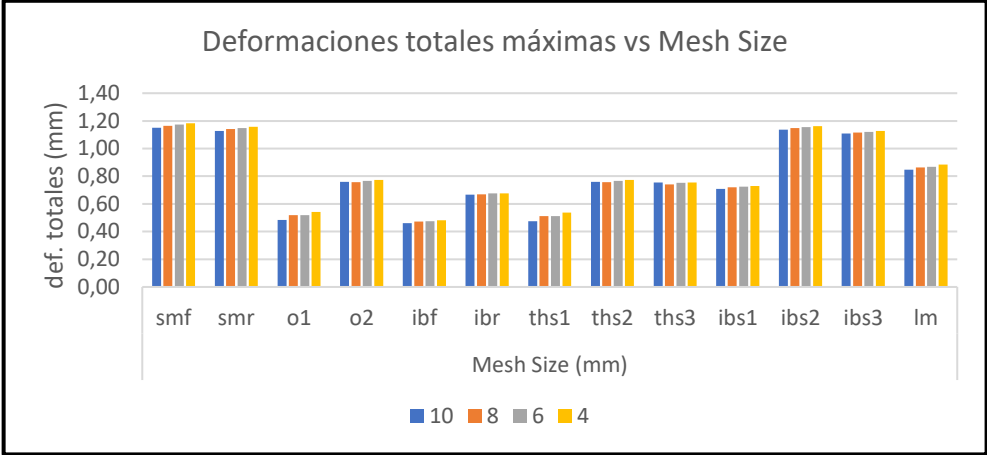


Fuente - Autoría propia

3.1.1. Convergencia de malla

Se realizó un análisis de convergencia de malla, comenzando con la malla inicial propuesta, y reduciendo *Mesh Size* en 8, 6 y 4 mm en el escenario de Peso para el chasis Original. La Tabla 8 muestra que los elementos o1-ths1 presentan mayores porcentajes de cambio en deformaciones; esto obedece a que estas partes se encuentran muy cerca de condiciones de contorno. De la misma manera, en la Tabla 9 la Zona 1 y 6 presentan mayores cambios por el mismo motivo en términos de esfuerzos.

Ilustración 33 – Convergencia de deformaciones



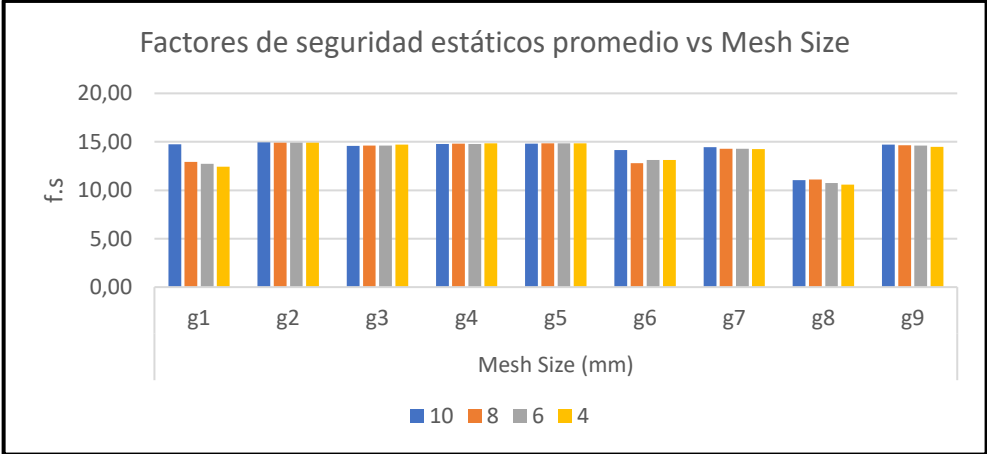
Fuente – Autoría propia

Tabla 8 – Porcentaje de cambio en deformaciones

Malla	smf	smr	o1	o2	ibf	ibr	ths1	ths2	ths3	ibs1	ibs2	ibs3	lm
8 mm	1,36	1,34	7,38	0,26	2,42	0,09	7,87	0,23	1,73	1,72	0,99	0,65	2,04
6 mm	2,03	1,96	7,15	1,00	2,99	1,09	7,62	1,02	0,36	2,24	1,48	1,21	2,43
4 mm	2,92	2,79	12,24	1,84	4,33	1,30	12,90	1,87	0,02	3,17	2,09	1,66	4,35

Fuente - Autoría propia

Ilustración 34 - Convergencia de esfuerzos Zonas 1 a 9



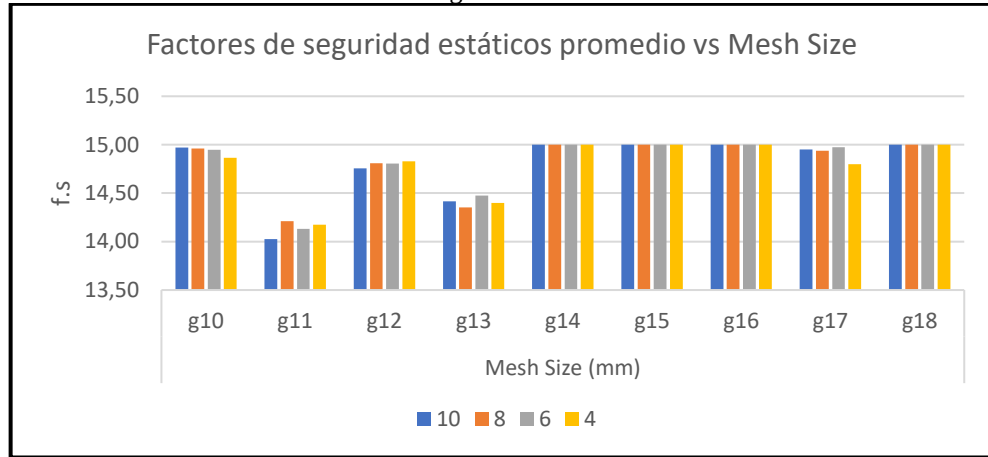
Fuente – Autoría propia

Tabla 9 - Porcentaje de cambio en esfuerzos Zonas 1 a 9

Malla	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9
8 mm	12,34	0,31	0,27	0,07	0,10	9,57	1,04	0,52	0,32
6 mm	13,70	0,18	0,40	0,01	0,09	7,22	0,99	2,68	0,70
4 mm	15,72	0,20	1,00	0,29	0,19	7,29	1,28	4,34	1,60

Fuente – Autoría propia

Ilustración 35 - Convergencia de esfuerzos Zonas 10 a 18



Fuente – Autoría propia

Tabla 10 - Porcentaje de cambio en esfuerzos Zonas 10 a 18

Malla	g10	g11	g12	g13	g14	g15	g16	g17	g18
8 mm	0,05	1,33	0,35	0,45	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00
6 mm	0,15	0,76	0,32	0,40	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00
4 mm	0,69	1,05	0,48	0,11	0,00	0,00	0,00	1,01	0,00

Fuente - Autoría propia

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan los resultados en deformaciones para cada pieza y factores de seguridad. Son resaltados en rojo los resultados no favorables. El condicional de deformaciones, representa los valores originales multiplicados por 1,25. Adicionalmente se muestra un sumatorio que lleva en consideración la suma de las deformaciones individuales que sobrepasan las deformaciones permisibles (rojos - verdes).

Peso

Tabla 11 - Deformaciones por pieza - Peso

Chasis	smf	smr	o1	o2	ibf	ibr	ths1	ths2	ths3	ibs1	ibs2	ibs3	lm	Σ
<u>Original</u>	1,15	1,13	0,48	0,76	0,46	0,67	0,48	0,76	0,75	0,71	1,14	1,11	0,85	
<u>Condicional</u>	1,44	1,41	0,60	0,95	0,58	0,83	0,59	0,95	0,94	0,88	1,42	1,38	1,06	
<u>Mod. 1 a 3</u>	2,48	2,01	0,50	1,16	0,56	1,06	0,71	1,16	1,11	0,88	1,43	1,95	2,10	4,2
<u>Mod. 4</u>	1,98	1,67	0,45	0,98	0,49	0,89	0,63	0,98	0,94	0,77	1,23	1,66	1,77	1,9
<u>Mod. 5</u>	2,16	1,71	0,46	1,04	0,50	0,96	0,64	1,04	1,00	0,79	1,30	1,75	1,88	2,6
<u>Mod. 6</u>	1,50	1,44	0,45	0,96	0,52	0,88	0,61	0,96	0,92	0,75	1,12	1,46	1,59	0,8

Fuente – Autoría propia

Tabla 12 - F.s estáticos y en fatiga promedios críticos – Peso

Chasis	Zona crítica	F.s estático	F.s fatiga
<u>Original</u>	g8	11,05	4,22
<u>Modelo 1</u>	g10	N/A	2,52
<u>Modelo 2</u>			2,25
<u>Modelo 3</u>			2,57
<u>Modelo 4</u>			3,13
<u>Modelo 5</u>			2,67
<u>Modelo 6</u>			4,28

Fuente – Autoría propia

Peso+Aceleración

Tabla 13 - Deformaciones por pieza – Peso+Aceleración

Chasis	smf	smr	o1	o2	ibf	ibr	ths1	ths2	ths3	ibs1	ibs2	ibs3	lm	Σ
<u>Original</u>	1,15	1,13	0,51	0,74	0,51	0,64	0,51	0,74	0,73	0,75	1,15	1,10	0,85	
<u>Condicional</u>	1,43	1,41	0,64	0,93	0,64	0,80	0,64	0,93	0,92	0,94	1,44	1,38	1,06	
<u>Mod. 1 a 3</u>	2,46	1,98	0,53	1,11	0,62	1,01	0,78	1,11	1,06	0,94	1,47	1,96	2,08	4,1
<u>Mod. 4</u>	1,95	1,63	0,47	0,94	0,55	0,84	0,70	0,94	0,89	0,83	1,27	1,67	1,76	1,8
<u>Mod. 5</u>	2,13	1,68	0,49	1,00	0,56	0,91	0,70	1,00	0,95	0,85	1,33	1,76	1,87	2,5
<u>Mod. 6</u>	1,47	1,41	0,49	0,92	0,58	0,83	0,68	0,92	0,87	0,81	1,17	1,48	1,57	0,7

Fuente – Autoría propia

Tabla 14 - F.s estáticos y en fatiga promedios críticos – Peso+Aceleración

Chasis	Zona crítica	F.s estático	F.s fatiga
<u>Original</u>	g8	11,07	4,38
<u>Modelo 1</u>	g10	N/A	2,64
<u>Modelo 2</u>			2,36
<u>Modelo 3</u>			2,70
<u>Modelo 4</u>			3,33
<u>Modelo 5</u>			2,89
<u>Modelo 6</u>			4,63

Fuente - Autoría propia

Peso+Frenado**Tabla 15** - Deformaciones por pieza – Peso+Frenado

Chasis	smf	smr	o1	o2	ibf	ibr	ths1	ths2	ths3	ibs1	ibs2	ibs3	lm	Σ
<u>Original</u>	1,16	1,12	0,40	0,82	0,51	0,89	0,56	0,89	0,86	0,76	1,19	1,23	0,88	
<u>Condicional</u>	1,45	1,40	0,49	1,02	0,63	1,11	0,70	1,11	1,07	0,95	1,48	1,54	1,10	
<u>Mod. 1 a 3</u>	2,60	2,15	0,44	1,35	0,47	1,35	0,53	1,35	1,33	0,72	1,36	1,97	2,23	4,5
<u>Mod. 4</u>	2,09	1,84	0,38	1,16	0,43	1,16	0,48	1,16	1,14	0,64	1,17	1,67	1,89	2,3
<u>Mod. 5</u>	2,25	1,83	0,40	1,22	0,43	1,22	0,49	1,22	1,20	0,67	1,24	1,77	2,00	2,9
<u>Mod. 6</u>	1,63	1,58	0,37	1,14	0,43	1,14	0,48	1,15	1,12	0,62	1,05	1,47	1,70	1,2

Fuente – Autoría propia

Tabla 16 - F.s estáticos y en fatiga promedios críticos – Peso+Frenado

Chasis	Zona crítica	F.s estático	F.s fatiga
<u>Original</u>	g8	6,32	2,37
<u>Modelo 1</u>	g10	N/A	1,85
<u>Modelo 2</u>			1,65
<u>Modelo 3</u>			1,89
<u>Modelo 4</u>			2,15
<u>Modelo 5</u>			2,01
<u>Modelo 6</u>			2,75

Fuente - Autoría propia

Peso+Curva**Tabla 17** - Deformaciones por pieza – Peso+Curva

Chasis	smf	smr	o1	o2	ibf	ibr	ths1	ths2	ths3	ibs1	ibs2	ibs3	lm	Σ
<u>Original</u>	3,10	3,09	1,23	2,81	1,22	2,82	2,17	3,44	3,40	2,47	3,38	3,72	3,11	
<u>Condicional</u>	3,88	3,86	1,54	3,51	1,52	3,53	2,72	4,29	4,25	3,09	4,22	4,65	3,88	
<u>Mod. 1 a 3</u>	4,50	4,48	1,02	3,25	1,18	3,38	2,02	3,92	3,76	2,35	3,59	4,64	5,01	2,4
<u>Mod. 4</u>	4,25	4,23	1,00	3,19	1,13	3,28	1,95	3,79	3,65	2,27	3,43	4,42	4,79	1,7
<u>Mod. 5</u>	4,26	4,25	1,00	3,18	1,13	3,30	1,96	3,81	3,66	2,27	3,42	4,41	4,79	1,7
<u>Mod. 6</u>	4,19	4,17	1,02	3,22	1,15	3,32	1,96	3,83	3,69	2,28	3,29	4,21	4,68	1,4

Tabla 18 - F.s estáticos y en fatiga promedios críticos – Peso+Curva

Chasis	Zona crítica	F.s estático	F.s fatiga
<u>Original</u>	g14	4,07	1,39
<u>Modelo 1</u>	g19	N/A	1,06
<u>Modelo 2</u>			0,94
<u>Modelo 3</u>			1,08
<u>Modelo 4</u>			1,10
<u>Modelo 5</u>			1,10
<u>Modelo 6</u>			1,25

Fuente – Autoría propia

- Los Modelos 1 a 3 presentan las mismas deformaciones en todos los escenarios, debido a que los materiales utilizados comparten el mismo módulo de elasticidad E y razón de Poisson ν .
- El caso crítico se presenta en el escenario de Peso+Curva resultando en factores de seguridad estáticos y en fatiga más bajos y deformaciones elásticas más elevadas.
- Ninguno de los 6 nuevos Modelos presentan deformaciones favorables para la totalidad de las piezas.
- El Modelo 6 es el que mejor comportamiento tiene en deformaciones totales. Su sumatorio en todos los escenarios es el más bajo, lo que indica que es el Modelo que más cerca se encuentra a cumplir con las deformaciones permisibles de forma global.
- Para el escenario de Peso, los Modelos 4 a 6 presentan 4 piezas que cumplen el condicional de deformación respecto a los Modelos 1 a 3 con 3 piezas.
- Para el escenario de Peso+Aceleración, los Modelos 4 y 5 presentan 4 piezas que cumplen el condicional de deformación respecto a los Modelos 1 a 3 con 3 piezas. el Modelo 6 es superior y cumple para 8 piezas.
- Para el escenario de Peso+Frenado, los Modelos 1 a 5, presentan 5 piezas que cumplen el condicional de deformación. El Modelo 6 es superior con 6 piezas.
- Para el escenario de Peso+Curva, todos los Modelos son igualmente favorables para 10 piezas que cumplen el condicional de deformación.
- Los puntos críticos con factores de seguridad más bajos, se presentan en el grupo 8 para el chasis original y grupo 10 para todos los Modelos y para 3 de los escenarios de carga; se cumple el requisito y no existe falla estática ($f.s > 1$). Se asegura vida infinita ($f.s > 1$, número de ciclos

>1E6) bajo la carga cíclica actuante. Esto aplica en los casos de Peso, Peso+Aceleración y Peso+Frenado.

- Para el escenario de Peso+Curva, la zona 14 y la zona 19 presentan los factores de seguridad estáticos y en fatiga menores para el chasis Original y los Modelos, respectivamente; se cumple el requisito y no existe falla estática ($f.s > 1$). El Modelo 2, es el único que presentan un comportamiento desfavorable en fatiga, con un valor de $F.s = 0,94$ lo que se traduce en $9,8E5$ ciclos de carga antes de que se produzca la fractura, teórica, en esta zona y bajo las suposiciones establecidas.

- El Modelo 2 es el diseño que menos garantiza confiabilidad estructural al presentar los factores de seguridad en fatiga más bajos en todos los escenarios planteados. Por otro lado, el Modelo 6 presenta mayor confiabilidad con factores de seguridad más altos.

5. IMPLEMENTACIÓN

Las siguientes imágenes muestran la separación y adición de elementos transversales en el chasis de la Volkswagen aplicando lo planteado en el Modelo 6.



6. CONCLUSIONES

1. Menos del 50% de las piezas en el chasis de los Modelos, cumplen con los condicionales de deformación elástica respecto al chasis original; esto se debe a que los materiales DIN St 12-03 y DIN St 37-2 presentan las mismas propiedades elásticas que el SAE 1025 y no representan una ventaja para limitar el rango de deformaciones.
2. Los resultados indican que los Modelos 4 a 6, correspondientes a la adición de refuerzos en los miembros transversales smf-smr, favorecen las deformaciones elásticas y las reducen para todos los escenarios planteados respecto a los Modelos 1 a 3 con cambios de material.
3. El chasis Original no sufre ningún tipo de falla estática ni en fatiga, al ser analizado en todos los escenarios de carga planteados y bajo las condiciones expuestas. El factor de seguridad estático crítico de 4,07 en la Zona 14, y para el escenario de Peso+Curva, es mayor a 3, expuesto en la literatura para cargas estáticas. El factor de seguridad en fatiga crítico de 1,39, asegura, teóricamente, vida infinita mayor a $1E6$ ciclos de carga para la Zona 14 en el mismo escenario.
4. No es recomendable realizar el alargue del chasis sin adicionar algún tipo de refuerzo en sus miembros longitudinales (smf-smr) y realizar un cambio de material, con un Sut menor que el indicado por el chasis Original, SAE 1025. Una alternativa de este tipo, puede ocasionar un fallo en fatiga bajo $9.8E5$ ciclos de carga en maniobra de Peso+Curva como los resultados lo indican en el Modelo 2.
5. La mejor alternativa de diseño corresponde al Modelo 6. Éste, muestra una menor concentración en deformaciones elásticas y cubre un mayor número de piezas que satisfacen las condiciones de deformación. En términos de esfuerzo, presenta un mayor factor de seguridad para todos los escenarios en comparación a los otros Modelos.

BIBLIOGRAFIA

- **Body builder guidelines LT.** Hannover: Volkswagen Nutzfahrzeuge, 2007.
- **Body builder guidelines Transporter T5.** Hannover: Volkswagen Nutzfahrzeuge, 2008.
- ROBERDS, M.; WHITLOCK, A. **Obsolete Air-Cooled Documentation Project.** Disponível em: <<http://oacdp.org/5867part.html>>.
- Section H - Chassis. Em: **Vehicle Standards Bulletin 6.** [s.l.] National Heavy Vehicle Regulator (NHVR, 2019. p. 11.
- Section LH Body and chassis. Em: **Vehicle Standarts Bulletin 14.** [s.l: s.n.]. v. 2.0.
- Section LT - Test Procedures. Em: **Vehicle Standarts Bulletin 14.** [s.l.] National Heavy Vehicle Regulator (NHVR), 2011. v. 2.0p. 10.
- **VW Split Bus Frame Dimensions.** Disponível em: <https://www.thesamba.com/vw/archives/info/split_bus_dimensions.php>.