



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Máster en Sistemas Mecánicos

ESTUDIO Y COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN SEMÁFORO FABRICADO EN MATERIALES COMPUESTOS FRENTE A SU HOMÓLOGO DE ACERO ANTE EL IMPACTO VEHICULAR

Autor: Roberto Elvira Viana

Director: Luis Castejón Herrer

Convocatoria: Septiembre 2013

Estudio y Comparación del Comportamiento de un Semáforo fabricado en Materiales Compuestos frente a su Homólogo de Acero ante el Impacto Vehicular

(Resumen)

En el presente Trabajo de Fin de Máster se ha pretendido desarrollar un análisis numérico comparativo entre semáforos contruidos en acero, frente a otros fabricados en PRFV.

Pero antes se ha extraído información relevante a los nuevos elementos de seguridad vial fabricados en materiales compuestos de informes estadísticos del RACE, el Transport Research Laboratory, y VINNOVA.

Todos ellos concluyen en que estos elementos son favorables a los convencionales de acero, comparando estadísticas de siniestralidad tanto en sus países como en el resto que los han implementado ya. Y alegando también que tienen otras ventajas como su reducido peso, su buen comportamiento como aislante eléctrico y ante la corrosión, e incluso con ventajas económicas por la reducción en los daños al vehículo y a sus integrantes.

Tras ello, el caso de análisis consistió en la simulación, mediante programas basados en el Método de los Elementos Finitos (PATRAN y ABAQUS), en un choque de un automóvil compacto contra los semáforos fabricados en PRFV y acero a diferentes velocidades (30, 45 y 60 km/h).

Por último se analizaron y se compararon deformadas a lo largo del tiempo, energías, deformaciones plásticas y posibles roturas en las columnas del semáforo y en el automóvil, para las diferentes velocidades de impacto estudiadas, sacando las siguientes conclusiones:

- En todos los casos a estudio el semáforo en PRFV sufre rotura, mientras que el de acero se deforma plásticamente de manera irreparable.
- En un impacto con un poste de acero se pueden llegar a sufrir desaceleraciones con un valor de 1g más elevadas que con los mismos fabricados en PRFV.
- De producirse intrusión del poste más allá del paragolpes sucedería en el caso de accidente contra una columna de acero.
- Las deformaciones y las energías absorbidas son mayores en el vehículo para el impacto contra un poste convencional, por lo que la posibilidad de que tanto el habitáculo como de los ocupantes en su interior sufran mayores lesiones es más elevada.
- Los elementos contruidos en PRFV representan una mayor mejoría ante la seguridad cuanto mayor es la velocidad. No teniendo, según algún que otro dato analizado, para velocidades bajas (30km/h) ninguna ventaja frente a los de acero

De forma inequívoca, ya que todas las magnitudes analizadas así lo demostraban, se puede concluir que los semáforos fabricados en material compuesto tienen un mejor comportamiento ante la seguridad que sus homólogos de acero ante el impacto vehicular

Agradecimientos

Primero, a Luis Castejón Herrer por haberme brindado la oportunidad de realizar este TFM y solventarme todas aquellas dudas que me han surgido durante el mismo, transmitiéndome así sus conocimientos, que me seguirán ayudando en el futuro.

También, al resto de mis profesores, tanto de la carrera como del máster, por haberme aportado algo positivo en mi formación que me hará posible convertirme en el buen ingeniero que quiero llegar a ser.

Y por supuesto, a mis padres, a mis amigos y a María, porque su constante apoyo, consejos y experiencia siempre me han ayudado.

INDICE

1.- Introducción.....	7
1.1.- <i>Objetivo y alcance del proyecto</i>	7
1.2.- <i>Antecedentes de elementos viales de PRFV</i>	8
2.- Estudios Estadísticos Anteriores.....	10
2.1.- <i>Informe del RACE (España).....</i>	10
2.2.- <i>Informe del TRL (Reino Unido)</i>	12
2.2.1.- <i>Cuestiones prácticas</i>	12
2.2.2.- <i>Colisiones con columnas de iluminación y señales</i>	12
2.2.3.- <i>Costes y beneficios de la utilización de columnas de iluminación y señales pasivamente seguras.....</i>	13
2.2.4.- <i>Evaluación del riesgo del uso de columnas de iluminación y señales pasivamente seguras.....</i>	13
2.2.5.- <i>Recomendaciones y conclusiones finales</i>	15
2.3.- <i>Una preocupación mundial</i>	15
2.3.1.- <i>Experiencia de Suecia</i>	15
2.3.2.- <i>Experiencia en Finlandia</i>	16
2.3.3.- <i>Experiencia en Noruega.....</i>	16
2.3.4.- <i>Experiencia en otros países de la Unión Europea.....</i>	17
2.3.5.- <i>Experiencia en los Estados Unidos.....</i>	18
2.4.- <i>Informe de VINNOVA (Suecia)</i>	19
2.4.1.- <i>Coste de los accidentes en Suecia</i>	19
2.4.2.- <i>Costes y beneficios internacionales de los accidentes</i>	19
2.4.3.- <i>Costes y beneficios en España</i>	21
3.- Elementos a Simular	22
3.1.- <i>Vehículo.....</i>	22
3.2.- <i>Semáforo</i>	23
3.2.1.- <i>Poste de acero</i>	23
3.2.2.- <i>Poste de PRFV</i>	24
3.3.- <i>Conjunto</i>	25
4.- Análisis de Resultados.....	26
4.1.- <i>Acero</i>	26

4.1.1.- Semáforo	26
4.1.2.- Vehículo.....	31
4.1.3.- Gráficas	36
4.1.4.- Conclusiones	54
4.2.- PRFV.....	58
4.2.1.- Semáforo	58
4.2.2.- Vehículo.....	61
4.2.3.- Gráficas	66
4.2.4.- Conclusiones	84
4.3.- Comparativa de resultados	87
4.3.1.- Semáforo	87
4.3.2.- Vehículo.....	88
4.3.3.- Gráficas	88
4.4.- Mejoras y trabajos futuros	90
5.- Bibliografía	92
5.1.- Consultas web	92
Anexo A: Informe del RACE.....	94
A.1.- España	94
A.2.- Una preocupación mundial	95
A.3.- Conclusiones basadas en la experiencia	96
Anexo B: Informe del TRL.....	99
B.1.- Review de seguridad pasiva.....	99
B.1.1.- Impactos con objetos en carretera.....	99
B.1.2.- Experiencia del Reino Unido	99
B.1.3.- Experiencia de Suecia.....	100
B.1.4.- Experiencia en Finlandia	102
B.1.5.- Experiencia en Noruega	103
B.1.6.- Experiencia en la Unión Europea	103
B.1.7.- Experiencia en los Estados Unidos	104
B.2.- Cuestiones prácticas	104
B.3.- Colisiones con columnas de iluminación y señales	105
B.4.- Costes y beneficios de la utilización de columnas de iluminación y señales pasivamente seguras.....	106

<i>B.5.- Evaluación del riesgo del uso de columnas de iluminación y señales pasivamente seguras</i>	108
<i>B.6.- Recomendaciones y conclusiones finales</i>	111
Anexo C: Anuario estadístico de accidentes de la DGT	113
<i>C.1.- 2009</i>	114
<i>C.2.- 2010</i>	116
<i>C.3.- 2011</i>	118
Anexo D: STATS19	120
<i>D.1.- Accidentes debidos a impactos contra columnas de iluminación</i>	120
<i>D.2.- Accidentes debidos a impactos contra paneles informativos o señales de tráfico</i>	121
Anexo E: La corrosión en la norma UNE EN 40	122
<i>E.1.- UNE EN 40-5</i>	122
<i>E.1.1.- Galvanización en caliente</i>	122
<i>E.1.2.- Metalización térmica y pintura</i>	122
<i>E.1.3.- Fosfatación y pintura</i>	123
<i>E.1.4.- Pinturas</i>	123
<i>E.2.- UNE EN 40-7</i>	123
Anexo F: Metodología	125
<i>F.1.- El Método de los Elementos Finitos (MEF)</i>	125
<i>F.2.- Pre-proceso</i>	127
<i>F.2.1.- Solidworks</i>	127
<i>F.2.2.- PATRAN</i>	128
<i>F.3.- Cálculo (ABAQUS)</i>	131
<i>F.4.- Post-proceso (ABAQUS)</i>	133
Anexo G: Materiales compuestos	134
<i>G.1.- Pultrusión</i>	134
<i>G.2.- Fibras</i>	135
<i>G.3.- Resinas</i>	136
<i>G.4.- Un ejemplo real de postes de PRFV</i>	136

1.- Introducción

En diferentes puntos del territorio español se está produciendo la sustitución de semáforos fabricados tradicionalmente en acero, por otros contruidos en materiales compuestos.

Existen dos motivos principales para esta sustitución. El primero es debido a que en zonas costeras los semáforos fabricados en acero están sometidos a una fuerte corrosión, por lo que tienen que ser pintados con regularidad, como operación preventiva de mantenimiento. En este sentido, un semáforo fabricado en material compuesto de resina de poliéster y fibra se considera inerte frente a la corrosión.

El segundo motivo es debido al mejor comportamiento de los semáforos de material compuesto en caso de choque de un vehículo contra los mismos, frente a los semáforos tradicionales en acero. Cuando un automóvil choca contra un semáforo en acero puede deformarlo plásticamente, pero no suele arrancarlo, y por tanto la parte superior del mismo, donde se encuentra la caja del semáforo con una masa de 50 kg, puede llegar a impactar contra el vehículo como un martillo. Sin embargo, cuando el impacto se produce contra un semáforo de material compuesto, al tratarse de un material frágil, el semáforo queda arrancado. Esto provoca que los semáforos (y también farolas) fabricadas en material compuesto se considere que proporcionan mejores resultados frente a seguridad vial.

1.1.- Objetivo y alcance del proyecto

En el presente Trabajo de Fin de Máster se pretende desarrollar un análisis numérico comparativo entre semáforos contruidos en acero, frente a otros contruidos en material compuesto.

Y no, de la severidad del choque estrictamente dicha para los integrantes del vehículo cumpliendo normas internacionales como puede ser la UNE EN 12767 (Seguridad pasiva de las estructuras soporte del equipamiento en carretera. Requisitos y métodos de ensayo) [7], es decir no se llegará a realizar mediciones de ASI (Acceleration Severity Index) y THVI (Theorical Head Impact Velocity).

Simplemente, y para comparar los semáforos contruidos en diferentes materiales, y como estos contribuyen a la seguridad pasiva, se analizara, eso sí, diferentes resultados indicativos que se pueden obtener del vehículo, para corroborar lo que dicen algunos informes estadísticos, que serán mostrados más adelante.

Por otro lado, a pesar de ser una de las ventajas que tienen los semáforos contruidos en materiales compuestos frente a los convencionales de acero, dado que es un estudio meramente ingenieril, y no químico, en el que no nos interesa como se producen las reacciones químicas que llevan al estado de corrosión, este fenómeno no se estudiará.

Además de que es un hecho fácilmente demostrable con cualquier literatura especializada de que los materiales compuestos de resina de poliéster y fibra se consideran prácticamente inertes frente a la corrosión, y no así los aceros. Tal es la

evidencia que en la norma UNE EN 40 [6] referente a los requisitos de las columnas y báculos de alumbrado se especifica este hecho, como puede verse en el **Anexo E**.

Así, el caso de análisis consistirá en un choque de un automóvil compacto contra los mismos a diferentes velocidades (30, 45 y 60 km/h). Para ello se utilizará el Método de los Elementos Finitos basado en técnicas de integración explícita. Se empleará un modelo muy detallado de automóvil y una modelización adecuada de los materiales compuestos laminados empleados, en los que se implementará un criterio de fallo. Para el caso de la modelización de la columna de semáforo fabricada en acero, se empleará un modelo elasto-plástico con determinación del fallo final de material.

Se compararán deformadas a lo largo del tiempo, energías, deformación plástica y posibles roturas en las columnas del semáforo y en el automóvil, para las diferentes velocidades de impacto estudiadas.

1.2.- Antecedentes de elementos viales de PRFV

Las farolas de fibra de vidrio y polímero reforzado ya son una realidad en muchas carreteras europeas, ello gracias a la entrada en vigor de la normativa de seguridad de la Unión Europea EN 12767 [7], referente a la “seguridad pasiva de las estructuras soporte del equipamiento de la carretera”, que recomienda expresamente su instalación. Actualmente su uso no es obligatorio, pero ya hay diversos países que han comenzado a instalarlas en sus carreteras.

En un principio, las farolas colapsables fueron dadas a conocer en los Estados Unidos a finales de la década de los setenta. Posteriormente entraron en Europa a través de Suecia, quien las comenzó a instalar a principios de los ochenta.

Las farolas de fibra de vidrio comenzaron a fabricarse de Suecia y llevan ya bastantes años implantadas en las carreteras escandinavas. Previamente, se sometieron a numerosos estudios realizados en la Universidad de Helsinki (Finlandia) para determinar las consecuencias de los impactos de vehículos a distintas velocidades. Estos estudios han demostrado que tanto si el vehículo circula a baja velocidad (35 km/h) como si lo hace a mayor velocidad (100 km/h) el daño que recibe el vehículo por el impacto es muy leve, ya que el habitáculo apenas se deforma. Pero lo que es más importante, la farola de fibra de vidrio no frena el vehículo en seco, absorbe el impacto del vehículo y se deshace.

Pruebas de choque reales conforme a la normativa han permitido verificar unos excelentes resultados, ya que el óptimo comportamiento a todo régimen de velocidad es una de las ventajas fundamentales:

- En una colisión a baja velocidad, aproximadamente 35 km/h, la farola consigue detener al vehículo absorbiendo gran parte del impacto y consiguiendo causarle unos daños muy reducidos, para posteriormente partirse por el punto de impacto y caer al suelo lentamente.
- En una colisión a alta velocidad, 70 o 100 km/h, la farola no frena el coche en seco, sino que absorbe gran parte del impacto y consigue una disminución de

velocidad de un 30% que es absorbida por la farola. La farola se parte por el punto de impacto y se levanta en el aire permitiendo que el vehículo continúe su trayectoria conservando la dirección. De esta forma, los daños que sufre el coche son muy leves y el habitáculo de protección no llega a deformarse. La luminaria, tras el impacto, cae a una distancia máxima de 2 metros de su localización.

Diversas empresas e instituciones europeas se unieron en el proyecto de investigación ECOSAFE cuyo fin es la aplicación de materiales de fibra y polímeros en el desarrollo de sistemas de seguridad en carretera. Uno de los primeros resultados fue el desarrollo de una farola con un alto nivel de seguridad pasiva. Este elemento, además de cumplir con los requisitos que se exigen a cualquier farola de acero, aporta un excelente comportamiento en seguridad pasiva gracias al empleo de fibra de vidrio. En este caso, la investigación se ha centrado en el desarrollo del poste de la farola, ya que el brazo transversal apenas tiene influencia en el comportamiento ante una colisión.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de la farola fue la elección de materiales y tipo de laminación. Bajo las premisas de coste y comportamiento, la fibra de vidrio y la resina de poliéster fueron los materiales seleccionados. La base de la columna es resina de poliéster pigmentada con protector ultra violeta. Una vez constituido el núcleo, éste se refuerza con una capa de fibra de vidrio colocada en dirección longitudinal. Los primeros prototipos de esta farola fueron construidos en Holanda.

En este caso el rango de medición oscila entre 44 km/h (el nivel más bajo de seguridad pasiva) y 101 km/h (el nivel más alto).

En este caso se han realizado las pruebas de impacto según la norma EN 12767 [7], obteniendo los siguientes resultados para columnas de 13.5 metros:

- En la prueba de choque realizada a 34 km/h en circunstancias reales, tras lanzar el vehículo contra la farola de fibra de vidrio, el valor ASI medido bajó hasta 0,6, un resultado que alcanza el requerimiento del más alto nivel de seguridad, mientras que el valor THIV se redujo hasta 26 km/h. La velocidad de salida del vehículo fue de 0 km/h.
- En la prueba de choque realizada a 73 km/h en circunstancias reales, el valor ASI medido fue de 0,8, una cota muy cercana al nivel más alto de seguridad, mientras que el valor THIV fue de 25 km/h. La velocidad de salida del vehículo fue de 26 km/h.
- En la prueba de choque realizada a mayor velocidad, 101 km/h, el valor ASI medido fue de 0,7, una cota también cercana al nivel más alto de seguridad, mientras que el valor THIV fue de 27 km/h. La velocidad de salida del vehículo en este caso fue de 80 km/h.

2.- Estudios Estadísticos Anteriores

A pesar de que en todos los estudios se va a hablar sobre el conjunto de elementos de la vía u otros específicos, como pueden ser farolas, señales de tráfico o paneles informativos, no se aleja del elemento a estudio del actual TFM, un semáforo, el considerar que las estadísticas, ideas y conclusiones que se exponen en ellos son extrapolables.

2.1.- Informe del RACE (España)

Un informe del Real Automóvil club de España (RACE) denominado *Las farolas como elemento de seguridad pasiva de la vía* del 9 de agosto de 2005 [1] ya instó a las autoridades competentes a implementar este tipo de elementos, aun desconocido en España por aquel entonces, y cuya aplicación en otros países había ya demostrado su capacidad para reducir el número de fallecidos y lesiones provocadas por accidentes de tráfico.

De este informe, se pueden extraer diferentes conclusiones, que se mostrarán a continuación. Aunque para una mayor profundización sobre lo que en adelante se va a comentar se recomienda leer el **Anexo A**.

Las farolas realizadas en resina de poliéster y fibra de vidrio, **aportan mejoras en seguridad y durabilidad**, al tiempo que a su vez **minimiza los costes de mantenimiento así como los costes de reparación de los vehículos**, en comparación con sus homólogas de acero, por la extrema rigidez que presentan en su base estas últimas, lo que obliga a que en caso de accidente el vehículo sufra gran deceleración y prácticamente toda la deformación.

Las colisiones contra elementos rígidos como farolas, árboles o postes, con una media de 279 fallecidos cada año, por no mencionar los casi 11.532 heridos que se habrían producido en las mismas circunstancias, supuso un coste anual aproximado, sin contar las personas que resultan heridas, de **418,2 millones de Euros**.

Accidentes con víctimas en España

	2000	2001	2002	2003	2004
Contra árbol o poste	2.456	2.419	2.262	2.296	2.099
Total accidentes	101.729	100.393	98.433	99.987	94.009

Fuente: Anuario estadístico DGT

Muertes por accidente de tráfico en España

	2000	2001	2002	2003	2004
Contra árbol o poste	329	280	273	259	253
Total fallecidos	5.776	5.517	5.347	5.399	4.741

Fuente: Anuario estadístico DGT

Tablas 2_1 y 2_2

Según datos ofrecidos por la Dirección General de Tráfico, en el periodo 2000-2004 este tipo de choques suponían apenas un **2,3% del total de accidentes**, sin embargo, fueron la causa de un **5,2% de las muertes** por accidente de tráfico. Haciendo,

que tras las colisiones frontales de dos vehículos, el choque contra farolas, árboles o postes sea el tipo de accidente más lesivo.

Accidentes con víctimas en España

	2009	2010	2011
Contra árbol o poste	1563	1415	1247
Total accidentes	88251	85503	83027

Tabla 2_3

Muertes por accidente de tráfico en España

	2009	2010	2011
Contra árbol o poste	135	111	96
Total fallecidos	2714	2478	2060

Tabla 2_4

Actualizando estos datos mediante la misma fuente durante el periodo de 2009-2011 (ver Anexo C), estos choques suponen únicamente un **1,64% del total de accidentes**, aunque fueron la causa de un **4,70% de las muertes** por accidente de tráfico. Datos que vuelven a demostrar la severidad de los accidentes contra estos elementos de la vía, a pesar de la disminución entre estos diferentes períodos de un 9,61% de los fallecidos, seguramente, entre otras causas, al comienzo de la implantación de columnas y báculos de alumbrado en materiales compuestos, como el propio informe del RACE [1] dice: "*En las carreteras de España la instalación de columnas y báculos de materiales compuestos es algo desconocido. Si bien ya existen noticias sobre su próxima instalación en algunas travesías a lo largo de este año 2005.*"

Aun así, la disminución de accidentes contra estos elementos, con un 28,69% menos, es más drástica en comparación con la reducción de fallecidos, aunque por medidas bien diferentes, como puede ser la entrada en vigor del carnet por puntos.

Heridos graves por accidente de tráfico en España

	2009	2010	2011
Contra árbol o poste	462	403	343
Total heridos graves	13923	11995	11347

Tabla2_5

Heridos leves por accidente de tráfico en España

	2009	2010	2011
Contra árbol o poste	1658	1485	1337
Total heridos leves	111043	108350	104280

Tabla2_6

Analizando otros datos, como son la cantidad de heridos leves y heridos graves en este tipo de accidente, se puede ver que el porcentaje frente al número total de accidentes es también más elevado, con un 3,23% y un 4,14% respectivamente. Lo que deja una vez a manifiesto el peligro de estos elementos.

2.2.- Informe del TRL (Reino Unido)

En el informe *The use of passively safe signposts and lighting columns* de 2007 realizado por el Transport Research Laboratory (TRL) [2] a encargo de Transport for London (TfL) tiene como fin investigar el uso de columnas de iluminación y señales de seguridad pasiva en las carreteras locales.

En comparación con el informe del RACE [1], este tiene además como objeto el desarrollar una comprensión de cualquier cambio en el riesgo de seguridad que pudiera derivarse de la introducción de puntos de luz y señales de seguridad pasiva en estas áreas.

2.2.1.- Cuestiones prácticas

En general, la instalación de columnas de iluminación y señales de seguridad pasiva es más fácil que la de los sistemas convencionales. No hay problemas de mantenimiento especiales con las señales de seguridad pasiva, los materiales utilizados generalmente son de mejor calidad y con una vida útil más larga que sus contrapartes convencionales. Las de **aluminio** anodizado son demandadas para tener una vida de hasta **75 años** y los **compuestos 60 años**, en comparación con **40 años para el acero** (siempre que la base del sistema permanece intacta). Sin embargo, si se utiliza la pintura, esta última tendrá que ser renovada cada **6 a 7 años**.

Las señales pasivas de seguridad son **más fáciles de reemplazar** que las convencionales, debido al diseño de la placa base. Estas placas base suelen ser reutilizables después de un impacto de un vehículo errante. Además, su manipulación manual es más fácil ya que las señales son mucho más ligeras que los convencionales.

2.2.2.- Colisiones con columnas de iluminación y señales

Las estadísticas sobre accidentes de tráfico de lesiones personales usadas para la realización de este informe se publican anualmente en el Departamento para el sitio web de Transporte (Department for Transport, 2007A). Estos datos están basados en la información recogida por la policía en un sistema conocido como STATS19 (**ver Anexo D**).

	Number of Collisions	Casualties			
		All	Fatal (%)	Serious (%)	Slight (%)
All types of collisions	1,260,101	1,716,782	1.2	11.4	87.4
With lighting column	12,391	16,987	2.4	17.6	80.0
With signpost / traffic signal	8,849	11,524	2.2	16.0	81.8

Tabla 2_7

Los porcentajes de lesiones graves y mortales como resultado de impactos con columnas de iluminación, postes de señalización y señales de tráfico fueron superiores a

los valores medios de gravedad de lesiones. Los datos de severidad comparables para los impactos de barrera de seguridad han demostrado que la gravedad de tales colisiones es superior a la media, pero inferior a la de las columnas de iluminación, postes indicadores y señales de tráfico.

2.2.3.- Costes y beneficios de la utilización de columnas de iluminación y señales pasivamente seguras

El costo total de estas colisiones es **185.500.000 € por año**. Sin embargo, si se supone que el uso de columnas pasivamente seguras reduce la gravedad de las lesiones en un paso (**fatal pasa a grave; grave a leve; leve a dañar solamente**) los costos se reducen como se muestra en la línea inferior de la tabla. Por lo tanto se espera que el uso de columnas pasivamente seguras pudiera reducir los costes anuales por colisión de **£ 162.700.000 a £ 22.800.000. (de 192.300.000 de euros a 27.000.000 de euros)**

	Fatal	Serious	Slight	Total
Urban	49	373	1637	2058
Rural	19	127	628	774
Total per year	65	411	1590	2065
Cost per collision £ (from HEN1)	£1,644,790	3188,920	£19,250	£89,820
Total cost per year from collisions with lighting columns, in £M	£106.4	£77.6	£30.6	£185.5
Total projected cost with passively safe columns, in £M	£0.0	£12.2	£7.9	£22.8

Tabla 2_8

Parece que hay un buen argumento económico para la introducción de columnas de iluminación de pasivamente seguras, con base a un pequeño coste adicional por punto de luz, debido a la reducción de la gravedad de colisión, sobre todo en lugares donde no se pudiera instalar una barrera de seguridad.

2.2.4.- Evaluación del riesgo del uso de columnas de iluminación y señales pasivamente seguras

El propósito de esta evaluación de riesgos consiste en comparar el riesgo de utilizar columnas de iluminación y señales pasivamente seguras frente al de las convencionales, tanto en zonas rurales como urbanas, incluidos los posibles efectos sobre los demás usuarios y terceros.

La Tabla 2_9 resume las estimaciones de riesgo para una columna de iluminación convencional y una pasivamente segura en una carretera rural de una sola calzada en cuanto al número de víctimas mortales equivalentes al año. Debe tenerse en cuenta que en un impacto con una columna de iluminación convencional también puede dar como resultado el colapso o la caída de escombros de la misma, y por lo tanto es probable que sea una subestimación del riesgo asociado a una columna de iluminación sin protección convencional.

Option	Risk (number of equivalent fatalities per year) on rural single carriageway					
	Errant vehicle occupants	Other road users				All road users
		Hit by falling column	Run into fallen column or debris	Shunt collision	Lane change collision	
Unprotected conventional lighting column 2.5m from edge of carriageway	0.0146	-	-	-	-	0.0243
Conventional column 2.5m from edge of carriageway with safety barrier protection	0.0036	-	-	-	-	0.0058
Passively safe column 2.5m from edge of carriageway	0.0017	0.000087	0.00013	0.000075	0.00017	0.0032

Tabla 2_9

En la Tabla 2_9 y la Figura 2_1, se puede ver que la suma de los riesgos separados asociados con una columna de iluminación pasivamente segura sin protección para todos los ocupantes del vehículo todavía produce un total por debajo del nivel de riesgo en comparación con una columna convencional protegida por una barrera de seguridad.

El riesgo a los peatones en las proximidades también se estimó que dependería en gran medida de la probabilidad de presencia de peatones. Esta se considera que es muy baja en las zonas rurales, lo que no se tiene en cuenta en la Tabla 2_7 y la Figura 2_1.

Los resultados de las columnas de iluminación en autovías rurales y señales de una única calzada y los caminos rurales de doble calzada no se reproducen en el presente informe, pero dio lugar a conclusiones similares.

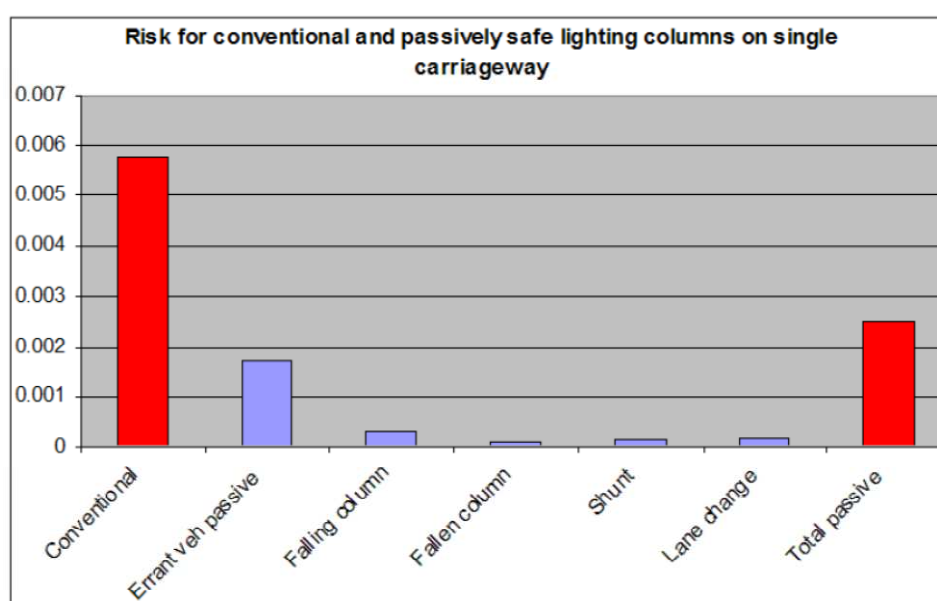


Figura 2_1

Por otro lado, analizando brevemente lo que sucedería en las zonas urbanas, se puede extrapolar que al ser las velocidades más bajas, los elementos pasivamente seguros reportarían un menor beneficio para ocupantes de los vehículos errantes. Hay también una mayor probabilidad de peatones en los alrededores, y por lo tanto el riesgo de lesiones a los peatones se incrementa. Por otro lado, hay muchas más columnas de iluminación y señales en las vías urbanas. Además, los conductores pueden superar más fácilmente el límite de velocidad en las principales carreteras de calzadas urbanas individuales, donde se producen la mayoría de las colisiones en las que se ven involucradas señales de tráfico y columnas de iluminación.

2.2.5.- Recomendaciones y conclusiones finales

Se recomienda que los postes de alumbrado y carteles pasivamente seguros continúen siendo utilizados con conformidad al anexo nacional de la norma BS EN 12767 [7]. En particular, deben ser utilizados en la mayoría de situaciones en las carreteras rurales, especialmente donde es difícil de utilizar una barrera de seguridad.

Donde sea probable que haya un número importante de peatones de manera periódica, podría ser necesario considerar por separado la seguridad de los peatones, y el riesgo de un vehículo errante, que es mayor que el de la caída de una columna o señal de tráfico

En las zonas urbanas donde las velocidades son bajas, por ejemplo las zonas con límite de velocidad de **35 km/h o en zonas residenciales**, hay **poca o ninguna ventaja** en el uso de señales y columnas de iluminación pasivamente seguras.

Las columnas de iluminación pasivamente seguras se deben usar en las principales vías urbanas en las que hay poca probabilidad de que caigan sobre la calzada o usualmente haya un número considerable de peatones en los alrededores.

2.3.- Una preocupación mundial

Tanto en el informe del RACE [1] como en el del TRL [2], se hace mención a varios estudios acerca de la gravedad de este tipo de accidentes, y propuestas para atenuar sus consecuencias que han sido elaboradas en los Países Nórdicos, Estados Unidos y Australia.

2.3.1.- Experiencia de Suecia

Según el estudio “Collision and Consequence” de la Swedish National Road Administration, los choques contra objetos rígidos, como postes y árboles están entre los **accidentes más lesivos**, incluso cuando el vehículo involucrado circula dentro de los límites legalmente establecidos.

Tres de cada diez personas que fallecen como consecuencia de un accidente de tráfico en Suecia, mueren tras salirse de la vía y colisionar contra un objeto rígido. Un **20% de los fallecidos** colisionaron contra una farola o un poste.

Un nuevo informe de VTI informó sobre colisiones con columnas de iluminación y otros objetos duros en carretera (Nilsson y Wenäll, 1997). Los autores recomendaron que los postes de acero rígidos debían ser cambiados gradualmente durante la instalación del nuevo alumbrado público por los postes deformables que absorben energía.

Las directrices suecas de vialidad dejan los siguientes puntos clave con respecto a las habilitaciones de clase de velocidad de los postes pasivamente seguros:

- Postes que cumplan las demandas de clase de velocidad 100 se puede utilizar en todo tipo de carreteras;
- Postes que cumplan las demandas de de clase de velocidad 70 pueden utilizarse en carreteras con límites de velocidad de 70 kilómetros por hora o menos;
- Postes que cumplan las demandas de clase de velocidad 50 no deben ser utilizados, lo que representa el hecho de que a menudo se producen colisiones graves en entornos con un límite de velocidad de 50 kilómetros por hora con vehículos que viajan a velocidades más altas.

2.3.2.- Experiencia en Finlandia

En Finlandia, entre 1991 y 1995, las colisiones contra objetos rígidos contabilizaron el **24% de todos los accidentes mortales**. Las colisiones más frecuentes fueron contra árboles, seguidas de postes.

Las columnas de iluminación pasivamente seguras tienen un uso muy extendido en Finlandia (Lehtonen, 2008A).

La Administración Nacional de Carreteras de Finlandia comparó los costes derivados de estas colisiones, los costos de construcción asociados con columnas rígidas y frágiles. Llegaron a la conclusión que la sustitución de antiguas columnas rígidas por columnas frágiles **a menudo era rentable**. La inversión podría ser cubierta por el ahorro de costes de colisión en cuatro años, si el tráfico era pesado.

Un documento de apoyo de Finnra Engineering proporciona detalles de las clases de estructuras que recomienda para su uso la Administración de Carreteras de Finlandia (2005). De acuerdo con este documento;

- Los productos de las clases HE: 100:3, LE: 100:3 y NE :100:2-3 pueden ser usados en todas las carreteras;
- Los productos de las clases HE: 70:3, LE: 70:3 y NE :70:2-3 pueden ser utilizados en las carreteras con un límite de velocidad de 80 kilómetros por hora o menos;
- Cuando una señal se encuentra entre una carretera y un peatón y/o carril bici, entonces se debe considerar una estructura de las clases LE.

2.3.3.- Experiencia en Noruega

Savin (2002) proporciona puntos clave en una carta enviada al Ministerio de Transporte de Noruega a sus oficinas locales que ofrecen asesoramiento sobre la utilización de soportes que absorben la energía:

- El uso de soportes de absorción de energía debería ser obligatorio para alumbrado, señales y otros equipos, donde el límite de velocidad es superior a 60 kilómetros por hora o si los mástiles no están protegidos de ser golpeados por una barrera o por otros medios;
- Mástiles de absorción de energía deben utilizarse también en las principales carreteras y calles con un límite de velocidad de 50 kilómetros por hora si están situados a menos de 2 m de la carretera;
- El poste no tiene por qué ser de absorción de energía si se halla al lado de una pared de una casa o otro objeto fijo grande;
- Postes SE de alumbrado y señalización LE, señales y otros mástiles (menos de 6 m de altura) debe utilizarse:
 - a) donde es particularmente importante para reducir la velocidad y parar los vehículos sin control, ya que existe el riesgo de que puedan volver a chocar con obstáculos peligrosos, tales como puentes, paredes de roca y otras proyecciones.
 - b) en las zonas urbanizadas y otros lugares donde hay muchos peatones y/o ciclistas que podrían ser lesionados por un vehículo sin control.
 - c) sobre las medianas centrales de las vías, de tal manera que el mástil no caiga en el camino de un vehículo que se aproxima.
 - d) en las zonas entre una carretera y un carril bici o una senda peatonal, donde el límite de velocidad es superior a 60 kilómetros por hora. En general, estos tipos de mástiles normalmente son usados cuando el límite de velocidad es 60 km/h, se requiere la absorción de energía a 50 kilómetros por hora y las medianas en autopistas;
- Estos requisitos deben cumplirse en todas las carreteras nacionales. También se aplicará para carreteras del condado donde las autoridades locales no tienen sus propios requisitos. **También se recomienda para las vías en ciudad.**

2.3.4.- Experiencia en otros países de la Unión Europea

Según el Consejo Europeo de Seguridad en el Transporte, los accidentes de vehículos que tras salirse de la calzada colisionaban contra árboles, postes o señales era **el mayor problema de seguridad vial internacional**. Este tipo de colisiones representaban entre el **18 y el 42 por ciento de los fallecidos** en la mayoría de los países de la Unión Europea.

Con datos de 1995, en Francia las colisiones contra elementos externos a la carretera supusieron el **31% de los accidentes mortales**.

En Alemania, el **18%** de los accidentes con lesiones personales ocurridos en 1995 se produjeron **por colisiones contra farolas o postes**.

En Holanda las colisiones contra postes o farolas suponen un **22% del total de accidentes mortales** producidos en sus carreteras.

2.3.5.- Experiencia en los Estados Unidos

Si nos fijamos en Estados Unidos, aquí los accidentes por colisión contra un objeto fijo suponen entre el **25 y el 30% de todos los accidentes**. El choque contra un poste es el responsable del **11% del total de muertes en carretera**.

Muchas investigaciones se han realizado en los EE.UU. con respecto a los postes de electricidad, incluyendo las columnas de iluminación, que cubren las carreteras urbanas y rurales, la mayoría de estos últimos (por ejemplo Zegeer y Parker, 1984, Marquis, 2001). Las columnas de ruptura han estado en uso durante muchos años en las carreteras de alta velocidad.

La mayoría de los departamentos estatales de transporte utilizan habitualmente estructuras de ruptura en sus principales carreteras y también en muchas carreteras secundarias, incluso cuando no son requeridas por la política federal o nacional. Documentos de diseño de la Carretera/Calle Mayores permite a los diseñadores el prohibir el uso de columnas de ruptura cuando hay presencia de peatones, tal vez con la idea de que el vehículo errante no debe de hacer más daño.

Artimovich establece que las estructuras de ruptura rara vez se utilizan para las señales de tráfico en los EE.UU.

Sicking (2008) añade que las únicas **excepciones a la utilización** de las estructuras de ruptura, que él es consciente, es para las **carreteras de baja velocidad con límites de velocidad de alrededor de 40 km/h**. Ya que los vehículos actuales se considera que proporcionan suficiente seguridad para sus ocupantes, incluso en choques contra un poste rígido. Por lo tanto, algunos estados toman la posición de que detener el coche que viaja en un pavimento es menos peligroso que dejar al vehículo continuar hacia una casa o un edificio comercial.

Según una investigación llevada a cabo en los Estados Unidos, las farolas de polímeros y fibra pueden llegar a **reducir el número de lesiones alrededor de un 30%**.

2.3.6.- Experiencia en Australia

Viajemos aún más lejos, hasta Australia, donde la Universidad de Monash ha elaborado un estudio, a través de su Centro de Investigación de Accidentes, donde se concluye que **el número de muertes y lesiones graves suele ser mayor** como consecuencia de choques con objetos fijos tras una salida de carretera, que en cualquier otro tipo de accidente. Más de un **25% de las muertes en la carretera** de la región de Victoria se producen contra obstáculos externos a la vía.

Un estudio de los accidentes ocurridos en este territorio australiano entre 1991 y 2000 demuestra que en choques contra objetos fijos es más **frecuente encontrar heridos de gravedad y fallecidos** que en choques con objetos no fijos. Este dato es perfectamente medible, ya que en el periodo 1996-2000 los choques contra objetos fijos causaron entre el **16 y el 19% del total de víctimas, y entre el 29 y el 37% del total de muertes en carretera**. Los objetos fijos presentes con frecuencia en este tipo de colisiones son árboles y farolas.

2.4.- Informe de VINNOVA (Suecia)

El informe de *Effects of Swedish traffic safety research* de VINNOVA de 2007 [4] habla principalmente sobre la seguridad en las carreteras suecas del año 1971 al 2004. Este es demasiado intenso, y únicamente la parte de beneficios económicos es la que interesa para este trabajo.

2.4.1.- Coste de los accidentes en Suecia

Los costes socioeconómicos de los accidentes son muy altos, ver **Tabla 2_10**. Con la Evaluación de SIKA (precios de 2001) vemos que el costo de las muertes en Suecia en 2005 puede calcularse en casi **8000 millones de SEK (800 millones de euros)**.

A esto hay que añadir el número de lesiones graves y leves. Las estadísticas de lesiones son incompletas. Antes de que STRADA8 se creara, los datos sobre lesiones se obtenían de los hospitales. La Oficina Central de Estadística de Suecia estima que el porcentaje de lesiones reportadas fue de 59% para graves y 32% para lesiones menores (SIKA 2005b). Utilizando las cifras de accidentes de 2005 (SIKA 2006) esto significa que por cada persona que muere en un accidente de tráfico, otros 15 se verán gravemente heridos y unos 160 sufriría heridas leves. En los cálculos se han utilizado una proporción de 10 lesiones graves y 100 lesiones de menor importancia por cada accidente de tráfico a fin de no sobreestimar los números de heridos. Esto da un costo total anual de accidentes de aproximadamente **30000 millones de SEK (3000 millones de euros)**.

Severity	Annual total for 2005	Cost per injury	Social cost
Fatalities	440	17.50	7 700
Serious injuries	4 400	3.12	13 700
Minor injuries	44 000	0.18	7 900
Total			29 300

Tabla 2_10

Las lesiones graves comprenden extremidades rotas, aplastamiento, cortes graves, conmoción cerebral o lesiones internas. Además, cualquier persona que está ingresado en el hospital es considerado como gravemente herido. El resto de las lesiones se clasifican como lesiones menores. Estas definiciones son utilizados por la policía para informar sobre las lesiones de los accidentes (SIKA 2005b, Vägtrafikskador 2004).

2.4.2.- Costes y beneficios internacionales de los accidentes

Se puede distinguir entre los beneficios relacionados con la industria o el impacto en dos niveles:

- El costo-beneficio expresa la relación entre costos y beneficios para los consumidores, las empresas y la sociedad en su conjunto. Los beneficios de la actividad económica a nivel nacional es parte del cálculo económico.

- El aumento de posibles beneficios relacionados con las exportaciones de la industria son adicionales por lo tanto a los cálculos económicos y se debe calcular por separado.

Hay una concreción general de cómo el valor añadido total de los proyectos se pueden analizar, basado en un modelo económico base de costo-beneficio. En el cálculo de los beneficios económicos de las medidas de seguridad vial, es práctica común el asumir que el beneficio consiste en la reducción de las pérdidas de vidas y la reducción de los costos de tratamiento de la salud. La reducción de los costos de la pérdida de ingresos dentro y fuera del hospital, el daño y la administración de material. En muchos países estos precios estandarizados se han preparado para este fin. Utilizando las recomendaciones dadas en SIKA suecas (2005a), que son los siguientes:

Degree of injury	Cost per incident 2001-prices (SEK)
Death	17 511 000
Serious injury	3 124 000
Minor injury	175 000

Tabla 2_11

Diferentes accidentes tienen diferentes perfiles con respecto a los números de muertos, heridos graves o leves. Estos deben ser calculados en base a las estadísticas de accidentes o de otras fuentes. En adición a los datos sobre la frecuencia se requiere del uso de muchas de las medidas. Por cada medida con un efecto conocido se puede calcular la disminución esperada en el riesgo de varias lesiones relacionadas con el tráfico. Cuando sabemos cuántas de estas lesiones pueden ser esperadas en el transcurso de un año, se puede calcular la disminución esperada en las lesiones de tráfico como consecuencia de la medida adoptada. Multiplicando esta los costes medios de ese tipo de lesión en cuestión da el beneficio anual.

El beneficio de una medida que hace que los automóviles sean más seguros se puede esperar que dure toda la vida útil del vehículo. Suponiendo que los coches suecos tienen una duración de vida media de 15 años. La suma de beneficios anual del radio medio de descuento durante todo este período es el valor actual de la tasa de descuento, del 4% p.a. (SIKA 2005a). En principio estos cálculos deben cubrir todo el beneficio para los consumidores y para la industria. Algunos de los beneficios de los consumidores de una mejor seguridad vial serán transferidos a la industria manufacturera en forma de una mayor disposición.

Los beneficios en el mercado internacional son algo diferentes. Aquí, el beneficio puede, en principio, ser medido por el aumento de la exportación de productos de seguridad vial y un aumento en las ventas de automóviles sueco que se deben a la medida en cuestión (es decir, cuando el equipo de seguridad se ha instalado). La identificación del beneficio de ventas no es fácil. Se ha optado por una solución simple al asumir que el beneficio es al menos tan grande como la producción y la instalación de

costos para el equipo de seguridad en cuestión. Esto se basa en la presunción de que de otro modo la instalación del equipo no tendría valor alguno.

Los cálculos económicos son algo especulativos y sensibles a una número de supuestos dudosos. Por ello, se ha optado por utilizar un análisis conservador de sensibilidad para los cálculos presentados aquí, que se puede encontrar en Eriksen et al (2004).

2.4.3.- Costes y beneficios en España

Con los datos del año 2011 de España sobre accidentes de tráfico mostrados en el resumen del informe del RACE, junto con los precios que se han mostrado en el **apartado 2.4.1** se extrapolan, se puede conseguir una estimación aproximada de los beneficios y costes económicos.

Severidad	Total anual 2011	Coste por lesión (millones de euros)	Coste social (millones de euros)
Fatales	2060	1.75	3605
Heridos graves	11347	0.312	3540
Heridos leves	104280	0.018	1877
TOTAL			9022

Tabla 2_12

Para el caso de colisiones contra un árbol o poste, quedaría como sigue:

Severidad	Arbol o poste 2011	Coste por lesión (millones de euros)	Coste social (millones de euros)
Fatales	96	1.75	168
Heridos graves	343	0.312	107
Heridos leves	1337	0.018	24
TOTAL			299

Tabla 2_13

Así, si se supone que el número de accidentes se divide indistintamente entre los producidos contra un árbol o contra un poste. Los accidentes contra estos últimos, que es donde se puede mejorar la seguridad pasiva, costaría al Estado aproximadamente **150 millones de euros anuales**. Yendo más lejos, y con estimaciones hipotéticas que se han dado en el informe del TRL, sobre en cuanto se reduciría la siniestralidad en el caso de que todos los postes estuvieran contruidos en PRFV:

- La mortalidad se reduciría entre un 30 y un 50%. Media del 40%
- Las lesiones se reducirían en un grado.

Severidad	Arbol o poste 2011	Coste por lesión (millones de euros)	Coste social (millones de euros)
Fatales	29	1.75	51
Heridos graves	19	0.312	6
Heridos leves	172	0.018	3
TOTAL			60

Tabla 2_14

El Estado se **ahorraría anualmente 90 millones de euros**, o lo que es lo mismo porcentualmente, los costes se reducirían un 40%. Sin contar, por supuesto, la inversión inicial.

3.- Elementos a Simular

3.1.- Vehículo

En la realización del proyecto hemos utilizado un modelo de coche, Peugeot 206, facilitado por Marco Carrera Alegre en un anterior trabajo de una asignatura del máster.

Los datos y dimensiones del vehículo que se deben indicar de acuerdo con la norma UNE-EN 12767 (Seguridad pasiva de las estructuras soporte del equipamiento en carretera. Requisitos y métodos de ensayo) [7], y que por lo tanto aunque no se este siguiendo dicha norma, se pueden considerar relevantes, son:

- Anchura (medida en la anchura máxima de la carrocería, sin tener en cuenta los retrovisores): 1610mm.
- Vía (distancia entre ruedas): anchura de vía en los ejes delantero y trasero (medidos en el eje de las ruedas): 1390mm.
- Longitud (excluido el gancho para remolques): 3740mm.
- Altura: 1430mm.
- Voladizo delantero: 802mm.
- Batalla (distancia entre ejes): 2370mm.
- Voladizo trasero (excluido el gancho para remolques): 568mm.
- Peso: 1243 kg.

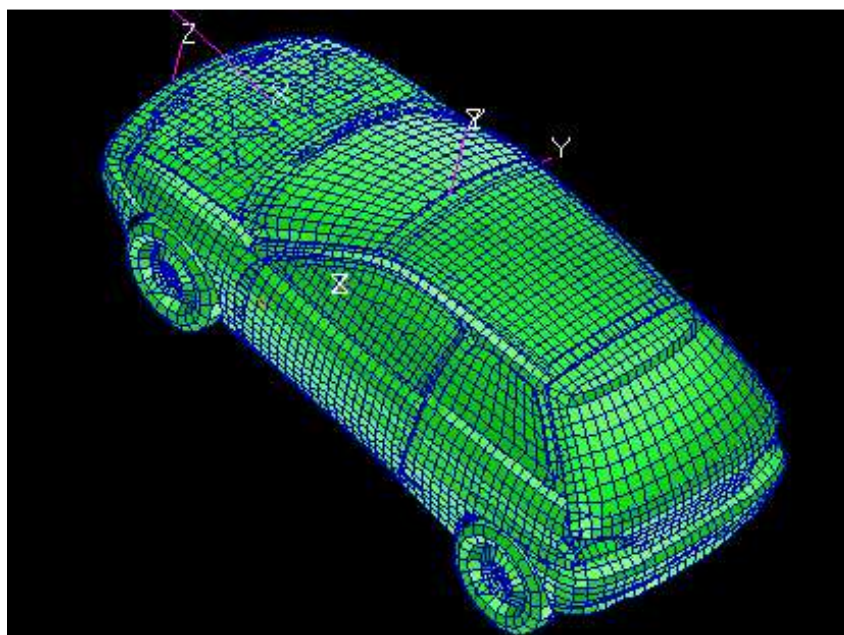


Figura 3_1

3.2.- Semáforo

La realización de este proyecto se va a llevar a cabo mediante el análisis de dos tipos de elementos, un semáforo fabricado en acero y otro fabricado con poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), con el fin de comprobar y demostrar el distinto comportamiento de la estructura de cada uno de ellos dependiendo del material que los componga, pero conservando la geometría.

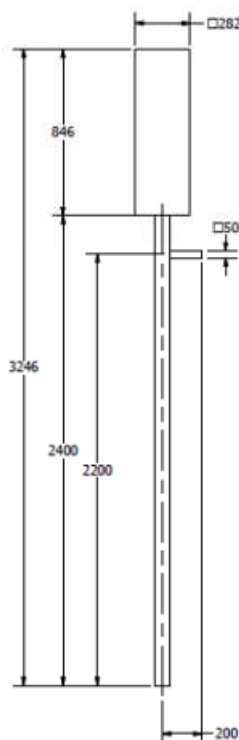


Figura 3_2

Con un diámetro interior del poste de 80mm, e interior de 100mm. Y con las luces de tráfico de encima y otra lateral (no representada, pero considerada como fuerza) con una masa de 50kg.

3.2.1.- Poste de acero

Poco hay que comentar, salvo que el acero, es un HR-A36, que atiende a las siguientes características:

E11(GPa)	v	X(MPa)	ϵ_{rot}	$\rho(\text{kg/m}^2)$
250	473	500	0,329	7860

Tabla3_1

Y con una curva de comportamiento elasto-plástico como la que sigue:

$\sigma(\text{MPa})$	250	302	338	381	426	473
ϵ	0	0,039	0,086	0,174	0,255	0,329

Tabla 3_2

3.2.2.- Poste de PRFV

El laminado a utilizar en el poste posee la siguiente secuencia de apilamiento, de menor a mayor radio:

- Zona 1: Fibra de vidrio-poliéster unidireccional fabricado por pultrusión y en dirección ascendente (0°). 2, 53 mm de espesor.
- Zona 2: 1 capa de MAT de fibra de vidrio-poliéster de 0,8mm de espesor
- Zona 3: Fibra de vidrio-poliéster unidireccional fabricado por pultrusión y en dirección ascendente (0°). 2, 53 mm de espesor.
- Zona 4: 1 capa de MAT de fibra de vidrio-poliéster de 0,8mm de espesor
- Zona 5: Fibra de vidrio-poliéster unidireccional fabricado por pultrusión y en dirección ascendente (0°). 2, 53 mm de espesor.
- Zona 6: 1 capa de MAT de fibra de vidrio-poliéster de 0,8mm de espesor

La anterior estructura se explica debido a que cada parte tiene una función específica como se muestra a continuación:

El MAT empleado en las Zonas 2, 4 y 6, es decir en la superficie exterior y entre capas de fibra unidireccional, es necesario debido a que presenta unas propiedades de acabado superficial de alta calidad, superiores al unidireccional fabricado por pultrusión.

Además, protege a esta fibra unidireccional frente a delaminaciones en caso de impactos de baja energía o por la necesidad de realización de agujeros en la columnas, como por ejemplo sucedería si se quisiera instalar otro brazo lateral.

Las propiedades del MAT son las siguientes:

E11(GPa)	E12(GPa)	G(GPa)	X(MPa)	X'(MPa)	Sxy(MPa)	$\rho(\text{kg/m}^2)$
7,7	7,7	2,88	100	100	30	1900

Tabla 3_3

Además posee otras como tener un 30% de fibra en peso, y un gramaje por metro cuadrado de 450.

El laminado unidireccional fabricado por pultrusión existente en las zonas 1,3 y 5, es el que presenta un módulo de Young verdaderamente elevado en comparación con el MAT en el sentido longitudinal, por lo cual es el que proporciona rigidez a la columna frente a flexión. Estas zonas poseen las siguientes propiedades:

E11(GPa)	E12(GPa)	G(GPa)	X(MPa)	X'(MPa)	Sxy(MPa)	$\rho(\text{kg/m}^2)$
40	11	5	800	700	50	1900

Tabla 3_4

Además de otras, como tener un 75% de fibra en peso, y 4800 tex.

Habría que tener en cuenta que sólo las Zonas 1 a 6 se consideran con finalidad resistente, despreciando la aportación de la capa externa de resina que suele utilizarse en estos semáforos.

Finalmente, se realizó una modificación, cuyas razones pueden verse en el **Anexo F**, otorgando al poste el mismo comportamiento con las siguientes propiedades:

E11(GPa)	ν	X (Mpa)	X' (Mpa)	Y(MPa)	Y'(MPa)	Sxy(MPa)	ρ (kg/m ²)
31,87	0,32	350	345	65	65	42	1900

Tabla 3_5

Dado que este tipo de materiales no es tan conocido como el del acero, se ha añadido el **Anexo G**, donde se profundiza en ellos, tanto en sus propiedades como en el método de fabricación de la pultrusión.

3.3.- Conjunto

El ángulo formado entre la dirección de avance del coche y el brazo lateral del semáforo es de 20°, como se muestra en el siguiente esquema:

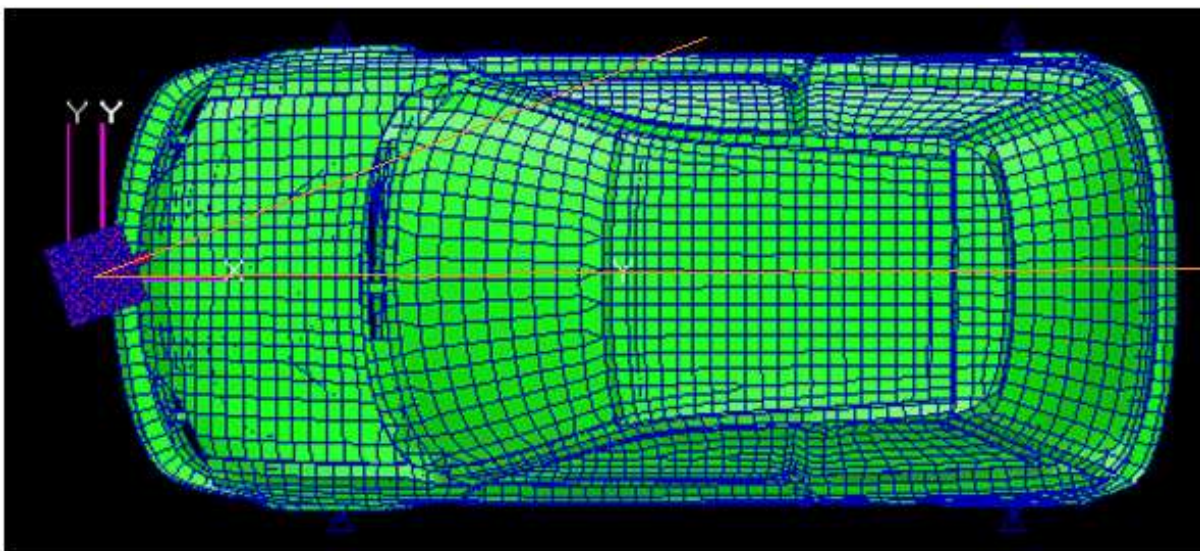


Figura 3_3

Y el poste se encuentra centrado con relación al paragolpes delantero del vehículo a 14,3 mm.

4.- Análisis de Resultados

En esta parte, la principal del trabajo, se van a realizar 3 tipos de ensayo diferentes para los dos tipos de postes, cuya única distinción será la velocidad con la que el vehículo es lanzado contra la farola. Estas velocidades son: 30km/h, 45km/h y 60km/h.

Las velocidades fueron elegidas por el tipo de vía (en ciudad) en la que se encuentran el elemento específico a estudio, y a los diferentes casos que se prevén que pueden ocurrir para un choque contra el mismo en esa zona.

El caso a 30km/h, podría producirse en una vía de un sólo carril y sentido por un vehículo que sin haber frenado antes, chocará contra una farola por diversas causas en las que no se entrara a hipótesis. O por el mismo tipo de accidente en una vía con una limitación de velocidad de 50km/h, pero con previa frenada al accidente.

En la misma vía sucedería para el caso de 45 km/h, pero sin haber o con una ligera frenada antes del impacto. El último caso, el de 60km/h, siempre se produciría por un exceso de velocidad en una vía urbana, a no ser que tuviera lugar en una de las pocas vías interurbanas con una límite de velocidad superior en las que suelen encontrarse este tipo de semáforos.

Aquí habría que puntualizar que los resultados únicamente se observarían hasta que se estime que el poste, a priori el fabricado en PRFV, haya colapsado, dado que los resultados posteriores mostrados por ABAQUS no se corresponderían con la realidad.

4.1.- Acero

4.1.1.- Semáforo

Tensiones de Von Mises

La tensión máxima de Von Mises a 30 km/h se produce en la base del poste en el FRAME 6 (0,06 s), con un valor de **337 MPa**:

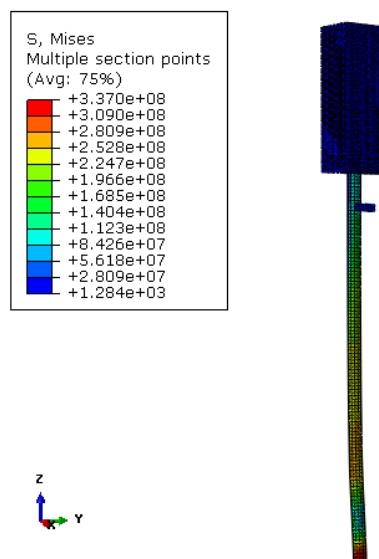


Figura 6_1

A su vez para el caso a 45km/h, es el FRAME 8 (0,08s), con un valor de **407 MPa**, se produce la tensión máxima en el mismo lugar.

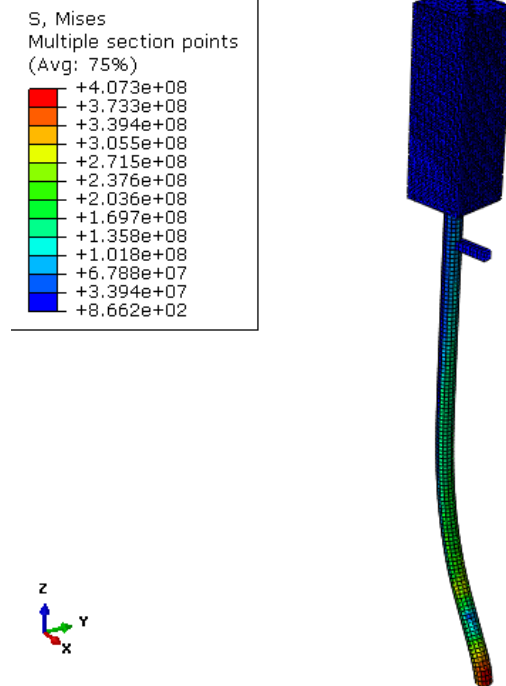


Figura 6_2

En el FRAME 20 (0,2s), con un valor de **473 MPa**, se produce la tensión máxima en la misma localización para el ensayo a 60km/h.

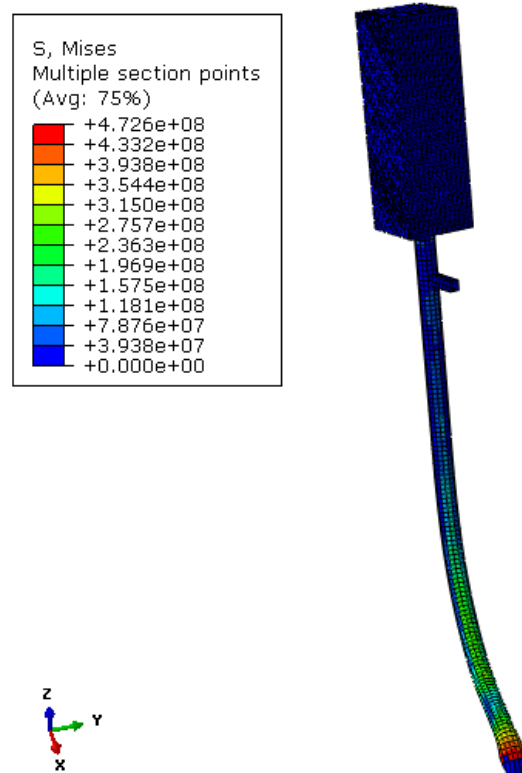


Figura 6_3

Desplazamientos

Para el caso a 30km/h, desde el FRAME 10 al 20 (0,19s - 0,2s), con un valor de **760 mm**, se produce el desplazamiento máximo en la parte superior de la caja de luces de arriba.

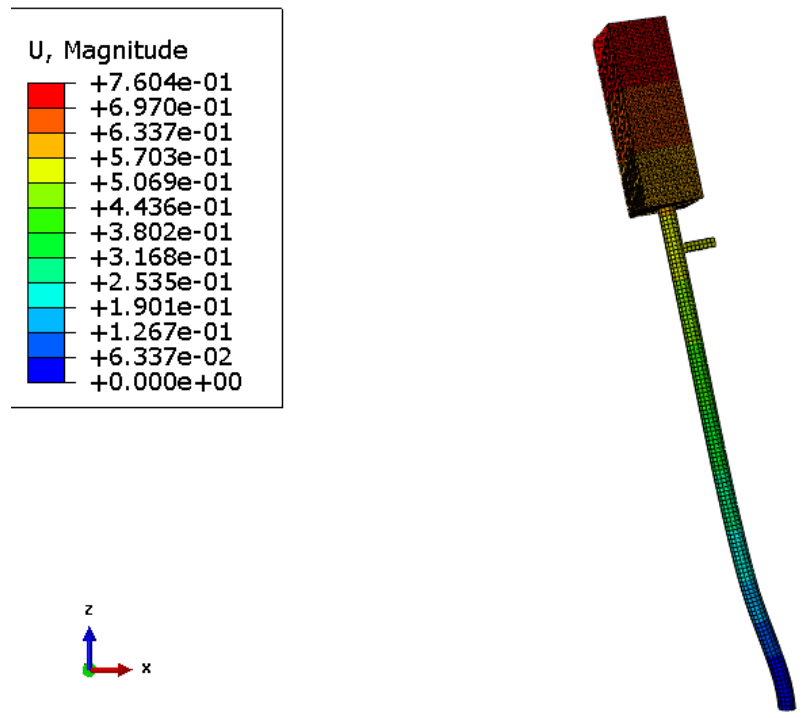


Figura 6_4

El desplazamiento máximo a 45km/h se produce en el FRAME 20 (0,2 s), con un valor de **1405 mm** en la misma localización

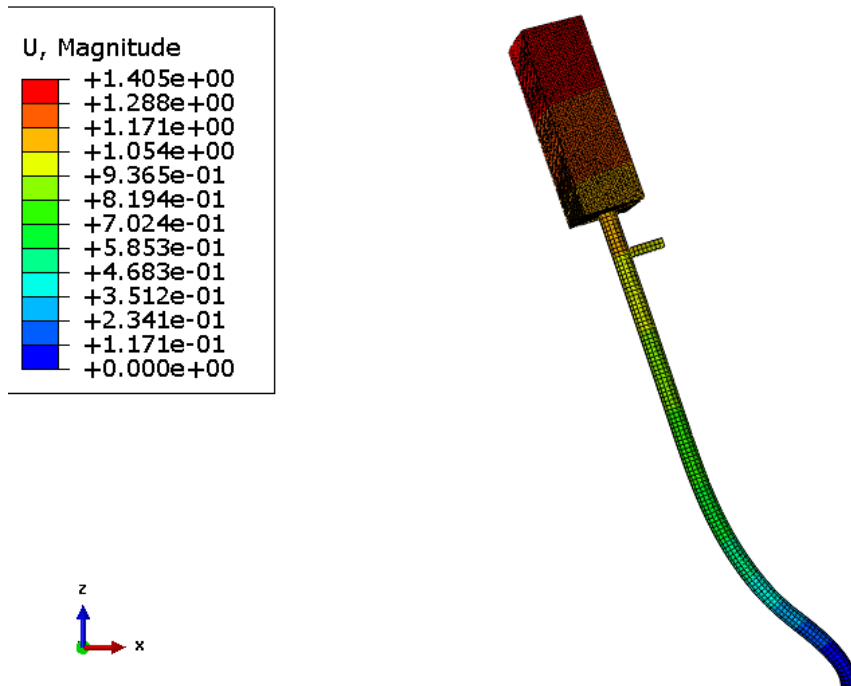


Figura 6_5

En el FRAME 20 (0,2s), con un valor de **2373 mm**, se produce el desplazamiento máximo en la misma localización para el ensayo a 60km/h

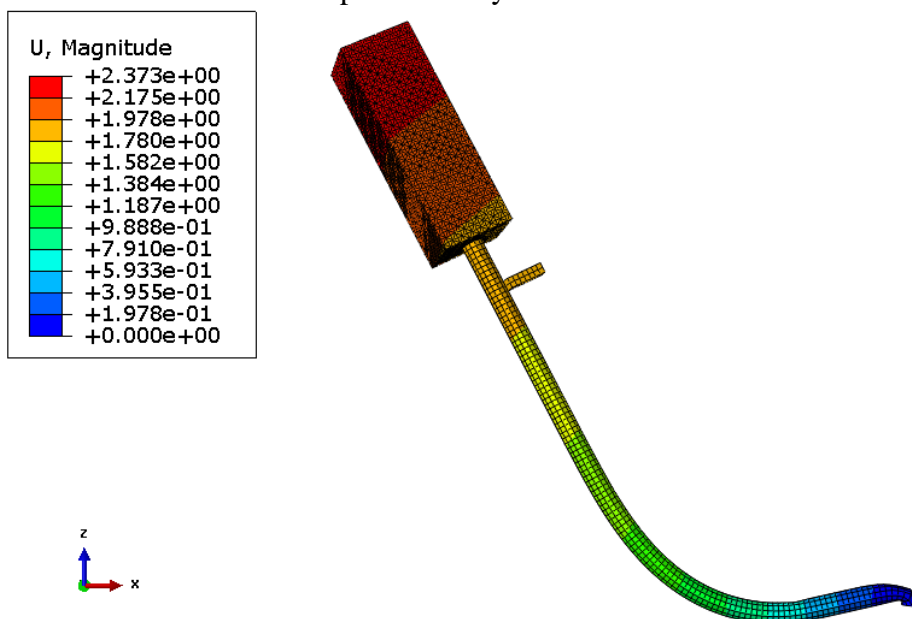


Figura 6_6

Deformaciones equivalentes plásticas en los puntos de integración (PEEQ)

Desde el FRAME 14 al 20 (0,14s - 0,2s), con un valor de **$9,691 \cdot 10^{-2}$** , se produce la PEEQ máxima en la base del poste para el caso a 30km/h.

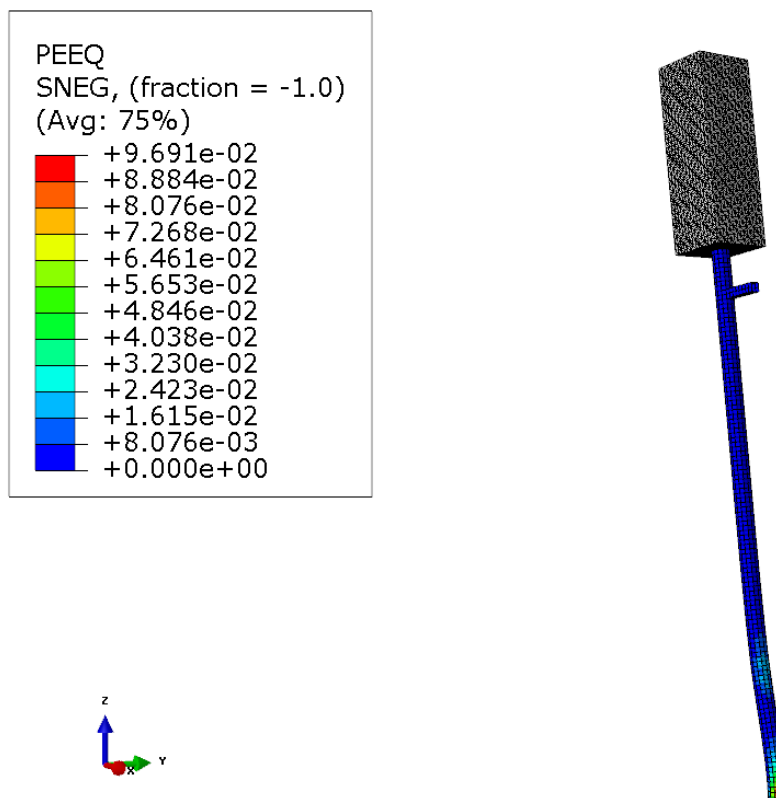


Figura 6_7

El PEEQ máximo a 45 km/h se produce en el poste desde el FRAME 18 al 20 (0,18s - 0,2s), con un valor de $2,226 \cdot 10^{-1}$ en la misma localización

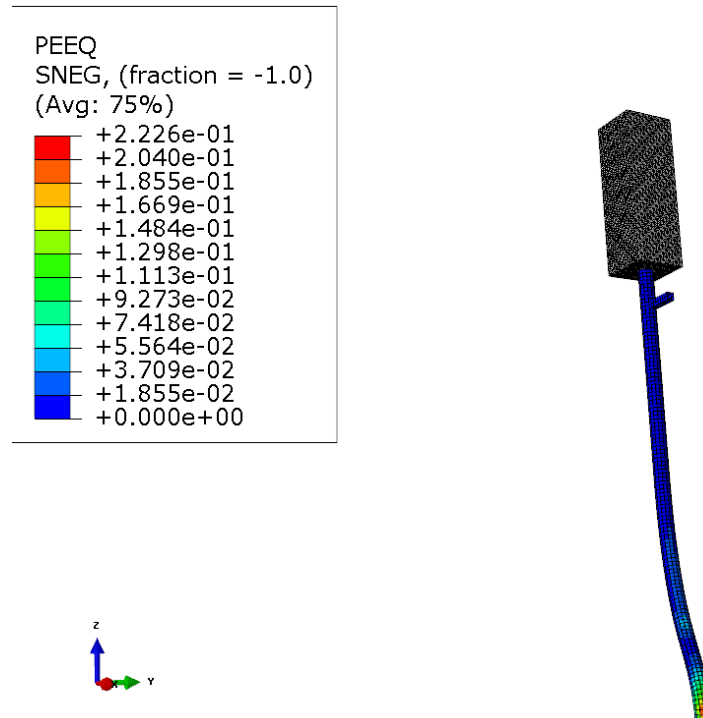


Figura 6_8

Para el caso a 60kmh/h, desde el FRAME 6 al 20 (0,06s - 0,2s), con un valor de $3,290 \cdot 10^{-1}$, se produce el PEEQ máximo en el mismo lugar.

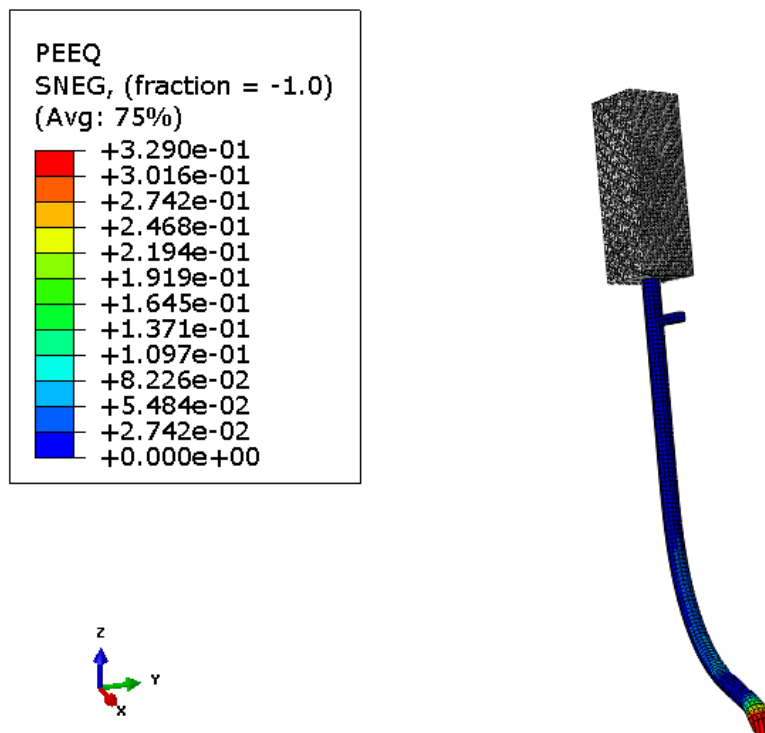


Figura 6_9

4.1.2.- Vehículo

Paragolpes (Tensiones de Von Mises)

La tensión máxima de Von Mises a 30 km/h se produce en el FRAME 8 (0,08s), con un valor de **338 MPa** en el centro del paragolpes

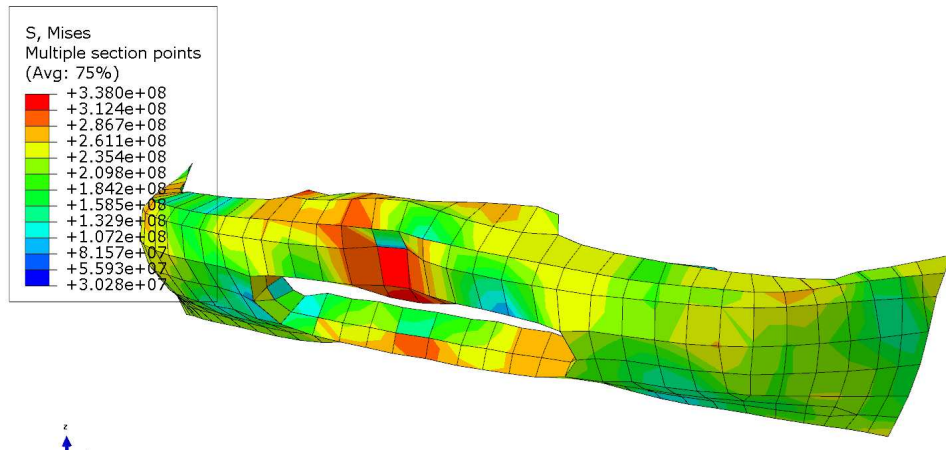


Figura 6_10

Para el caso a 45kmh/h, en el FRAME 8 (0,08s), con un valor de **355 MPa**, se produce la tensión máxima en el mismo lugar.

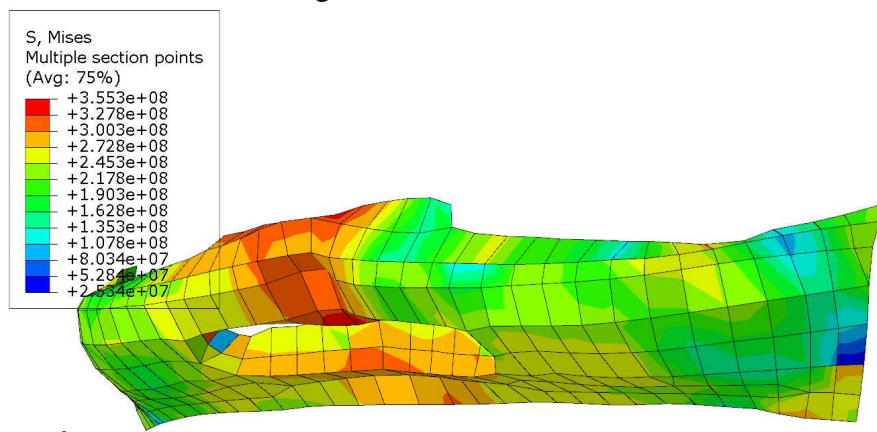


Figura 6_11

En el FRAME 8 (0,08s), con un valor de **366 MPa**, se produce la tensión máxima de Von Mises en la misma localización para el caso a 60km/h.

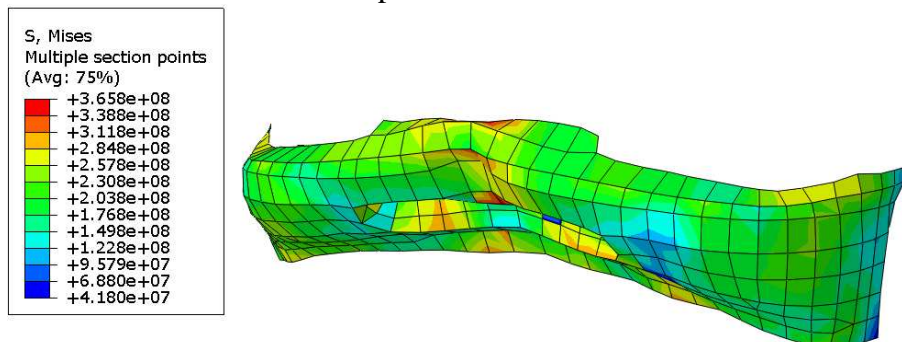


Figura 6_12

Paragolpes (Desplazamientos en dirección de avance)

Para el caso a 30km/h, en el FRAME 20 (0,2s), con un valor de **134 mm**, se produce el desplazamiento máximo en el centro del paragolpes

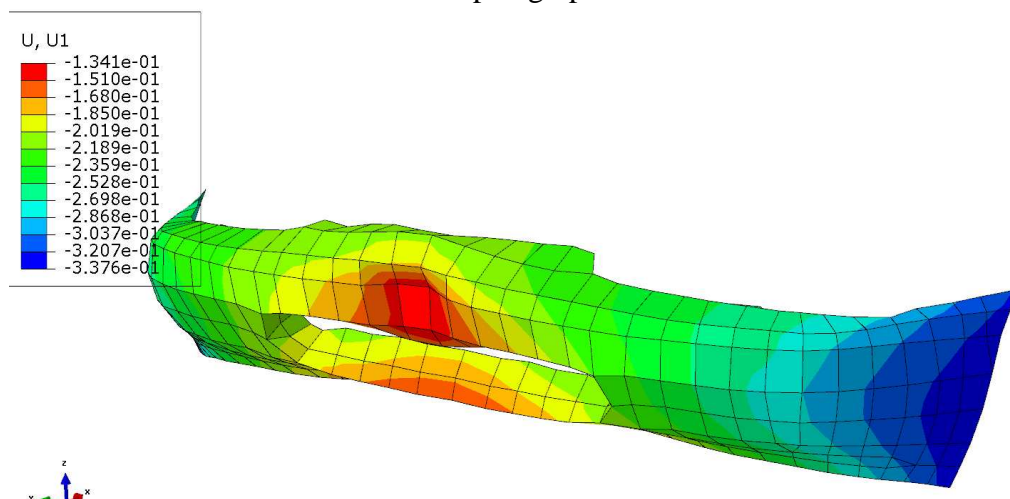


Figura 6_13

En el FRAME 20 (0,2s), con un valor de **252 mm**, se produce el desplazamiento máximo en el mismo lugar para el caso a 45km/h.

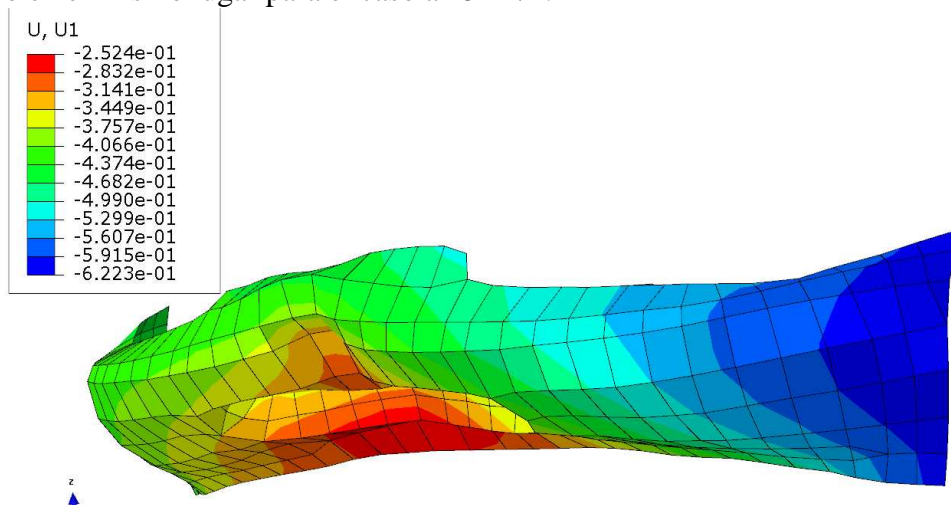


Figura 6_14

El desplazamiento máximo a 60 km/h se produce en la misma posición en el FRAME20 (0,2s), con un valor de **938 mm**.

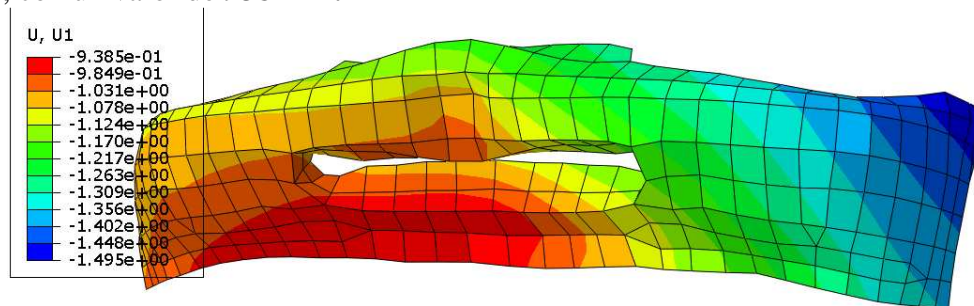


Figura 6_15

Paragolpes (PEEQ)

En el FRAME 20 (0,2s), con un valor de $9,056 \cdot 10^{-2}$, se produce el PEEQ máximo en la parte superior del centro del paragolpes para el caso a 30km/h.

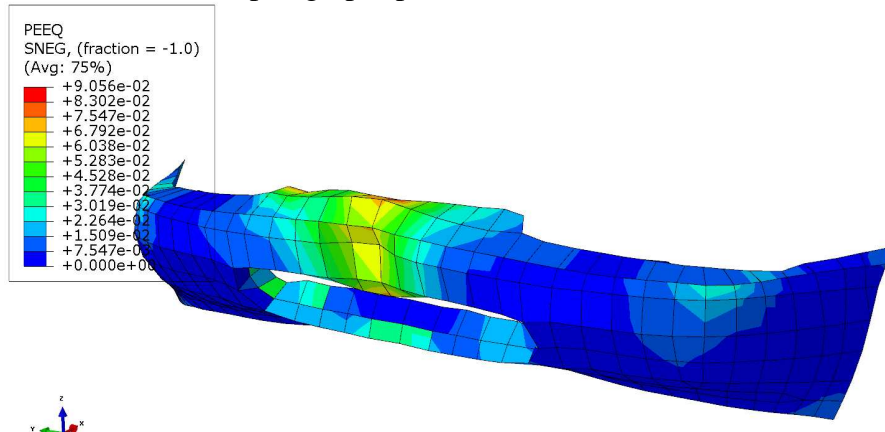


Figura 6_16

El PEEQ máximo a 45 km/h se produce en la misma posición desde el FRAME 10 al 20 (0,1s – 0,2s), con un valor de $1,229 \cdot 10^{-1}$

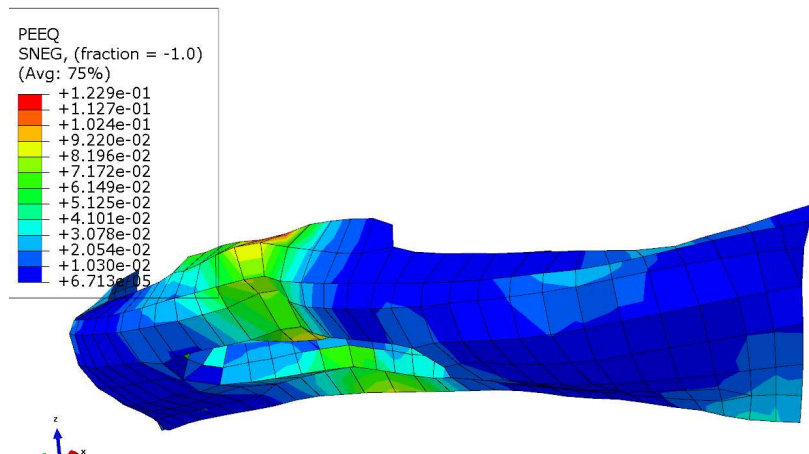


Figura 6_17

Para el caso a 60kmh/h, desde el FRAME 19 al 20 (0,19s - 0,2s), con un valor de $1,410 \cdot 10^{-1}$, se produce el PEEQ máximo en el mismo lugar

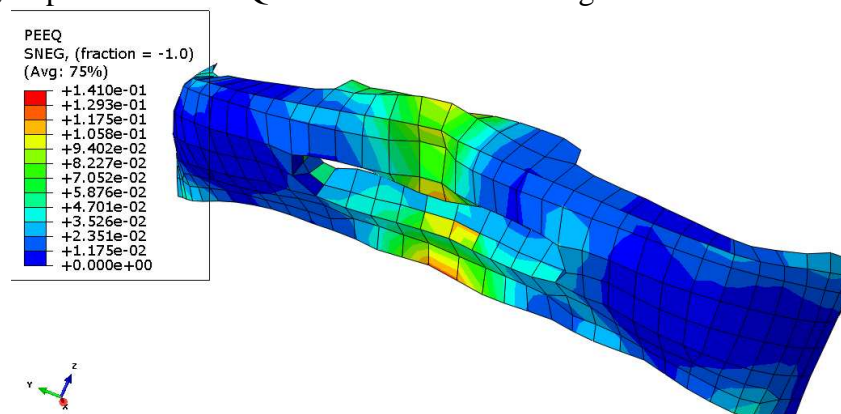


Figura 6_18

Suelo (Tensiones de Von Misses)

La tensión máxima de Von Misses a 30 km/h se produce en la esquina posterior izquierda del suelo en FRAME 20 (0,2s), con un valor de **1298 MPa**.

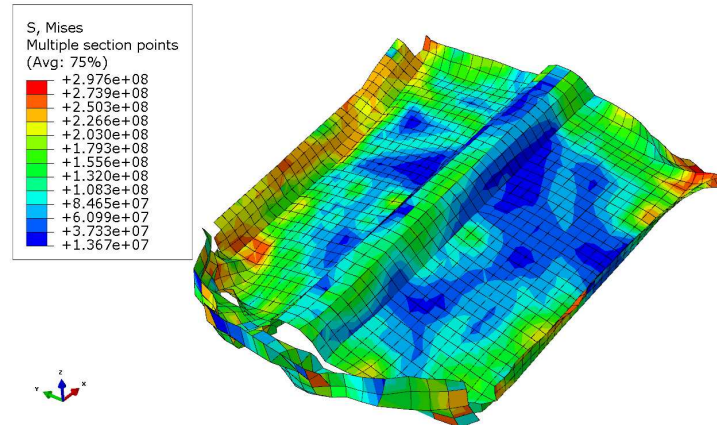


Figura 6_19

Para el caso a 45kmh/h, en el FRAME 9 (0,09s), con un valor de **373 MPa**, se produce la tensión máxima en la parte delantera central

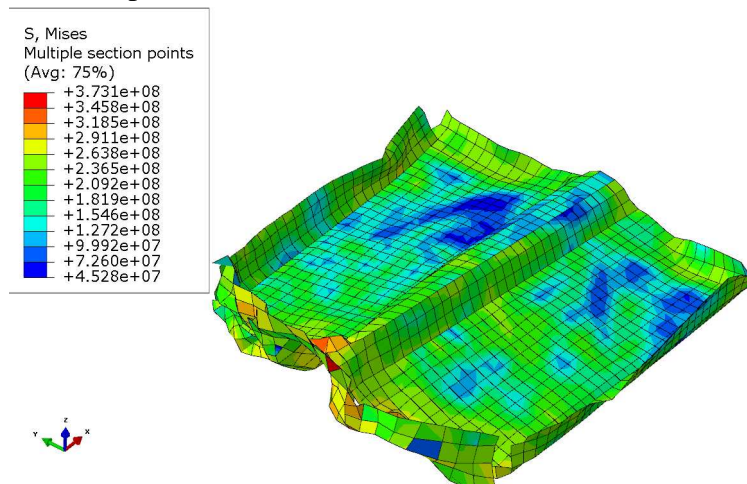


Figura 6_20

En el FRAME 15 (0,15s) a 60 km/h se produce en la parte delantera central, con un valor de **359 MPa** la tensión máxima

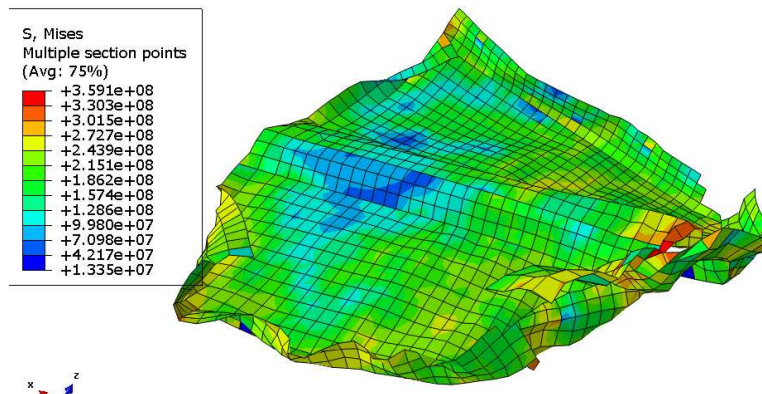


Figura 6_21

Suelo (PEEQ)

Para el caso a 30km/h, desde el FRAME 10 al 20 (0,1s - 0,2s), con un valor de $6,305 \cdot 10^{-2}$, se produce la PPEQ máxima.

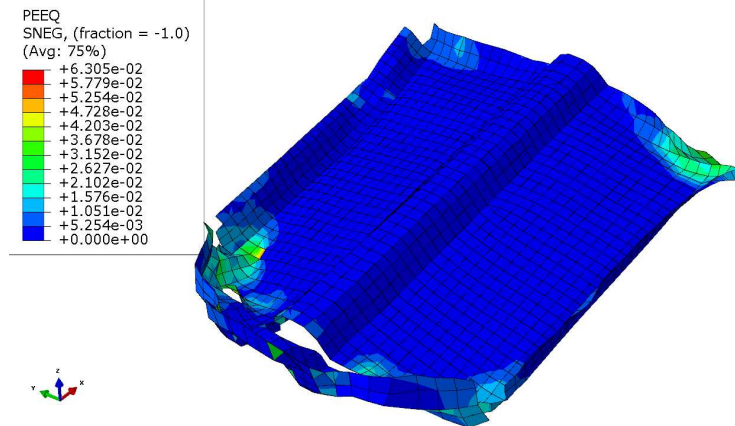


Figura 6_22

En el FRAME 20 (0,2s) a 45 km/h se produce con un valor de $2,371 \cdot 10^{-1}$ la PEEQ máxima

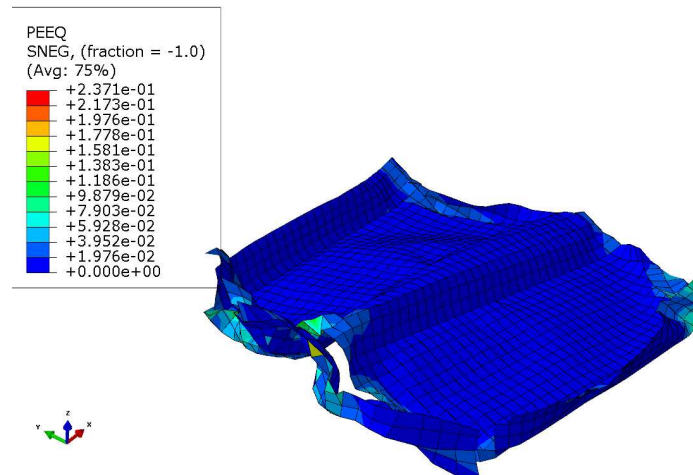


Figura 6_23

La PEEQ máxima a 60 km/h se produce desde el FRAME 13 al 20 (0,13s - 0,2s), con un valor de $2,371 \cdot 10^{-1}$.

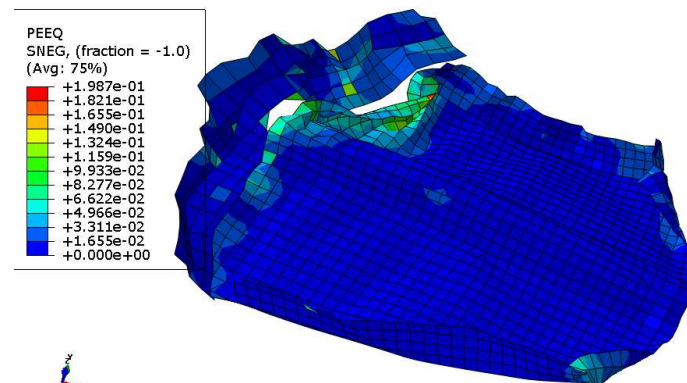


Figura 6_24

Vehículo

Para el caso a 30kmh/h, el vehículo tras el impacto quedaría de la siguiente forma:

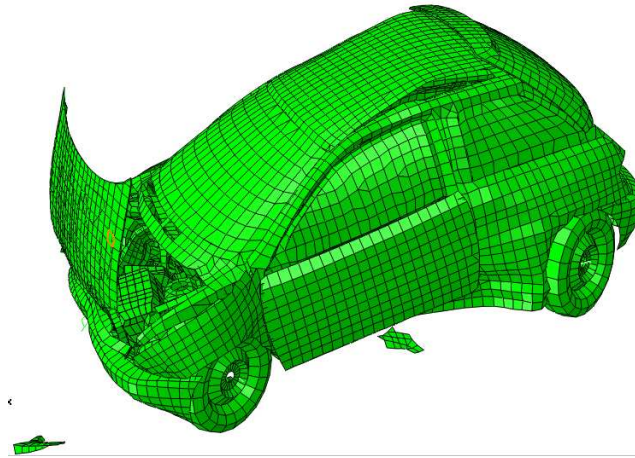


Figura 6_25

El vehículo quedaría deformado de la siguiente manera para el caso a 45km/h tras el choque:

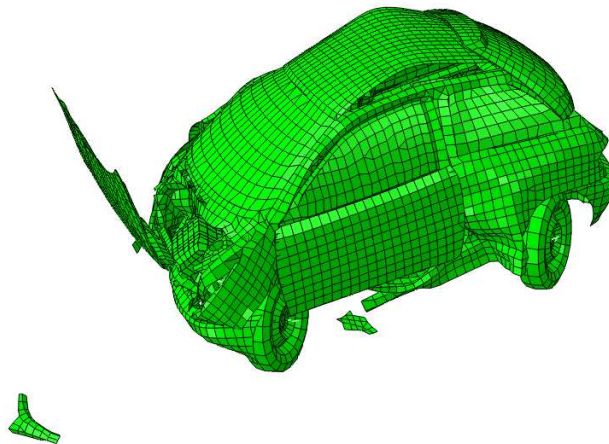


Figura 6_26

La deformación por el impacto que sufriría el vehículo para el caso de 60km/h sería como sigue:

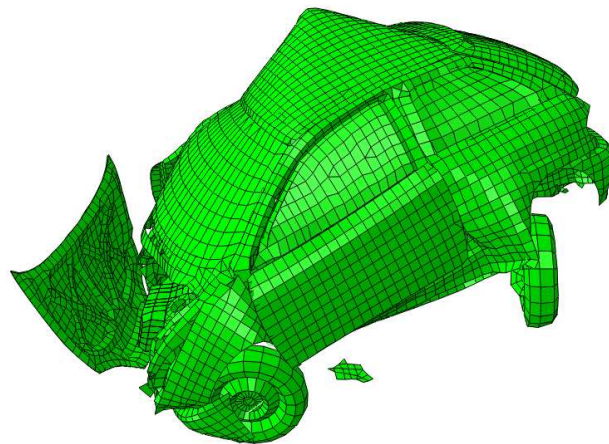


Figura 6_27

4.1.3.- Gráficas

Energía de deformación

El valor máximo de la energía de deformación para el modelo entero es **2250 J** para el caso de 30km/h. Y de **490 J** para el semáforo y **2050 J** para el coche.

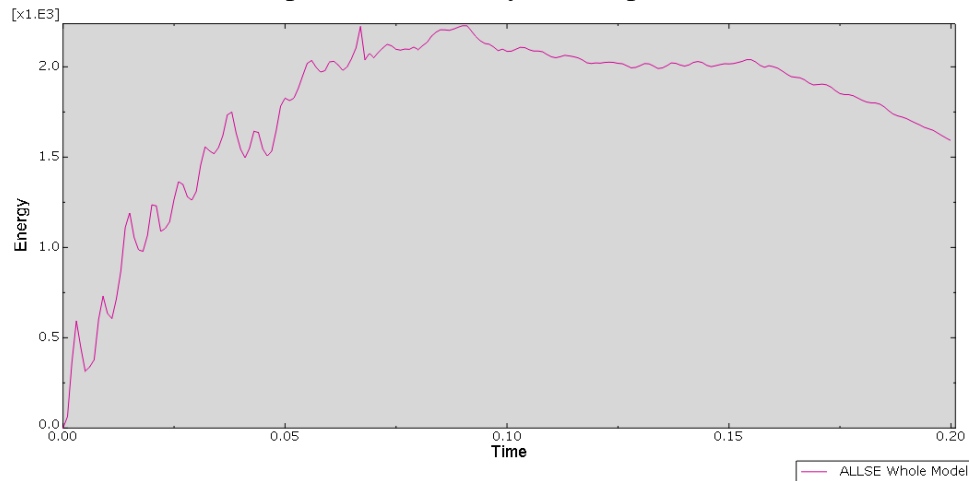


Figura 6_28

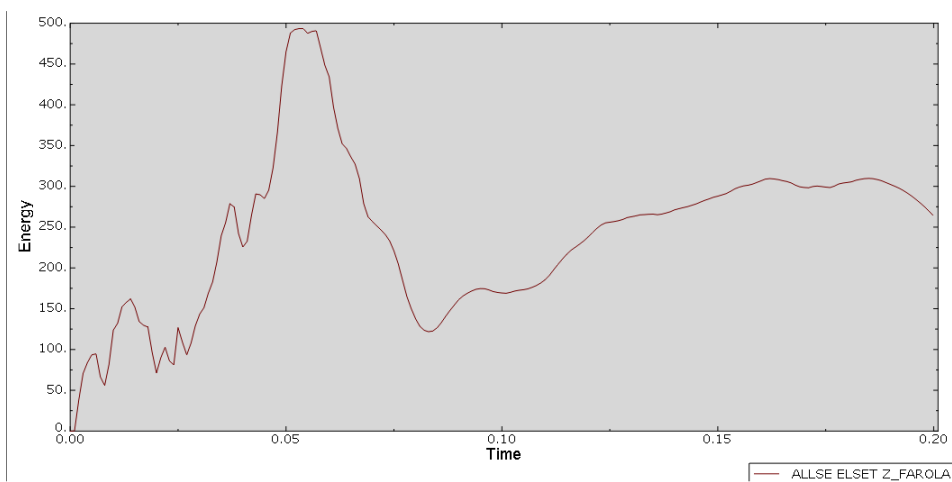


Figura 6_29

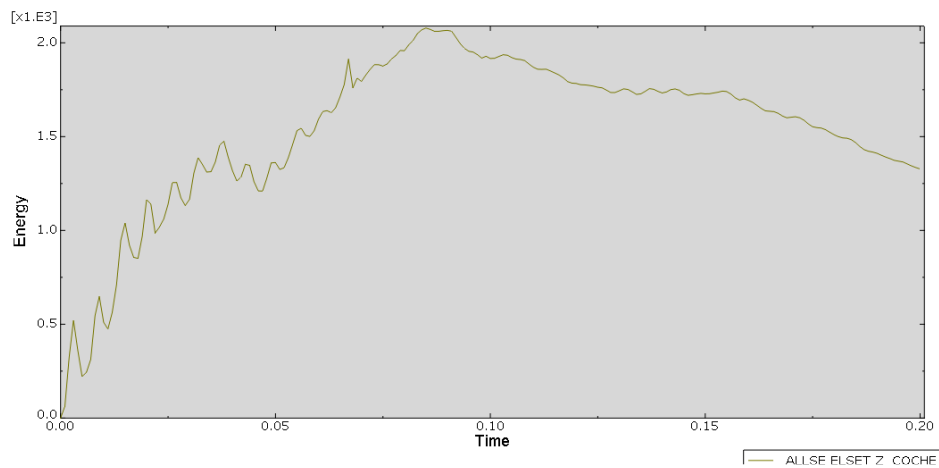


Figura 6_30

Para el caso de 45km/h, el valor máximo de la energía de deformación para el modelo entero es **3300 J**. Y de **610 J** para el semáforo y **3000 J** para el coche.

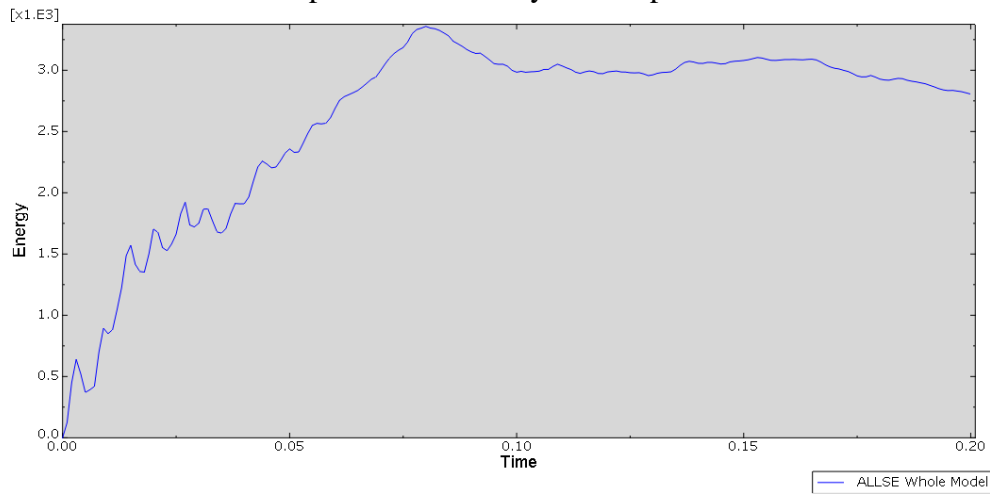


Figura 6_31

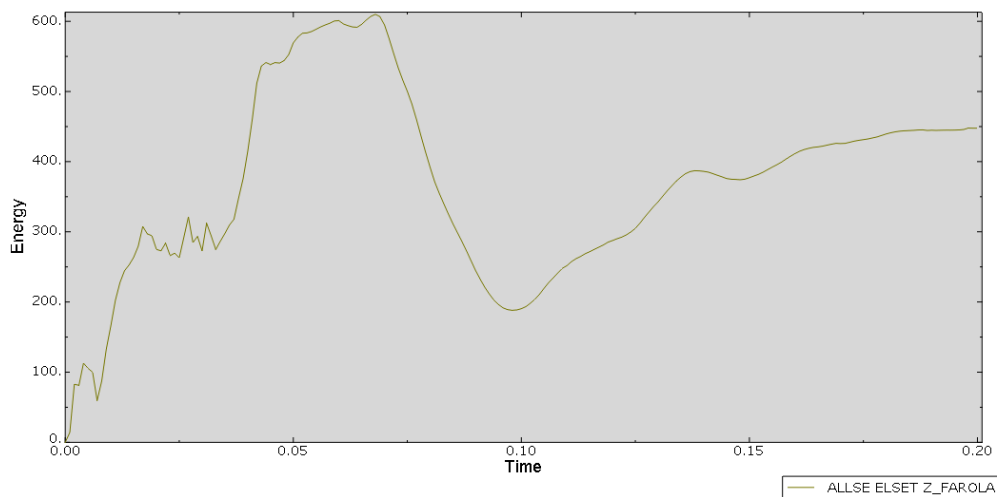


Figura 6_32

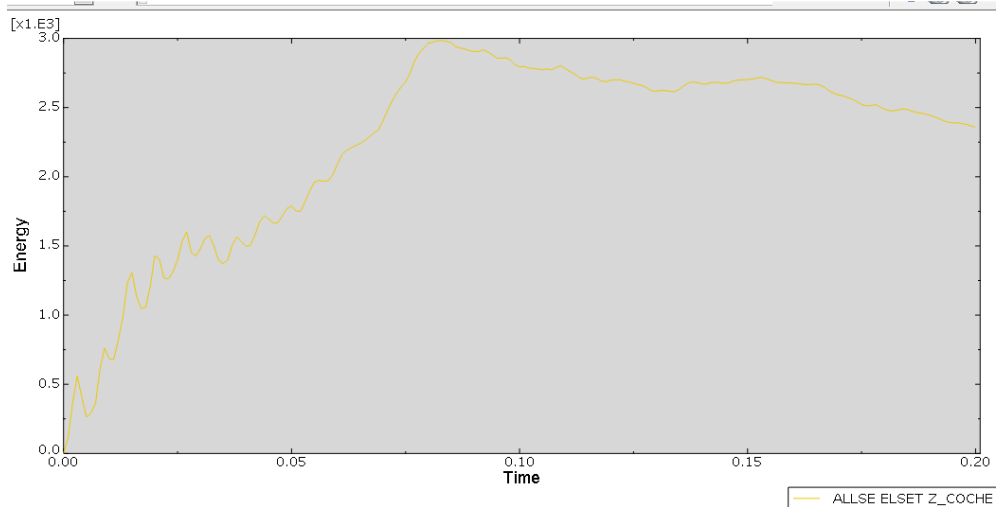


Figura 6_33

Para el caso de 60km/h, el valor máximo de la energía de deformación para el modelo entero es **4200 J**. Y de **760 J** para el semáforo y **3450 J** para el coche.

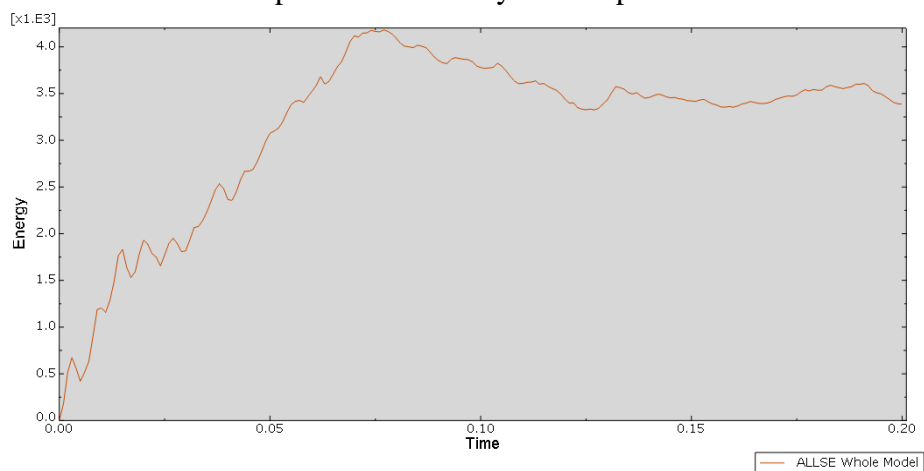


Figura 6_34

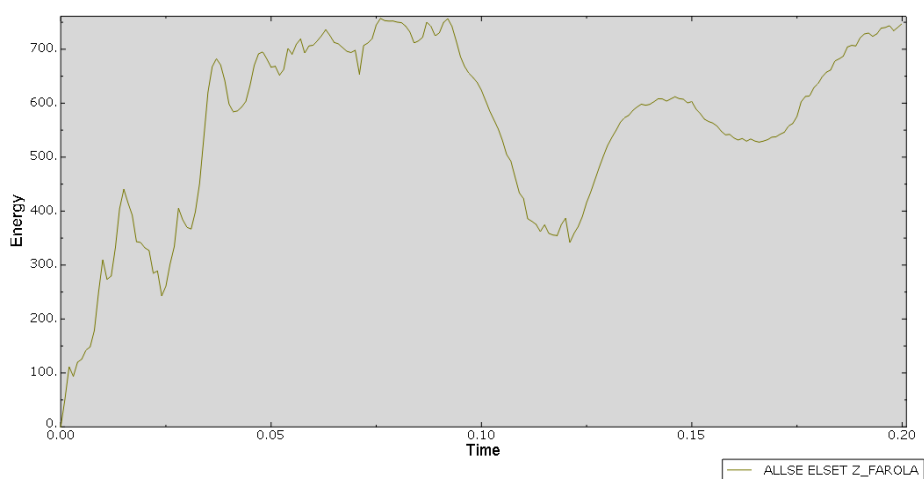


Figura 6_35

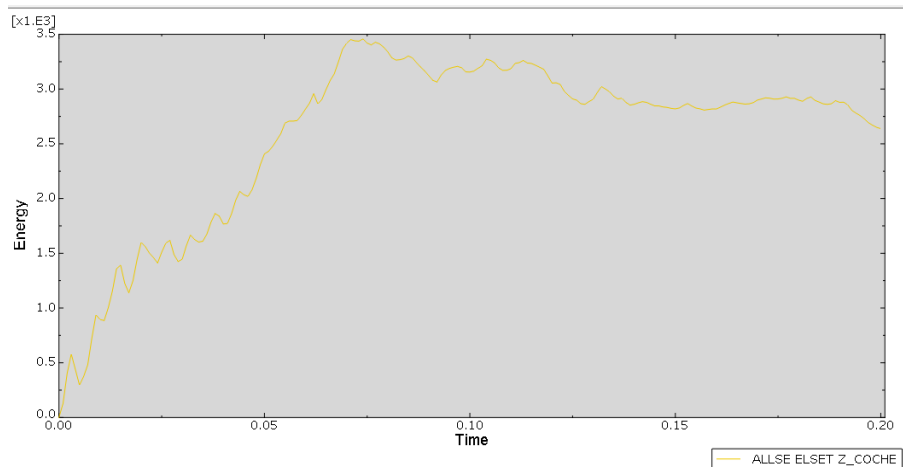


Figura 6_36

Disipación viscosa

El valor máximo de la energía disipada viscosamente para el modelo entero es **4500 J** para el caso de 30km/h. Y de **9 J** para el semáforo y **1875 J** para el coche.

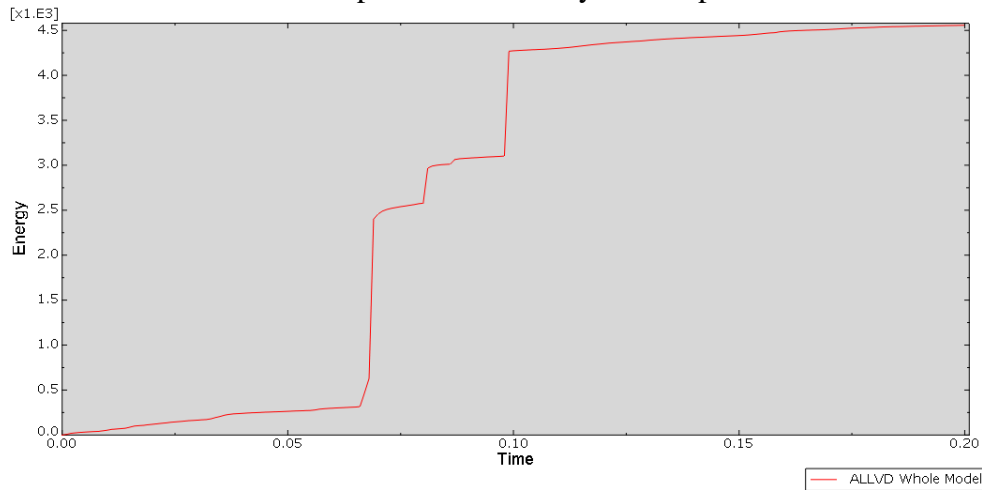


Figura 6_37

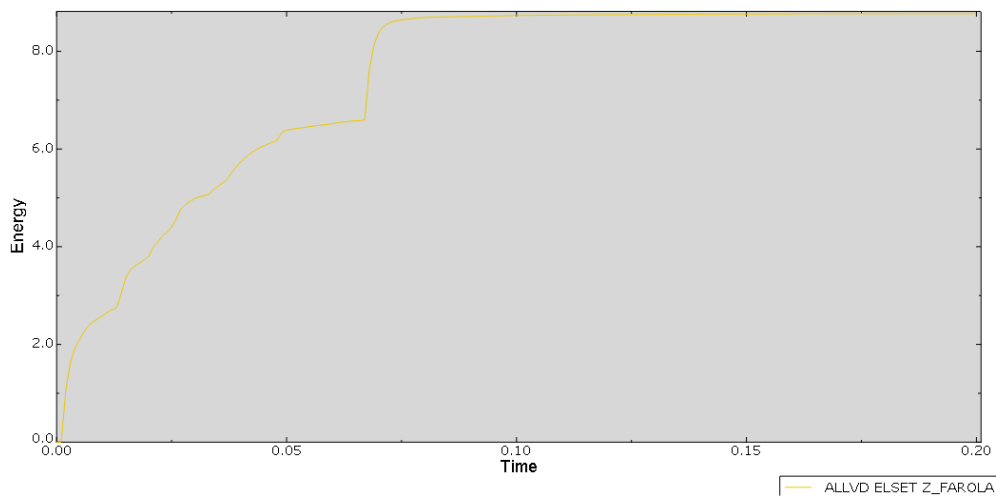


Figura 6_38

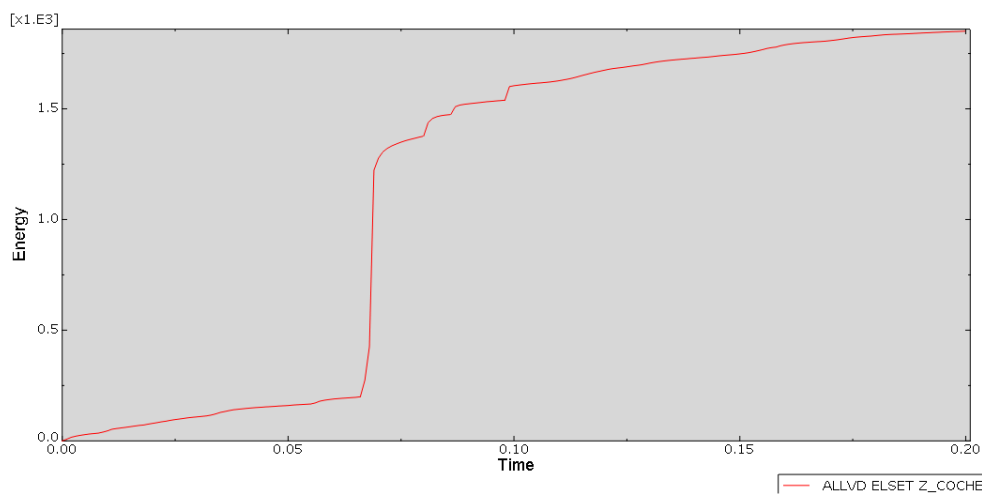


Figura 6_39

Para el caso de 45km/h, el valor máximo de la energía disipada viscosamente para el modelo entero es **1850 J**. Y de **14 J** para el semáforo y **1000 J** para el coche.

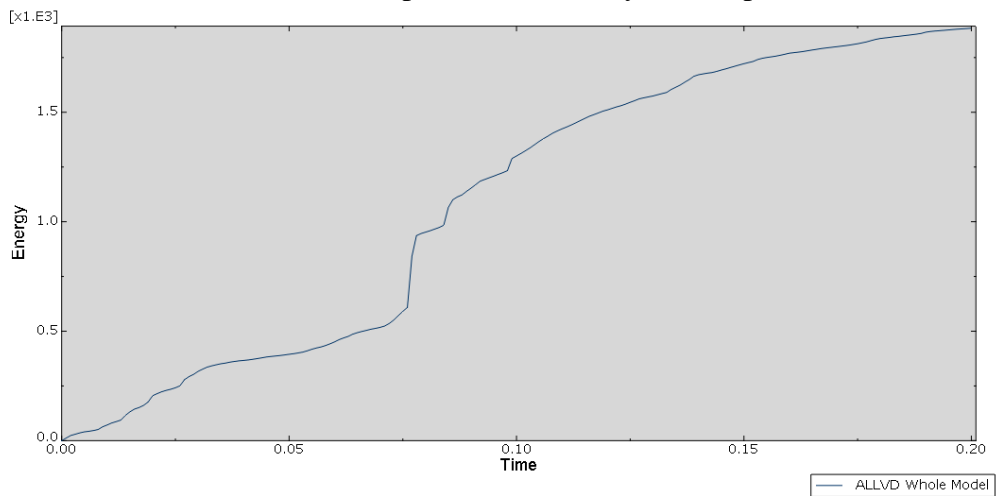


Figura 6_40

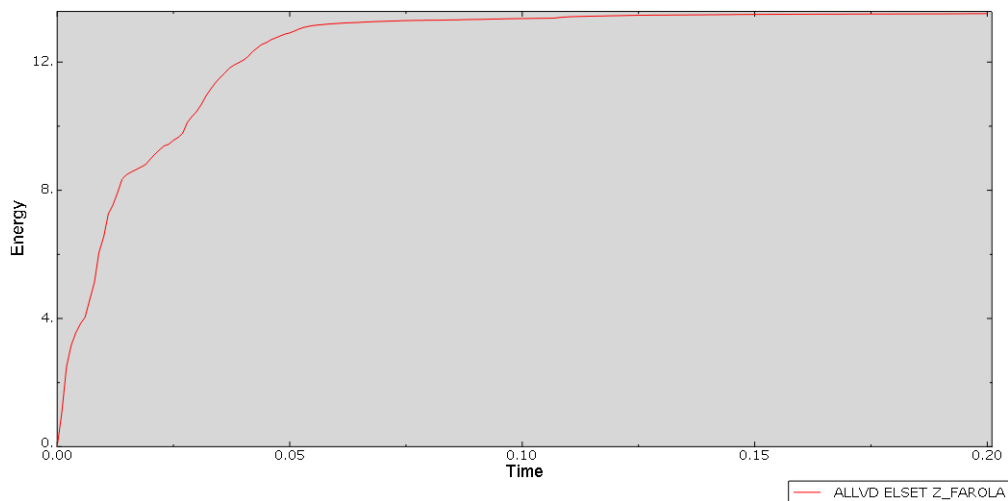


Figura 6_41

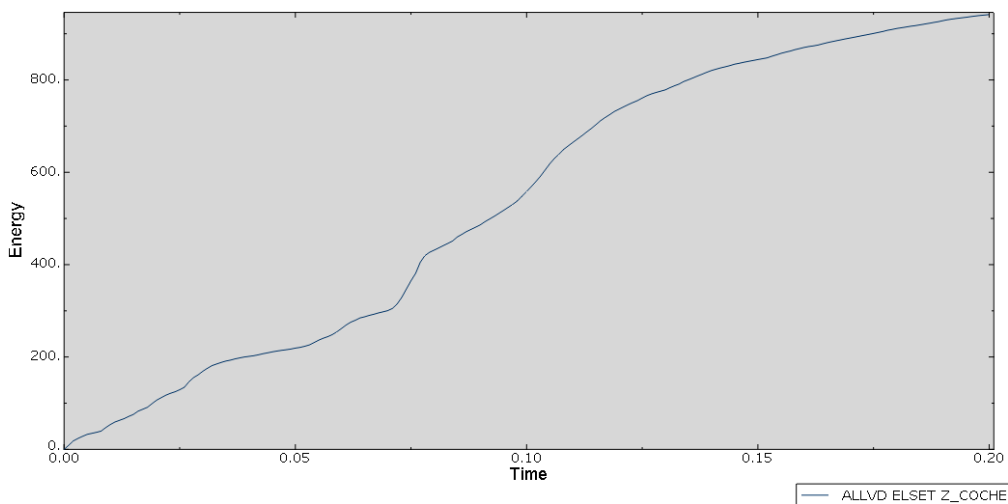


Figura 6_42

Para el caso de 60km/h, el valor máximo de la energía disipada viscosamente para el modelo entero es **2500 J**. Y de **260 J** para el semáforo y **1400 J** para el coche.

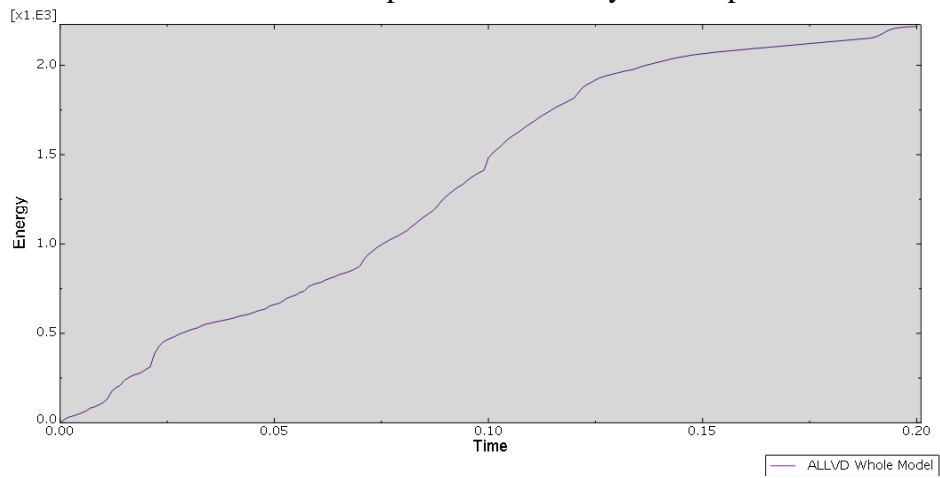


Figura 6_43

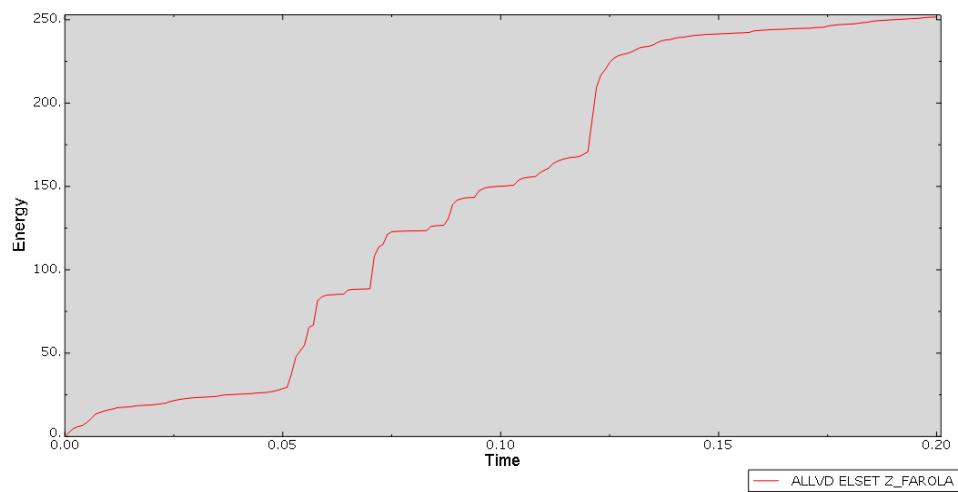


Figura 6_44

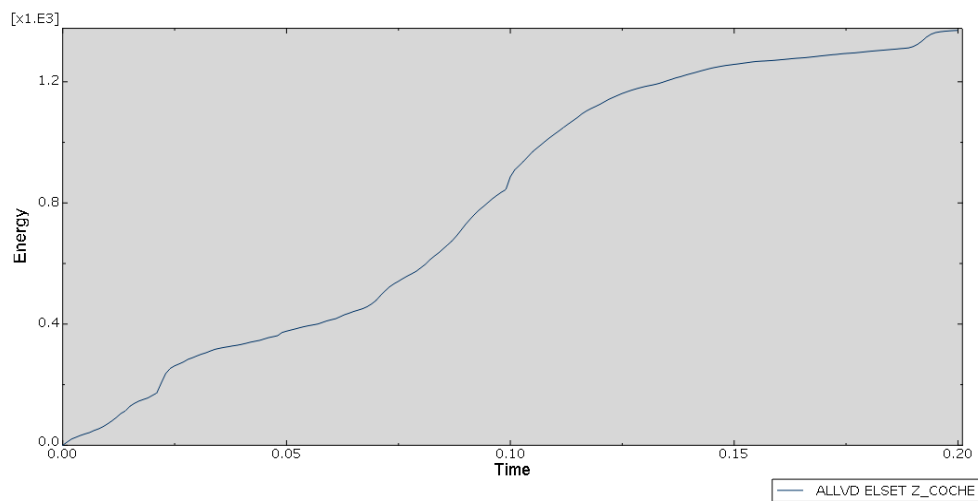


Figura 6_45

Disipación plástica

Para el caso de 30km/h, el valor máximo de la energía disipada plásticamente para el modelo entero es **26000 J**. Y de **9200 J** para el semáforo y **16800 J** para el coche.

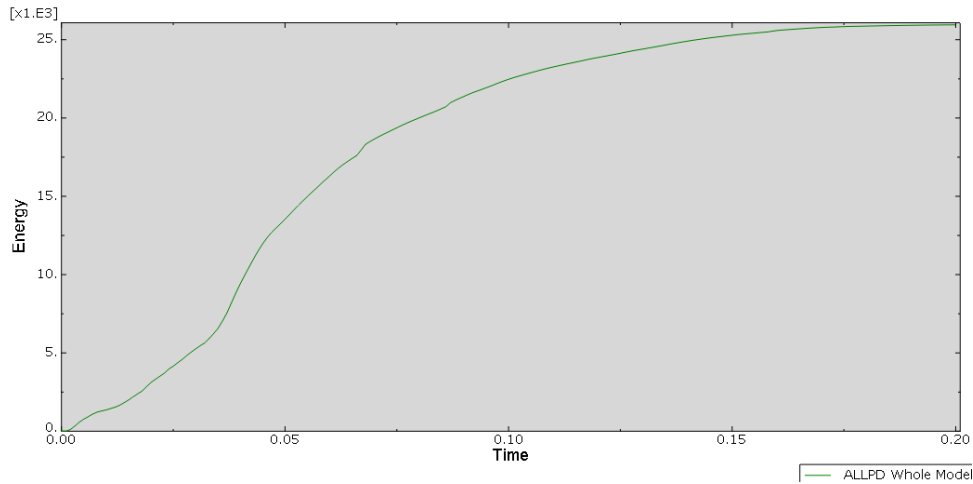


Figura 6_46

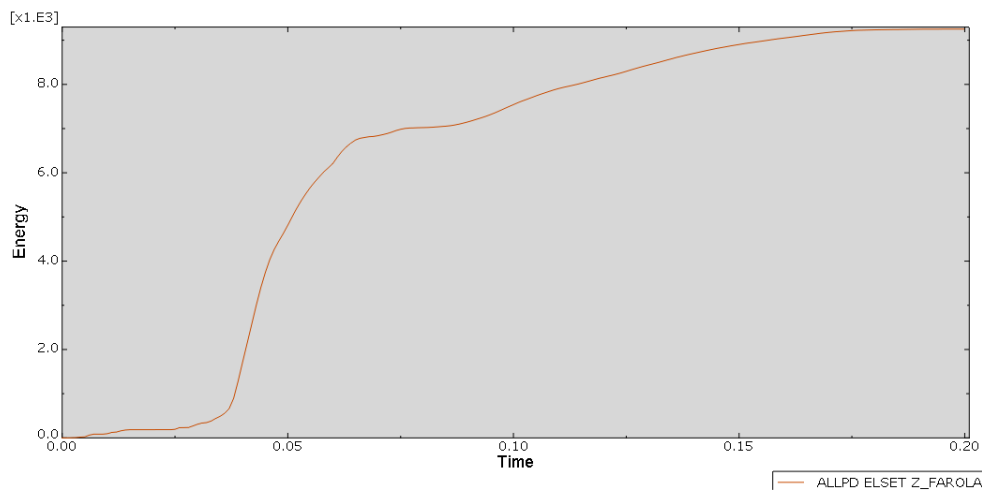


Figura 6_47

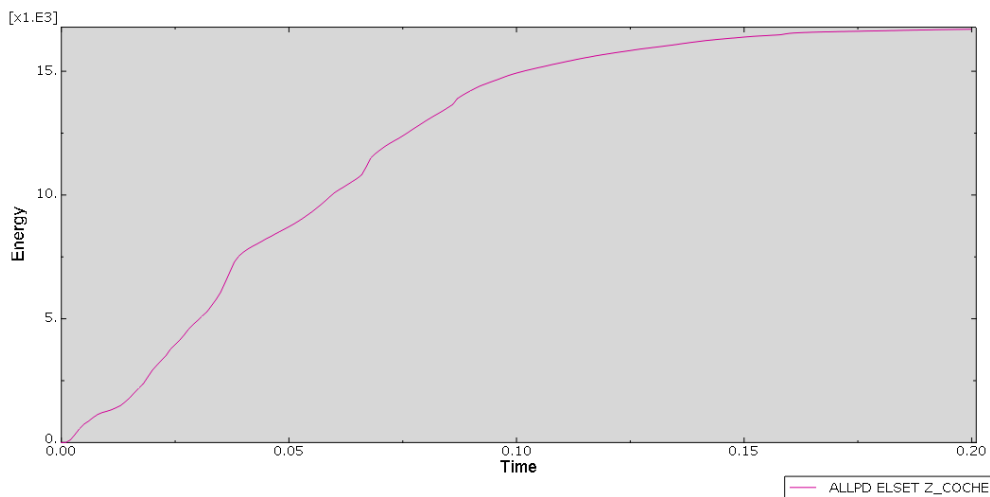


Figura 6_48

El valor máximo de la energía disipada plásticamente para el modelo entero es **60000 J** para el caso de 45km/h. Y de **27500 J** para el semáforo y **32500 J** para el coche.

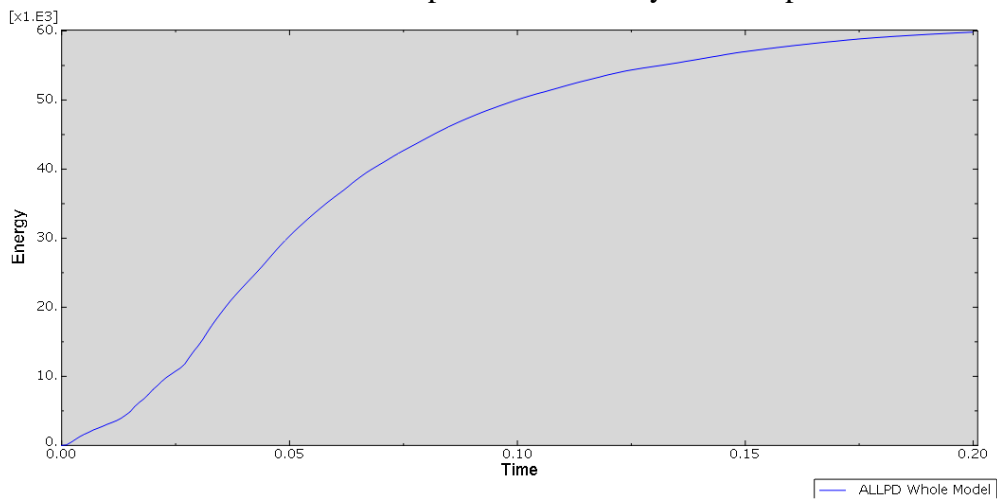


Figura 6_49

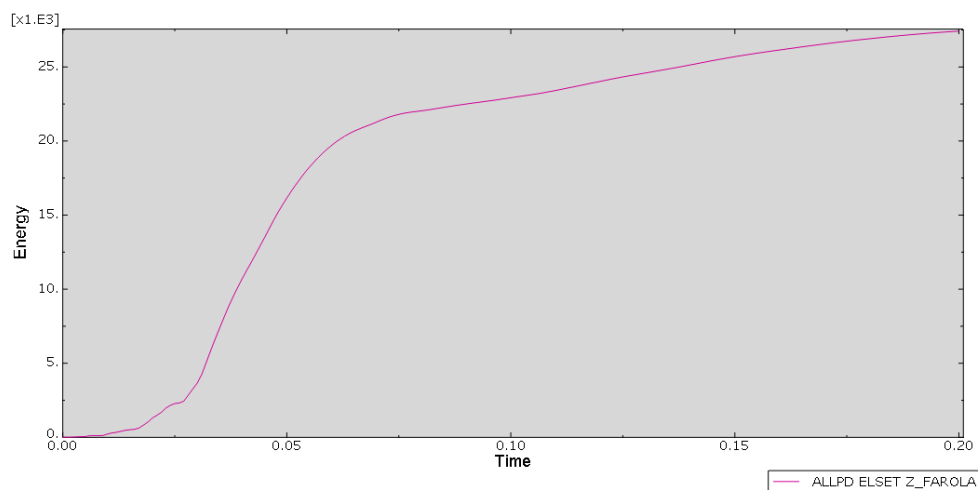


Figura 6_50

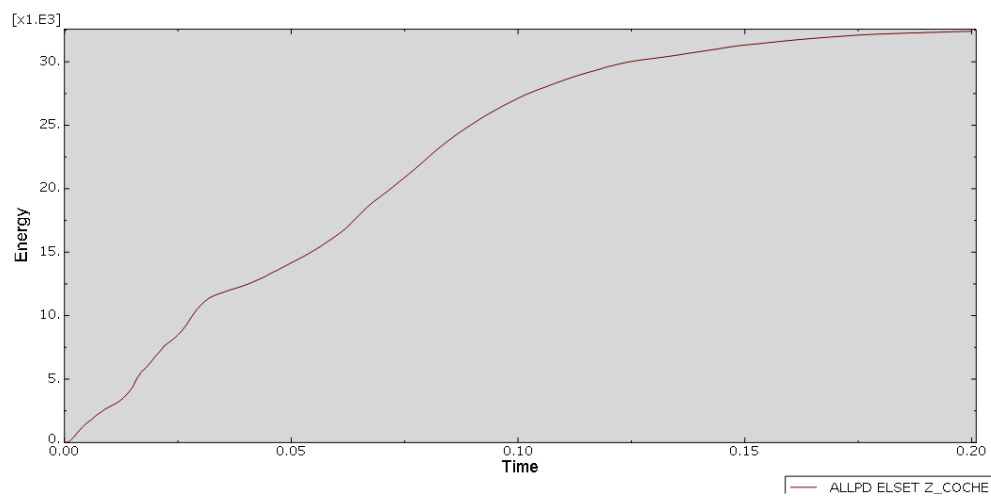


Figura 6_51

Para el caso de 60km/h, el valor máximo de la energía disipada plásticamente para el modelo entero es **82500 J**. Y de **43750 J** para el semáforo y **38750 J** para el coche.

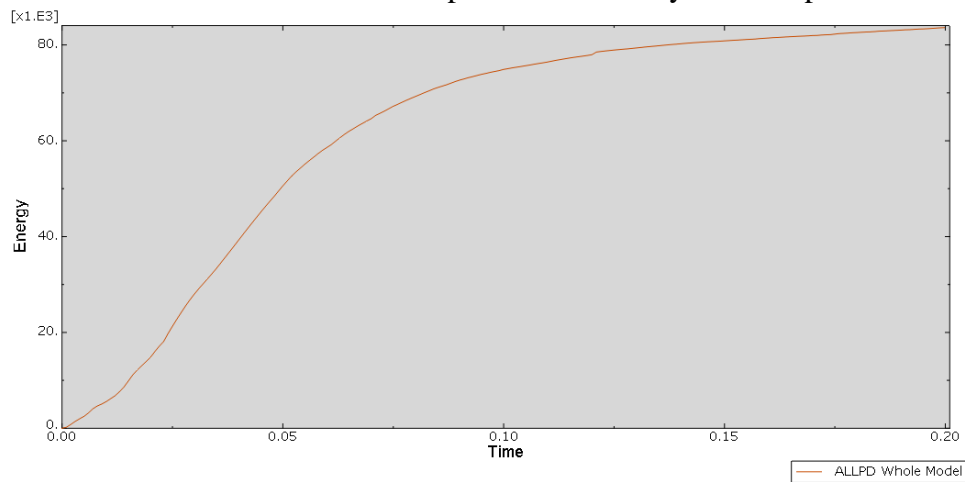


Figura 6_52

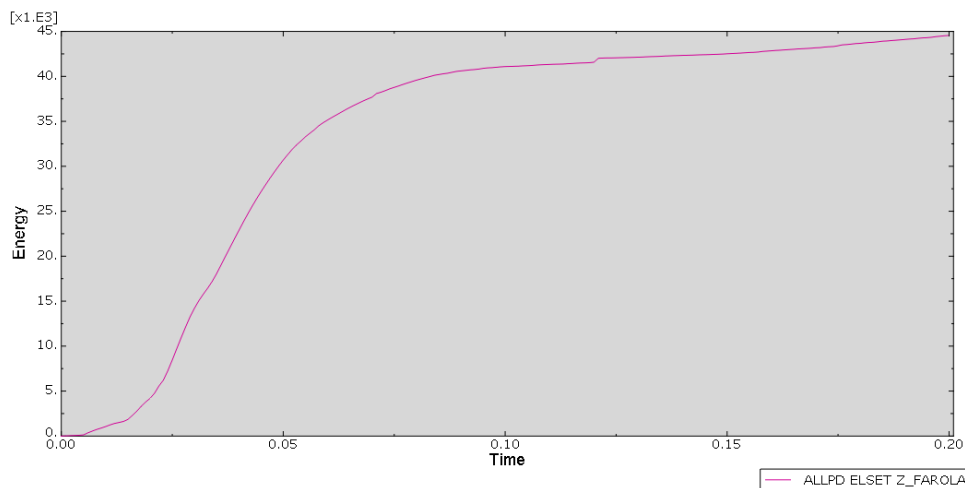


Figura 6_53

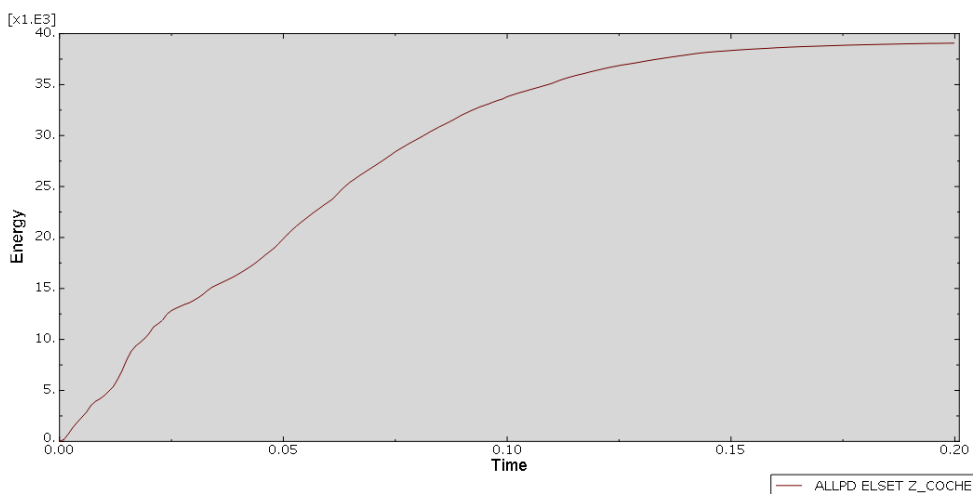


Figura 6_54

Para el caso de 45km/h:

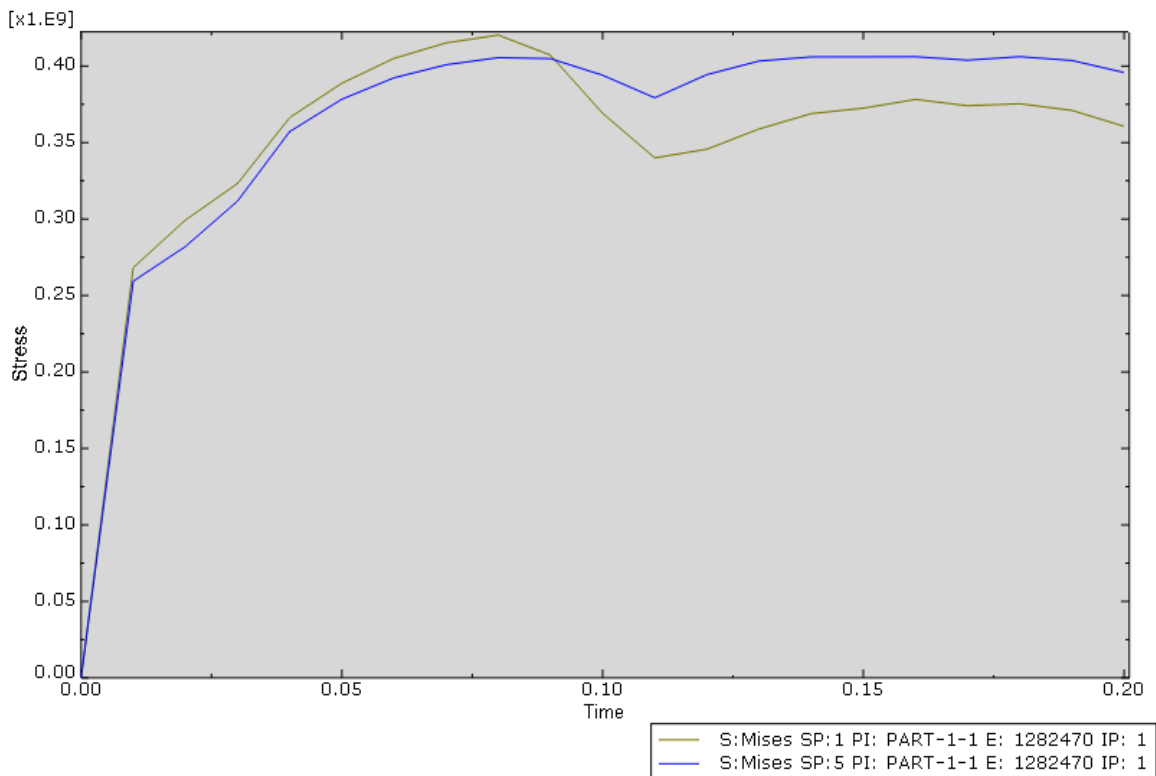


Figura 6_57

Para el caso de 60km/h:

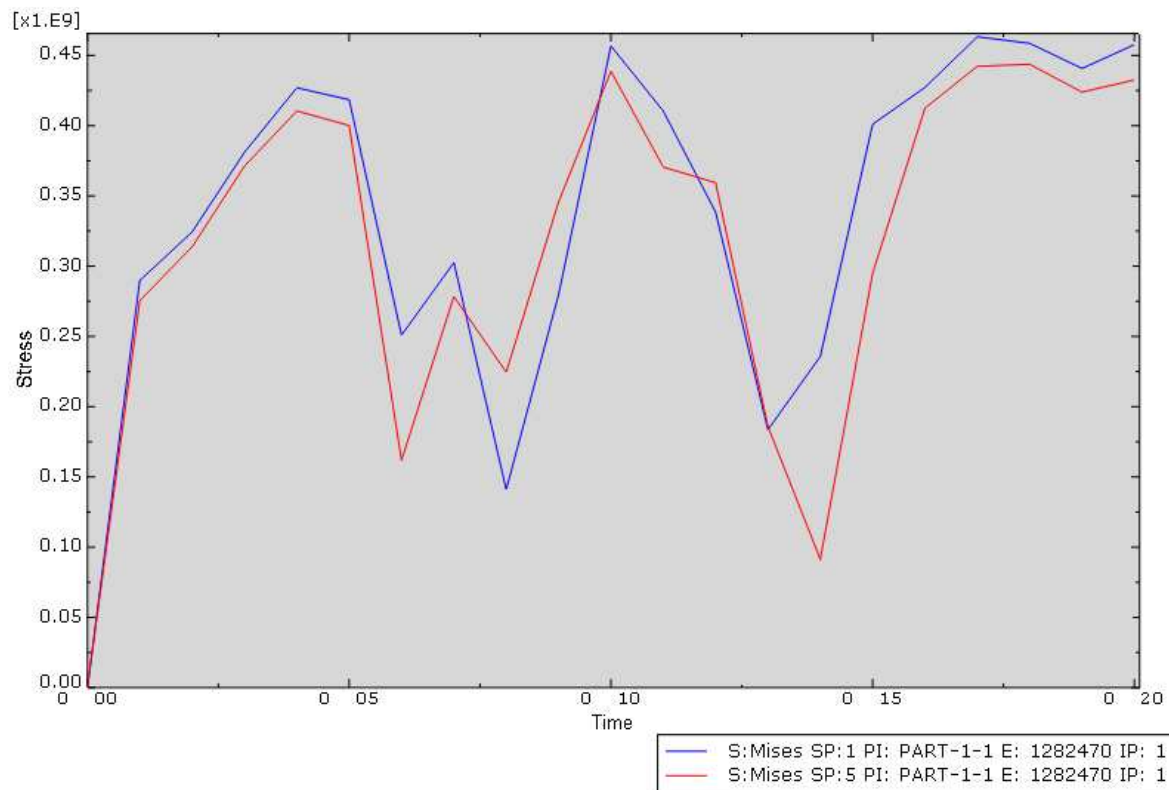


Figura 6_58

Progreso de velocidades del vehículo en dirección de avance

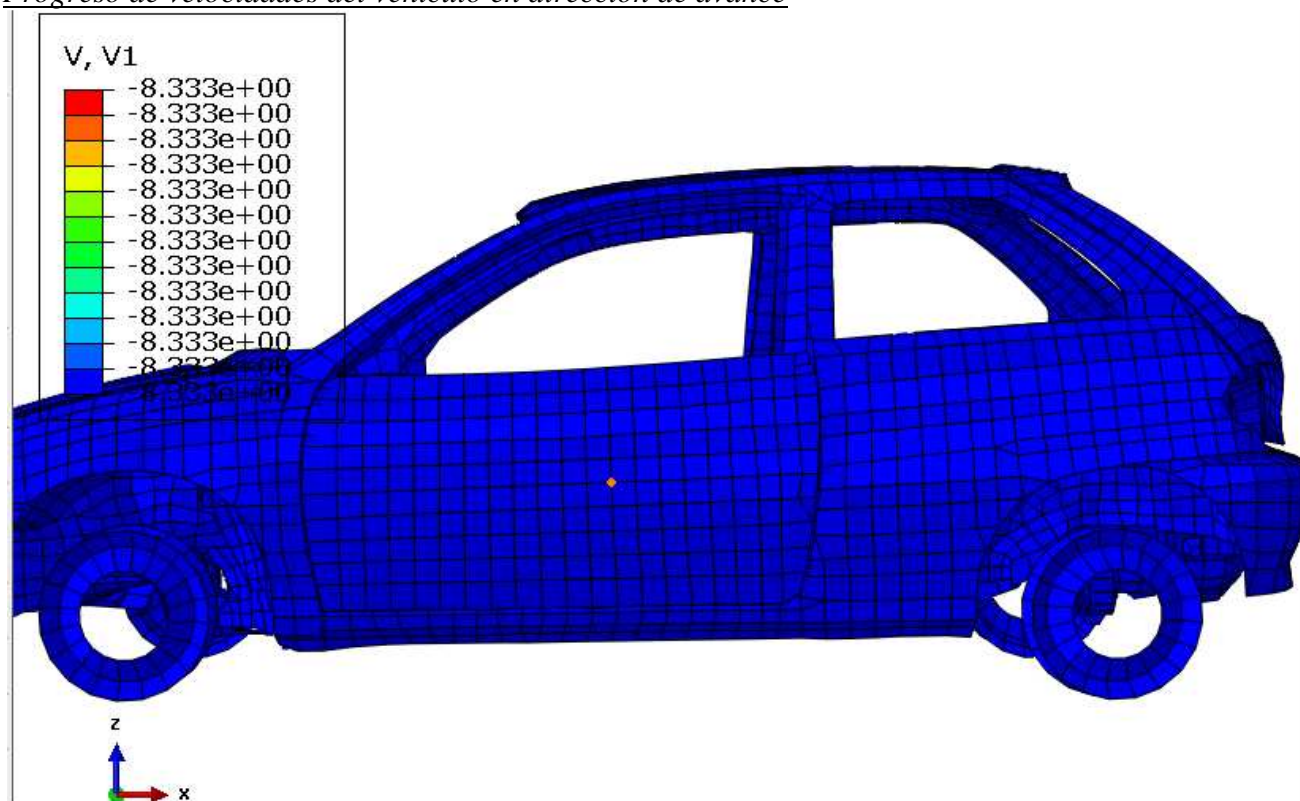


Figura 6_59

Para el caso de 30km/h, al velocidad de salida es de **-1 m/s**:

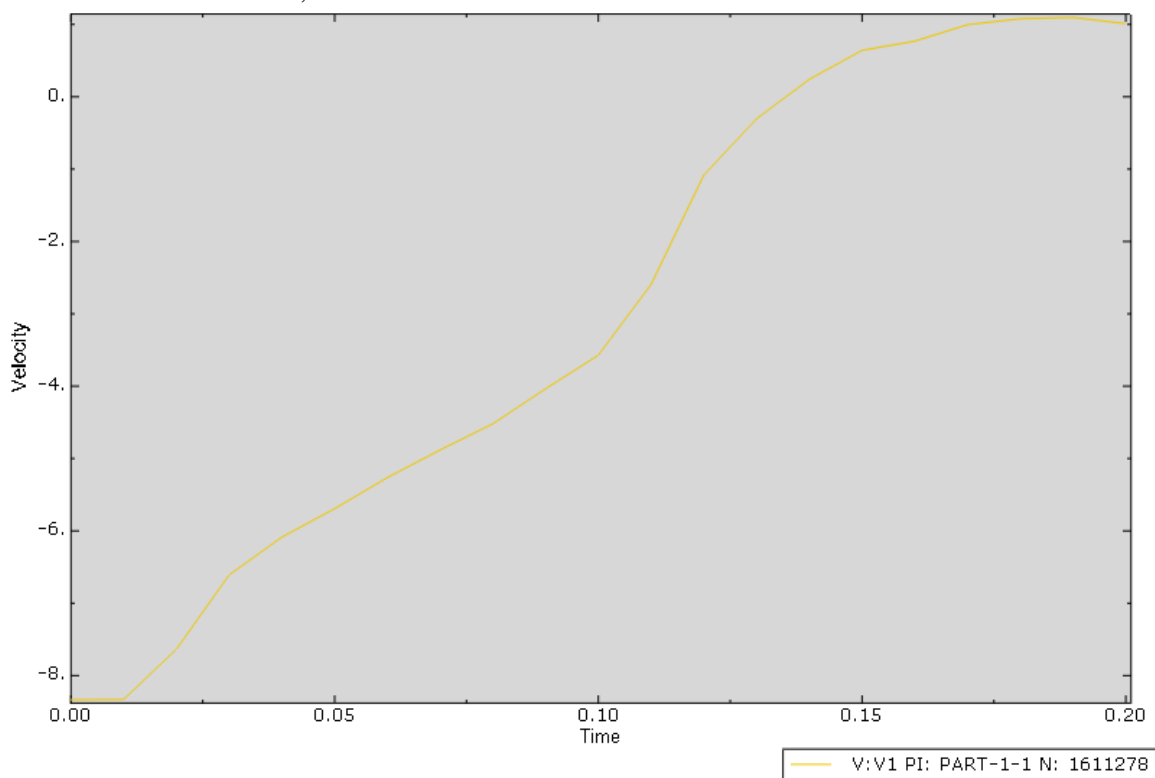


Figura 6_60

La velocidad de salida para el caso de 45km/h es de **0 m/s**:

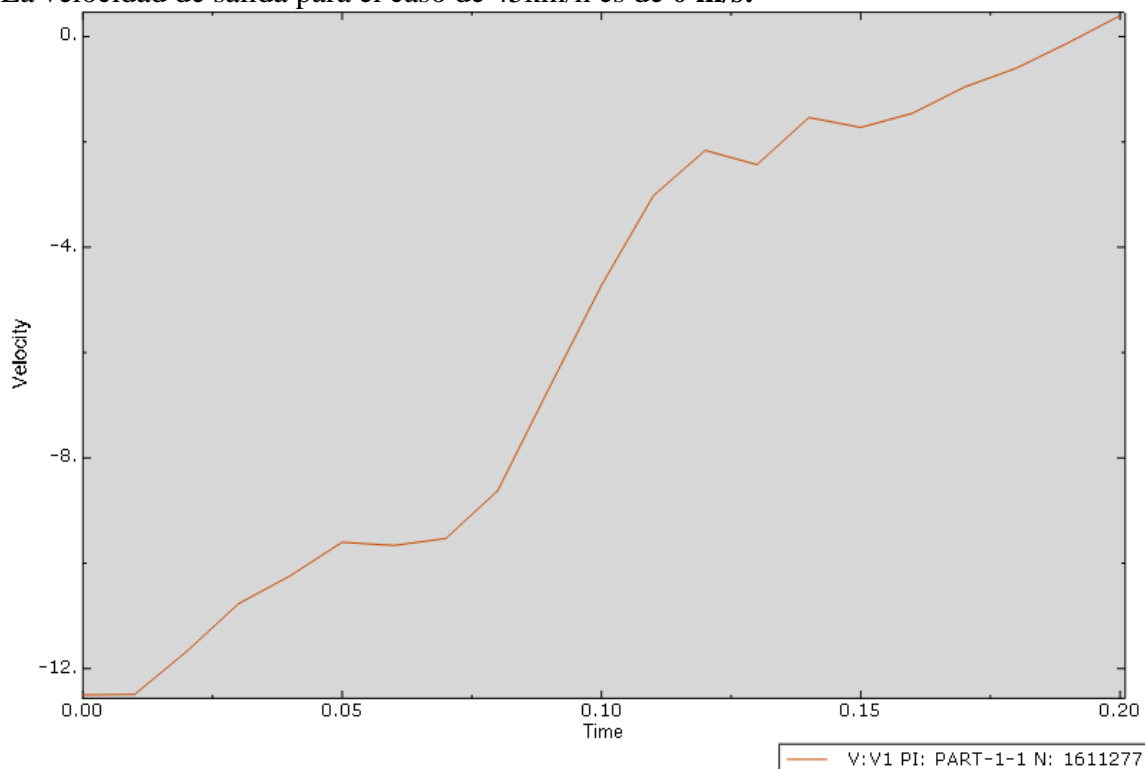


Figura 6_61

La velocidad de salida es de **6,5 m/s** para el caso de 60km/h:

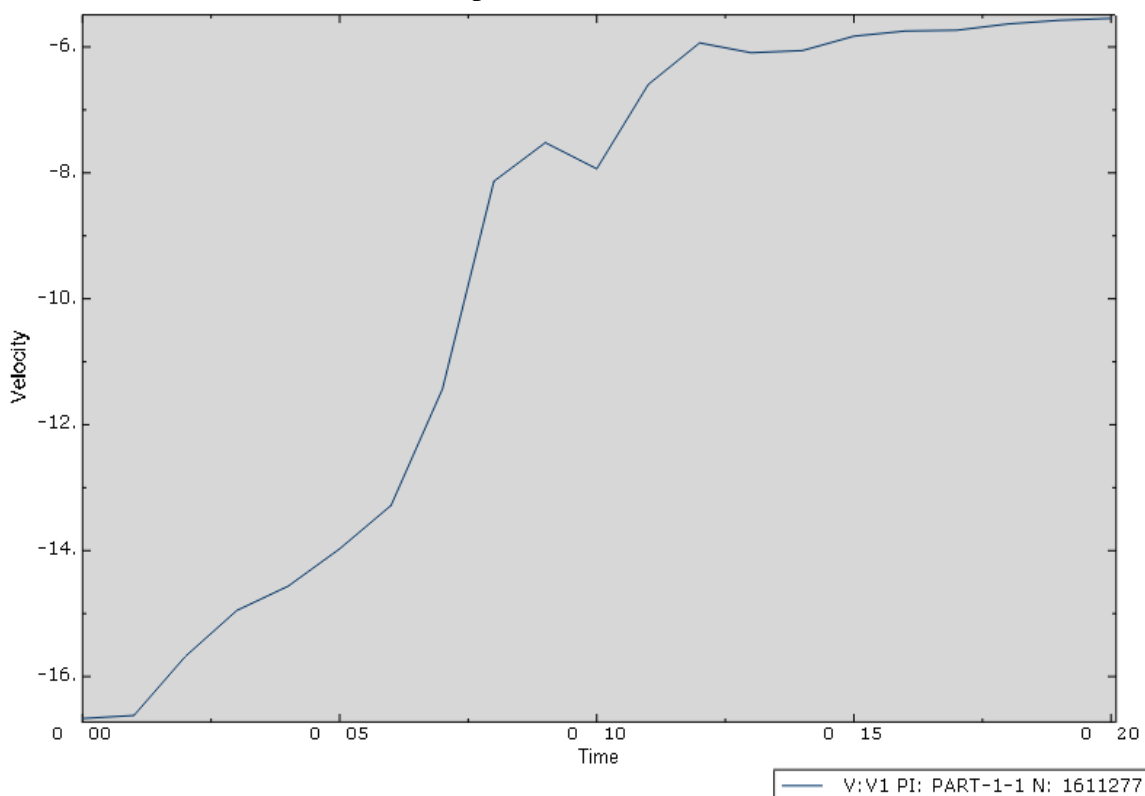


Figura 6_62

Progreso de aceleraciones del vehículo en dirección de avance

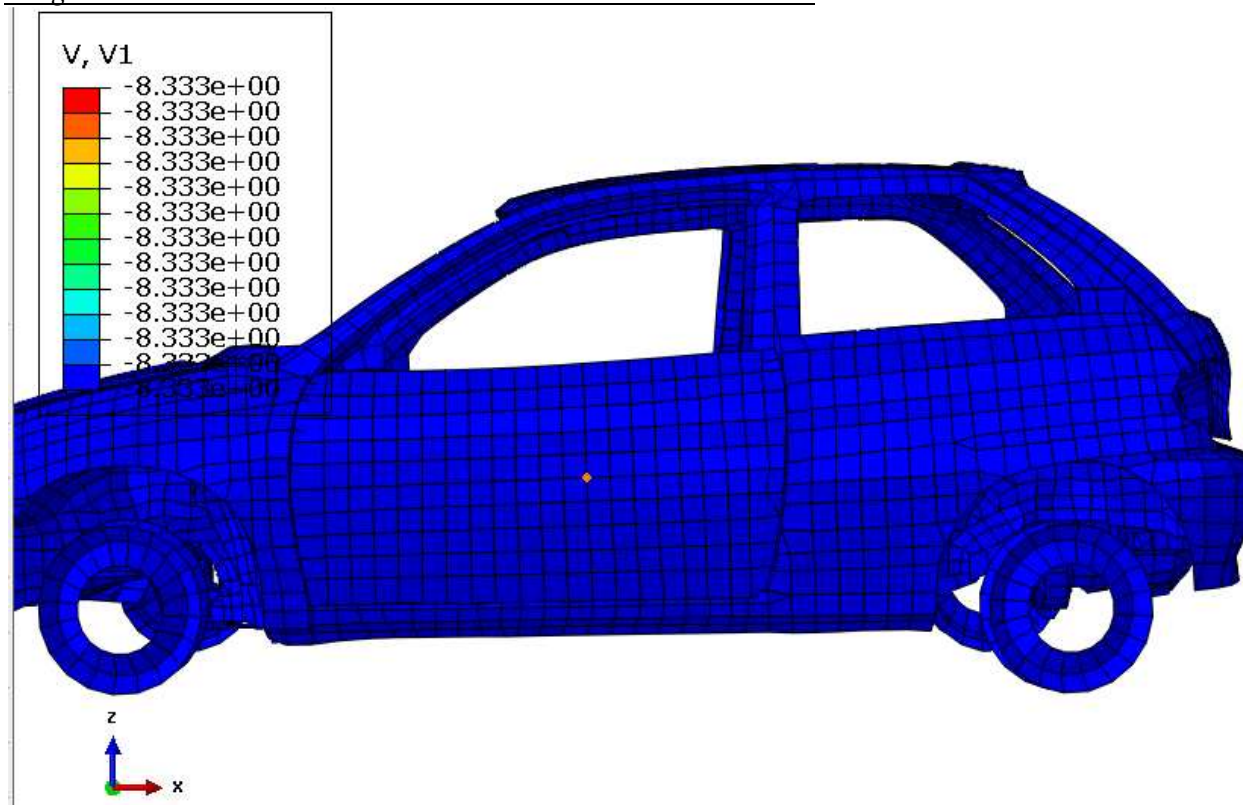


Figura 6_63

La aceleración máxima es de **-1500 m/s²** para el caso de 30km/h:

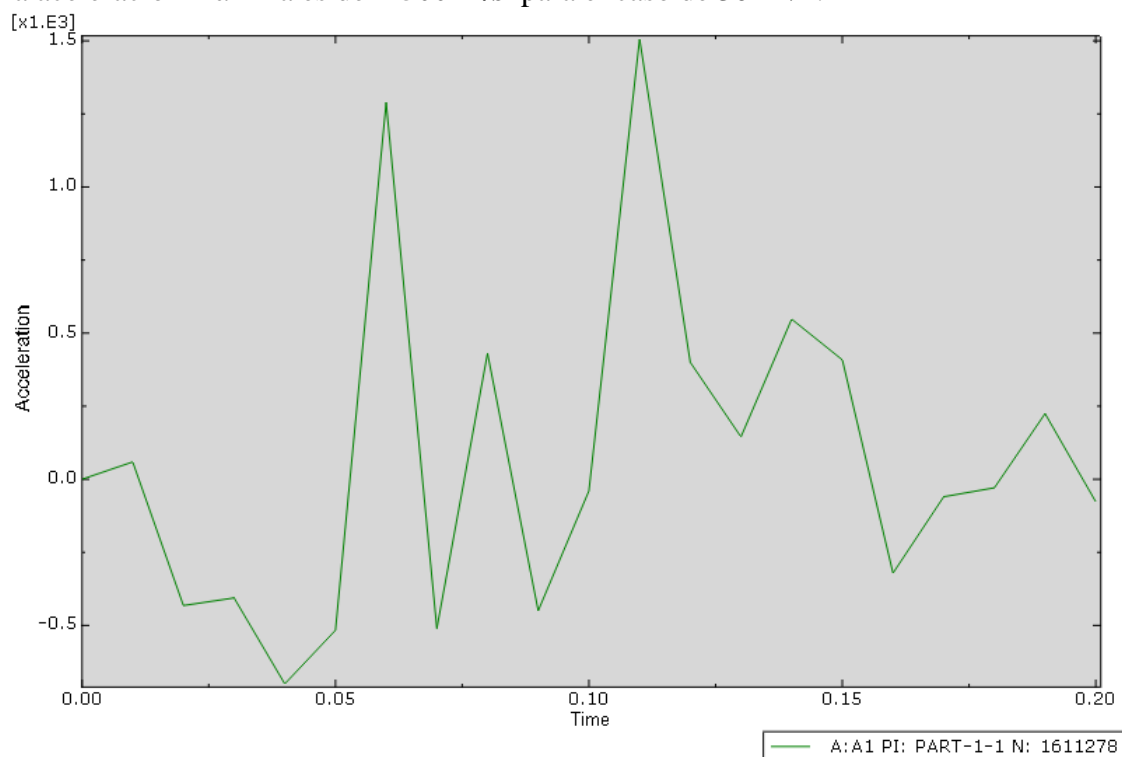


Figura 6_64

Para el caso de 45km/h, al aceleración máxima es de **-2000 m/s²**:

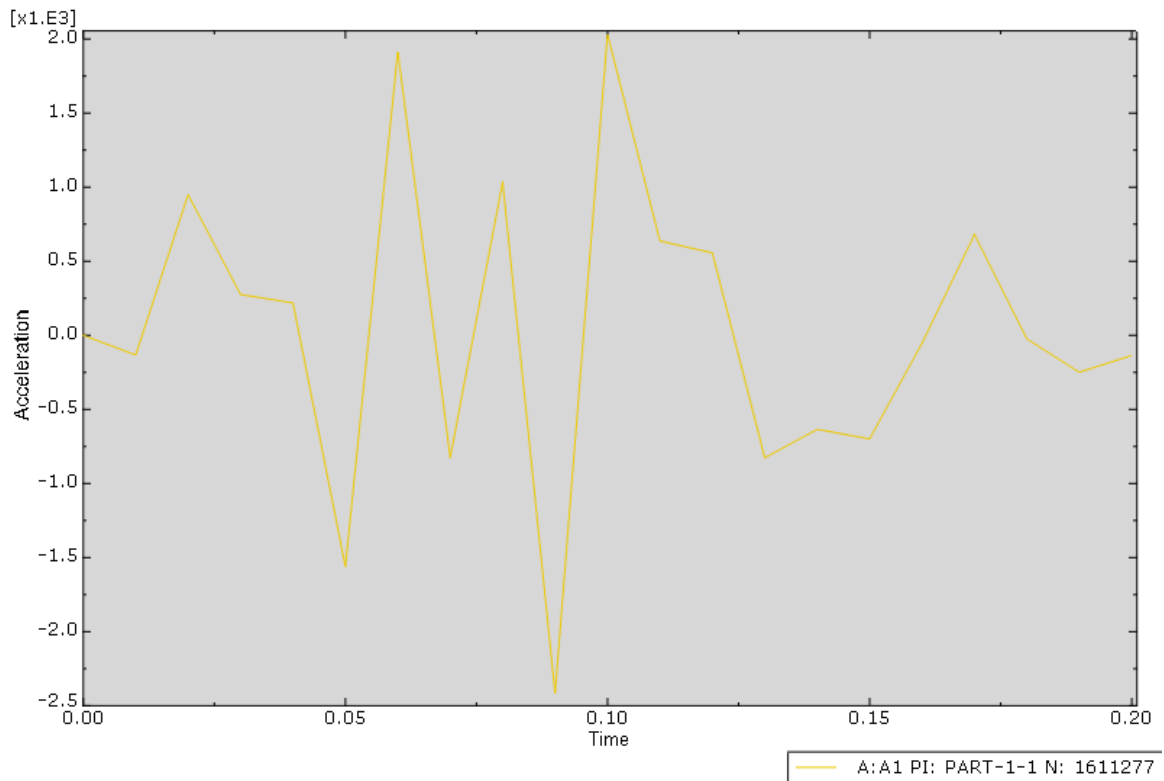


Figura 6_65

La aceleración máxima para el caso de 60km/h es de **-1750 m/s²**:

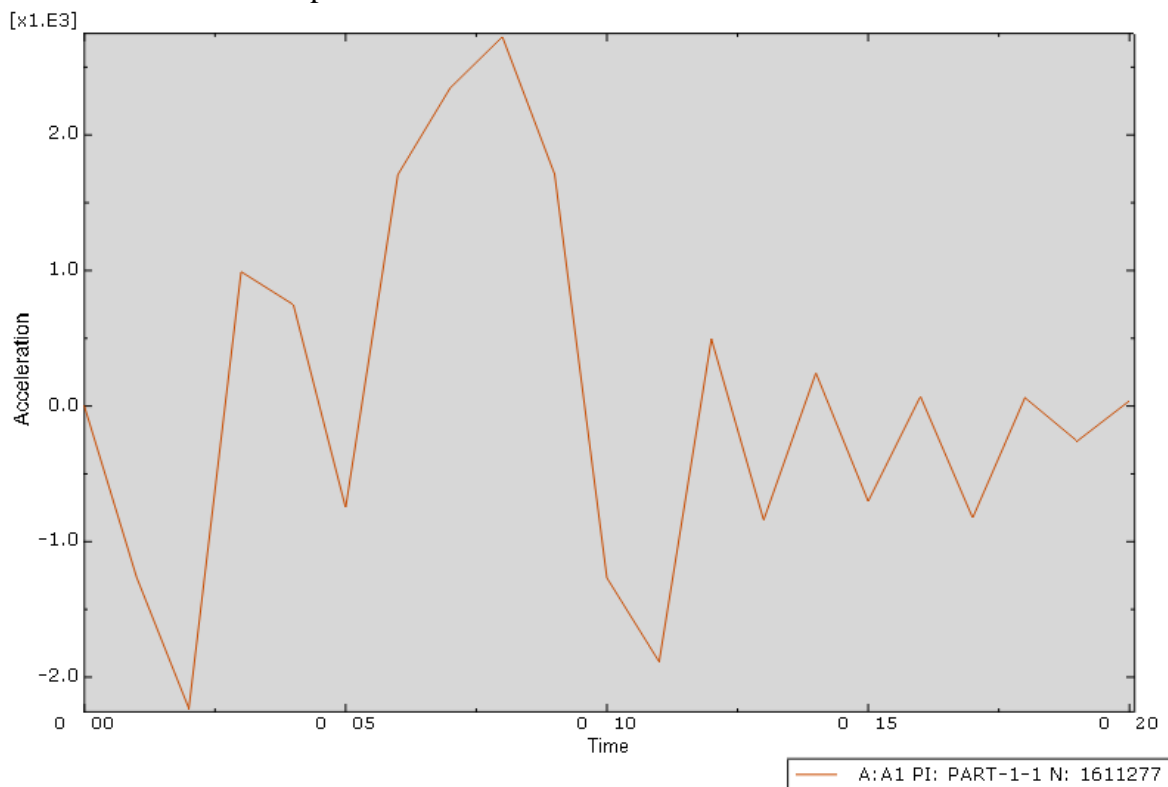


Figura 6_66

Progreso de intrusión del poste en el paragolpes del vehículo

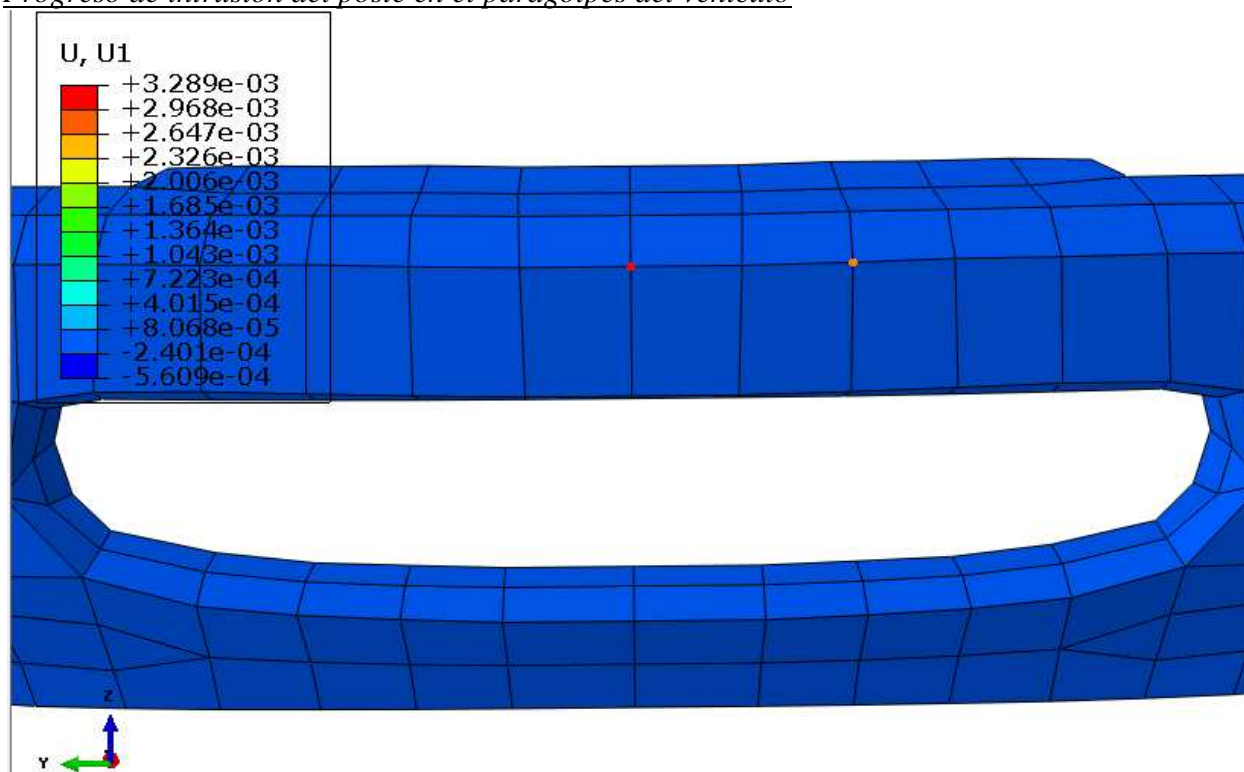


Figura 6_67

La intrusión máxima del poste es de **57,5 mm** para el caso de 30km/h:

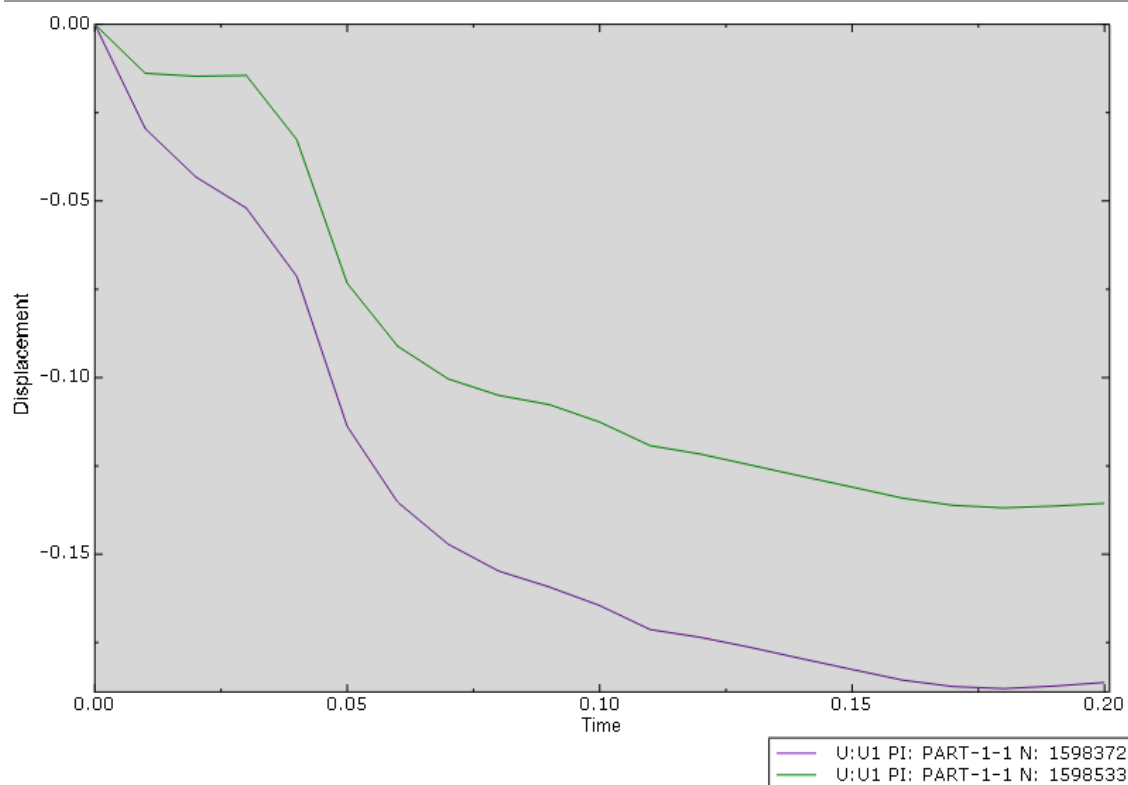


Figura 6_68

Para el caso de 45km/h, al intrusión máxima del poste es de **62,5mm**:

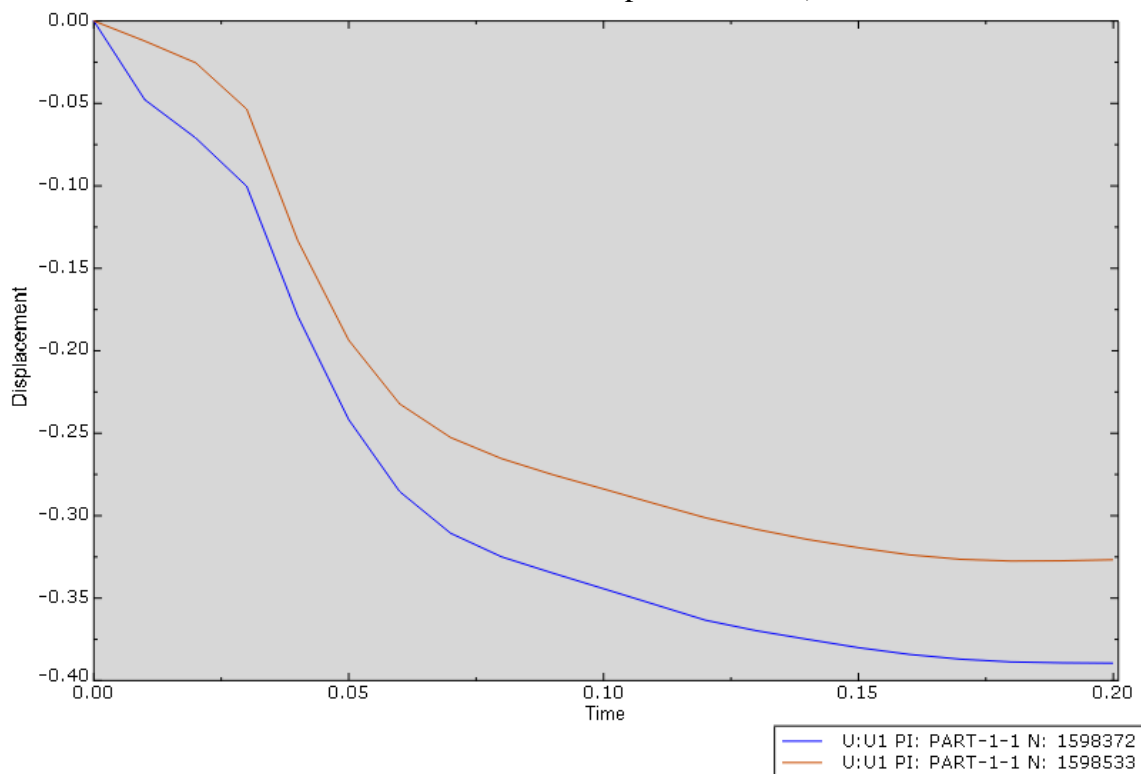


Figura 6_69

La intrusión máxima del poste es de **80 mm** para el caso de 60km/h:

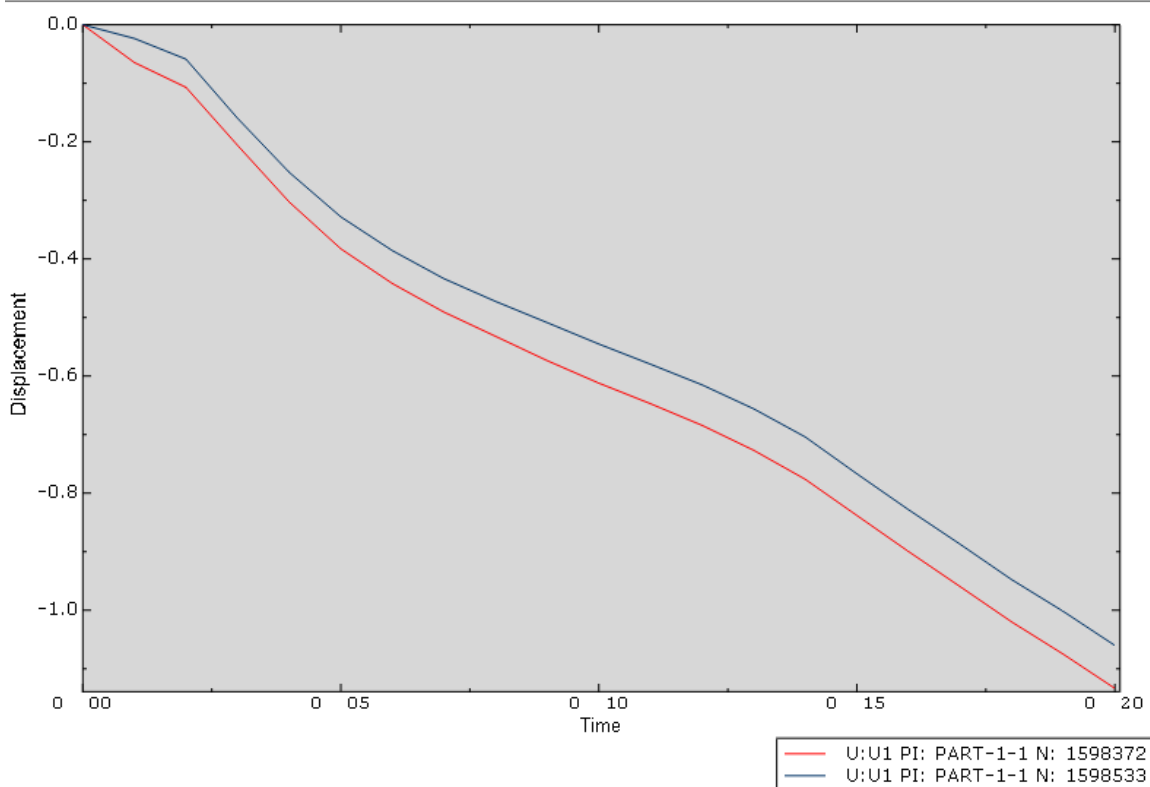


Figura 6_70

4.1.4.- Conclusiones

Semáforo

	30km/h	45km/h	60km/h
Tensión max (MPa)	337	407	473
Lugar	Base poste	Base poste	Base poste
Tiempo(s)	0,06	0,08	0,20
Desplazamiento max (mm)	760	1405	2373
Lugar	Arriba caja luces	Arriba caja luces	Arriba caja luces
Tiempo(s)	0,10 - 0,20	0,20	0,20
PEEQ max	$9,691 \cdot 10^{-2}$	$2,226 \cdot 10^{-1}$	$3,290 \cdot 10^{-1}$
Lugar	Base poste	Base poste	Base poste
Tiempo(s)	0,14 - 0,20	0,18 - 0,20	0,06 - 0,20
PLASTIFICACION	SI	SI	SI
ROTURA	NO	NO	NO
Cs	1,48	1,22	1,06

Tabla 6_1

La conclusión más evidente que se puede extraer para todos los casos que se han estudiado, es que el poste se deforma plásticamente de tal manera que quedaría inutilizable.

Creyéndose que el caso de 45 km/h sería el más peligroso para cualquier viandante, debido a que tras la debilidad estructural después del impacto, y antes de que se proceda estrictamente a su cambio, el semáforo podría caer sobre ellos.

No estimándose así para los otros dos casos, debido a que para 30km/h se deforma poco, y a 60m/h está lo suficientemente deformada como para considerar que ya ha caído, pero no ha sido arrancada.

Vehículo

	30km/h	45km/h	60km/h
Tensión max paragolpes (MPa)	338	355	366
Lugar	Centro	Centro	Centro
Tiempo(s)	0,08	0,08	0,08
Desplazamiento max paragolpes (mm)	134	252	938
Lugar	Centro	Centro	Centro-Derecha
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20
PEEQ max paragolpes	$9,056 \cdot 10^{-2}$	$1,229 \cdot 10^{-1}$	$1,410 \cdot 10^{-1}$
Lugar	Centro-Superior	Centro-Superior	Centro-Superior
Tiempo(s)	0,20	0,10 - 0,20	0,19 - 0,20
PLASTIFICACION paragolpes	SI	SI	SI

ROTURA paragolpes	NO	NO	NO
Cs paragolpes	1,77	1,69	1,64
Tensión max suelo (MPa)	298	373	359
Lugar	Esquina Posterior Izquierda	Centro-Delante	Centro-Delante
Tiempo(s)	0,20	0,09	0,15
PEEQ max suelo	$6,305 \cdot 10^{-2}$	$2,371 \cdot 10^{-1}$	$2,371 \cdot 10^{-1}$
Lugar	-----	-----	-----
Tiempo(s)	0,10 - 0,20	0,20	0,13 - 0,20
PLASTIFICACION suelo	SI	SI	SI
ROTURA suelo	NO	NO	NO
Cs suelo	2,01	1,61	1,67

Tabla 6_2

Como era de esperar tanto los resultados obtenidos del paragolpes y el suelo indican que a mayor velocidad, la tensión y la deformación que sufre el vehículo es mayor, y por lo tanto la severidad del accidente.

De aquí hace falta realizar una aclaración sobre el valor de la tensión máxima de Von Misses en el suelo para el choque a 60km/h, ya que aunque sea menor que para 45km/h, esto se puede considerar a causa de que la propagación del impacto aun no ha llegado hasta ese elemento en el tiempo de estudio del análisis.

Aunque el desplazamiento máximo del paragolpes para 45 km/h y 60 km/h es muy superior a lo que se puede pensar en un principio, habría que pensar que en ambos casos el vehículo sigue avanzando en menor o mayor cantidad por encima del poste del semáforo. Por consiguiente, estos datos no pueden usarse para hallar la distancia de intrusión del poste en el vehículo, que por otro lado se realiza con una de las gráficas.

Gráficas

	30km/h	45km/h	60km/h
Energía deformación total max (J)	2250	3300	4200
Tiempo(s)	0,09	0,08	0,07
Energía deformación semáforo max (J)	490	610	760
Tiempo(s)	0,06	0,06	0,07
Energía deformación coche max (J)	2050	3000	3450
Tiempo(s)	0,09	0,08	0,06

Tabla 6_3

	30km/h	45km/h	60km/h
Disipación viscosa total max (J)	4500	1850	2500
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20
Disipación viscosa semáforo max (J)	9	14	260
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20
Disipación viscosa coche max (J)	1875	1000	1400
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20

Tabla 6_4

	30km/h	45km/h	60km/h
Disipación plástica total max (J)	26000	60000	82500
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20
Disipación plástica semáforo max (J)	9200	27500	43750
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20
Disipación plástica coche max (J)	16800	32500	38750
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20

Tabla 6_5

De las **tablas 6_3, 6_4 y 6_5**, no pueden extraerse más que conclusiones evidentes, como sería que dado a que a mayor velocidad de impacto se produce una mayor deformación, entonces es normal que tanto la energía de deformación como la disipación viscosa y plástica vaya en aumento.

Aunque sí que habría que fijarse en lo extraño que resulta que en el caso de la disipación viscosa, dado que el semáforo y el vehículo componen el modelo entero, de que la suma de energías parciales de los dos elementos en el mismo instante de tiempo no se corresponda exactamente con el total de la energía.

Esto es más raro si se observa la **tabla 6_3**, dado que la suma de los valores parciales aun en instantes diferentes, pero cercanos, se acercan más al valor total de la energía, que en caso de la disipación viscosa.

Esta "anomalía" podría deberse a que conectores, y elementos muelles y amortiguadores contribuyeran en el cálculo de la disipación viscosa.

Por otro lado, de la observación de los trazos de las gráficas correspondientes a estas tablas (**Figuras 6_28 a 6_54**), debido a que se van produciendo varios picos en ellas en vez de ser continuas, se podría comentar sin error a dudas de que el choque no se produce completamente de una sola vez con toda la masa del vehículo, sino que según se van "añadiendo" elementos con sus respectivas masas individuales estas van contribuyendo al choque.

O visto al revés, también podría decirse que el vehículo no se deforma completamente de una sola vez, sino que lo hace "a trompicones" conforme las fuerzas producidas por el impacto van propagándose por sus diferentes elementos.

	30km/h	45km/h	60km/h
Velocidad de salida (m/s)	-1,0	0,0	6,5
Aceleración max vehículo (m/s²)	-1500	-2000	-1750
Tiempo(s)	0,11	0,10	0,08
Intrusión poste max (mm)	57,5	62,5	80
Tiempo(s)	0,20	0,20	0,20

Tabla 6_6

Con la velocidad de salida del vehículo, puede observarse como se produce perfectamente el choque para cada uno de los casos en el tiempo de estudio. Para 30km/h el vehículo tras el choque sale rebotada, mientras que para 60km/h el vehículo se frena en seco. Y para el último, el de 60km/h, aunque debiera pararse o salir rebotado como indican los informes, dado que el tiempo de análisis no es lo suficientemente amplio este aun se encuentra avanzando por encima del poste del semáforo.

De las gráficas de la **tabla 6_6**, puede concluirse lo mismo sobre como se produce el choque de forma discontinua, y no totalmente en un instante de tiempo exacto.

Habría que hacer mención especial a los valores de las aceleraciones, los cuales son desorbitados ya que llegan a alcanzar valores de -200g. La única causa que se ve plausible para tales valores es el hecho de que ABAQUS por algún motivo desconocido realice mal este cálculo.

Para darse cuenta de que estas aceleraciones no son posibles, sólo habría que hacer una pequeña comparación con las aceleraciones "aproximadas reales" que se obtendrían si se realiza de forma manual su cálculo con una simple operación, como es que la aceleración es igual a la velocidad final menos la velocidad inicial y todo ello partido para el tiempo en que transcurre la desaceleración.

	30km/h	45km/h	60km/h
Aceleración vehículo (m/s²)	-46,65	-62,5	-50,8

Tabla 6_7

Por su parte, que la aceleración a 60km/h sea inferior a la sufrida a 45km/h, se puede explicar teniendo en cuenta, que como ya se dijo antes, para un mejor análisis de este caso habría que aumentar el tiempo a estudio. Así, se prevería, que en pocas centésimas de segundo más se produjera la parada total del vehículo, lo que contribuiría a un aumento elevado de la aceleración.

Por último, que alguno de los valores de la intrusión del poste en el paragolpes superen los 2/3 del diámetro exterior del poste, caso de 60km/h, podrían considerarse lo suficientemente alto como para pensar que se ha podido llegar a invadir el habitáculo del bloque motor. Como, por experiencias reales se sabe que ocurre en estos accidentes.

4.2.- PRFV

4.2.1.- Semáforo

Tensiones de Von Mises

La tensión máxima de Von Mises a 30 km/h se produce en la base del poste en el FRAME 6 (0,06 s), con un valor de **345 MPa**:

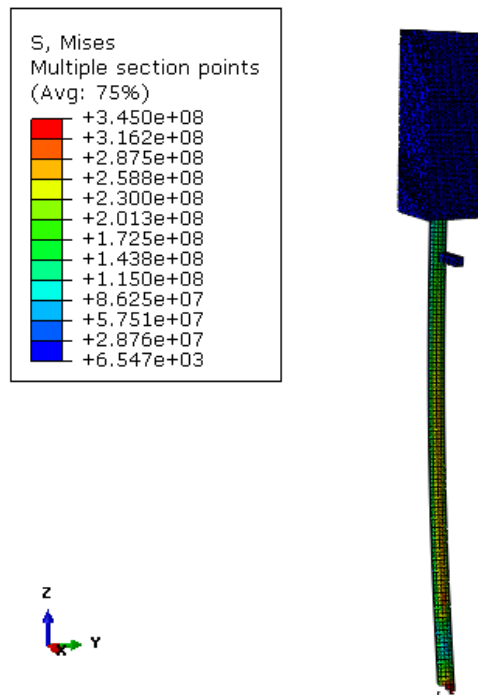


Figura 6_71

A su vez para el caso a 45km/h, es el FRAME 4 (0,04s), con un valor de **345 MPa**, se produce la tensión máxima en el mismo lugar.

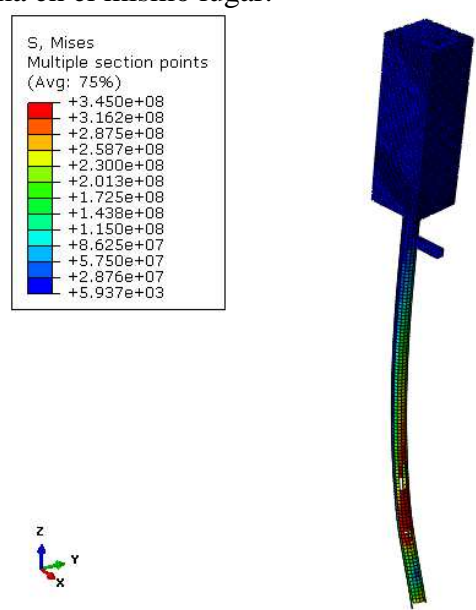


Figura 6_72

En el FRAME 3 (0,03s), con un valor de **345 MPa**, se produce la tensión máxima en la misma localización para el ensayo a 60km/h.

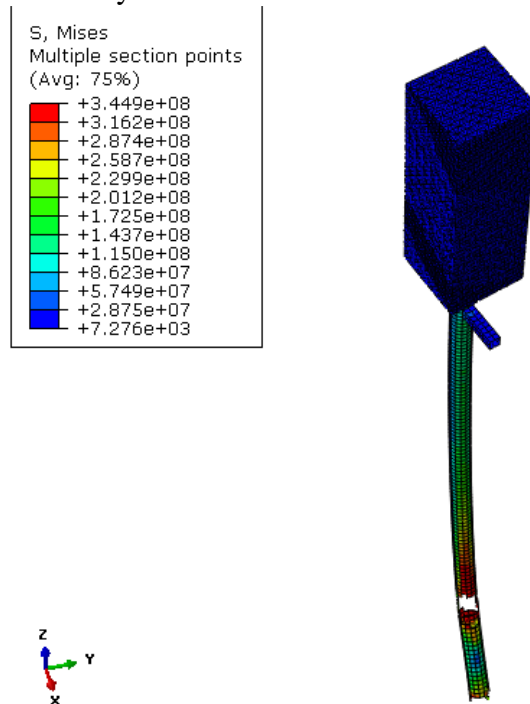


Figura 6_73

Desplazamientos

Para el caso a 30kmh/h, desde el FRAME 6 (0,06s), con un valor de **243 mm**, se produce el desplazamiento máximo en el centro del poste.

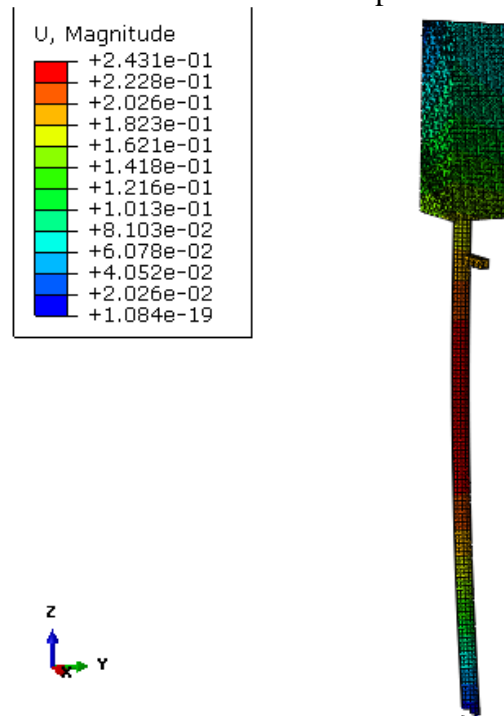


Figura 6_74

El desplazamiento máximo a 45km/h se produce en el FRAME 4 (0,04 s), con un valor de **243 mm** en la misma localización

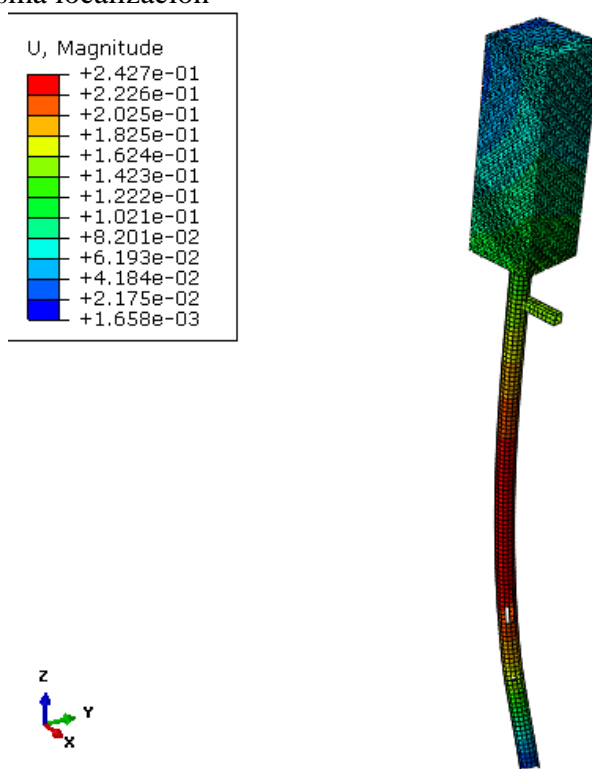


Figura 6_75

En el FRAME 3 (0,03s), con un valor de **238 mm**, se produce el desplazamiento máximo en la misma localización para el ensayo a 60km/h

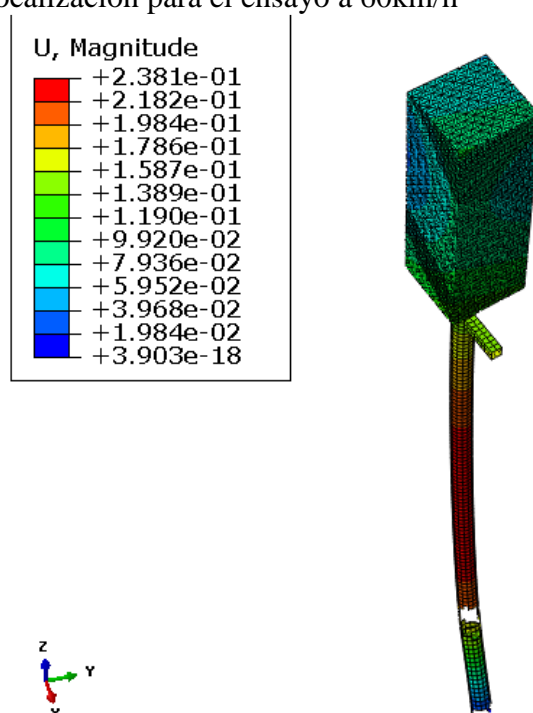


Figura 6_76

4.2.2.- Vehículo

Paragolpes (Tensiones de Von Misses)

La tensión máxima de Von Misses a 30 km/h se produce en el FRAME 6 (0,06s), con un valor de **325 MPa** en el centro del paragolpes

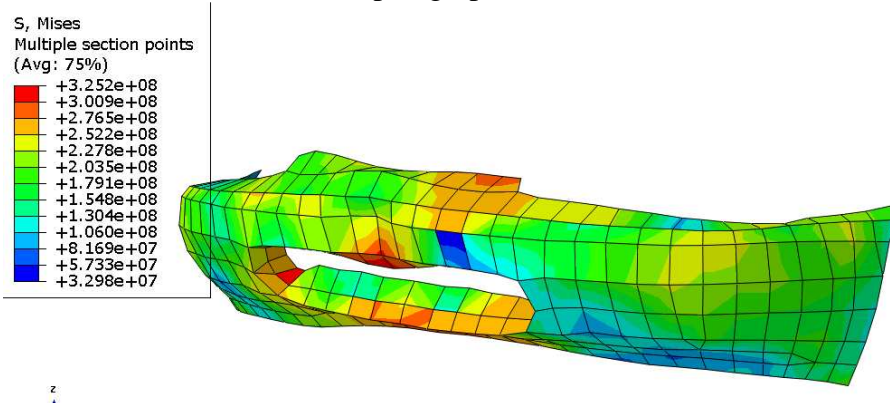


Figura 6_77

Para el caso a 45km/h, en el FRAME 3 (0,03s), con un valor de **323 MPa**, se produce la tensión máxima en el mismo lugar.

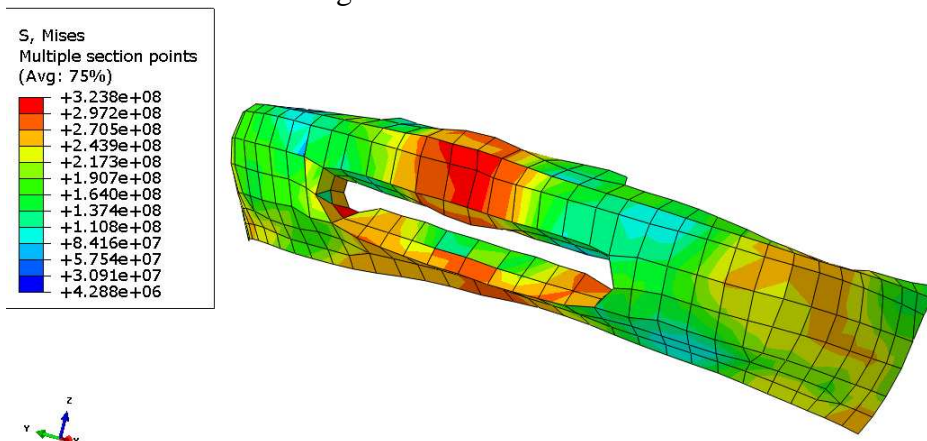


Figura 6_78

En el FRAME 2 (0,02s), con un valor de **343 MPa**, se produce la tensión máxima de Von Misses en la misma localización para el caso a 60km/h.

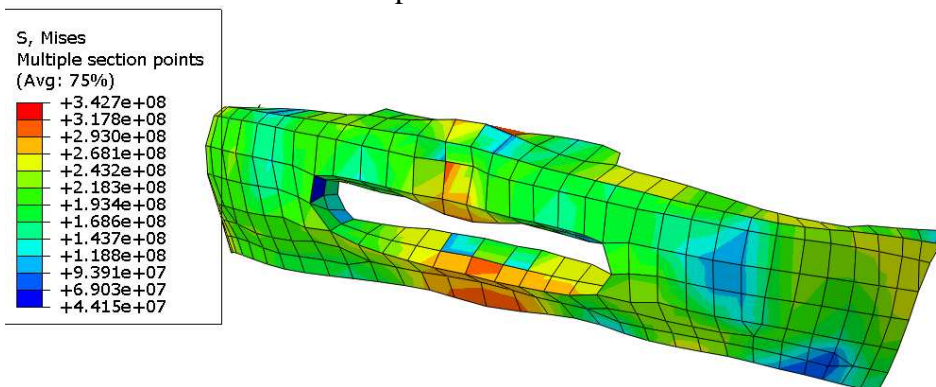


Figura 6_79

Paragolpes (Desplazamientos en dirección de avance)

Para el caso a 30kmh/h, en el FRAME 6 (0,06s), con un valor de **125 mm**, se produce el desplazamiento máximo en el centro del paragolpes

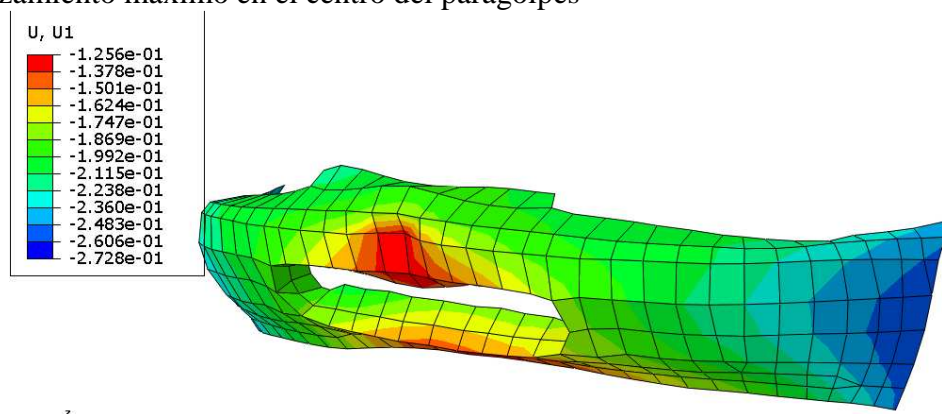


Figura 6_80

En el FRAME 4 (0,04s), con un valor de **172 mm**, se produce el desplazamiento máximo en el mismo lugar para el caso a 45km/h.

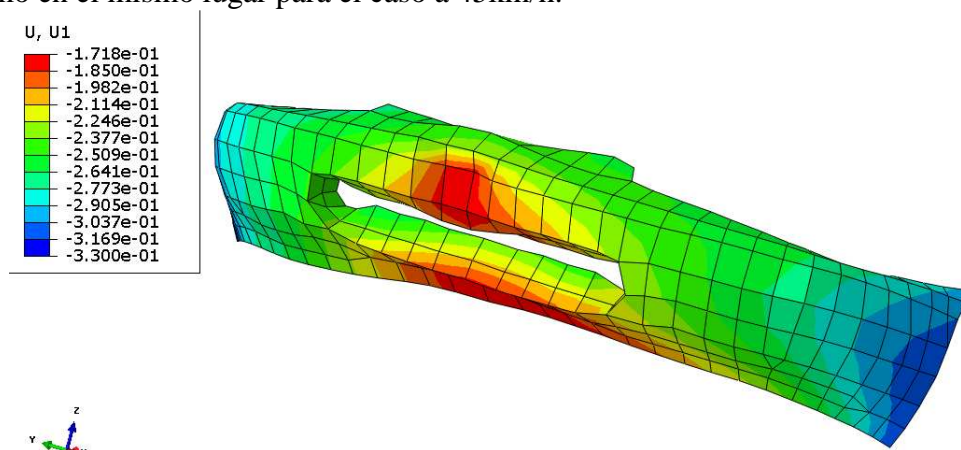


Figura 6_81

El desplazamiento máximo a 60 km/h se produce en la misma posición en el FRAME 3 (0,03s), con un valor de **184 mm**.

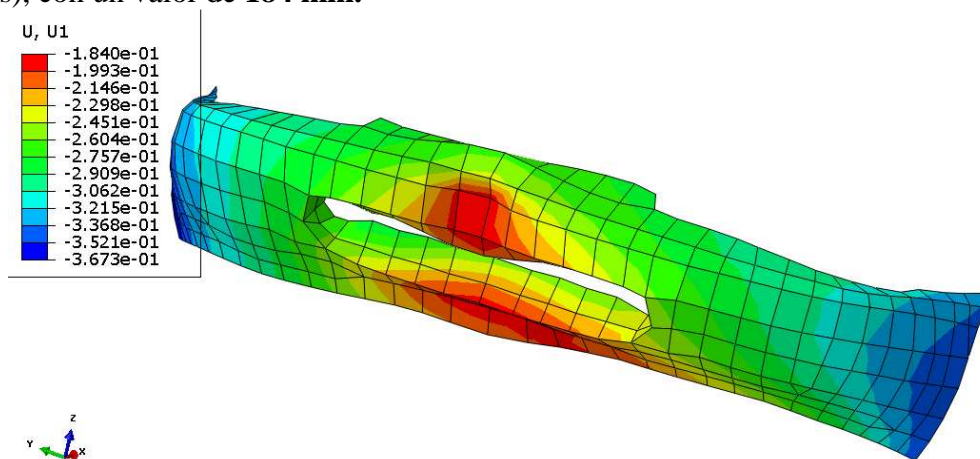


Figura 6_82

Paragolpes (PEEQ)

En el FRAME 6 (0,06s), con un valor de $6,986 \cdot 10^{-2}$, se produce el PEEQ máximo en la parte superior del centro del paragolpes para el caso a 30km/h.

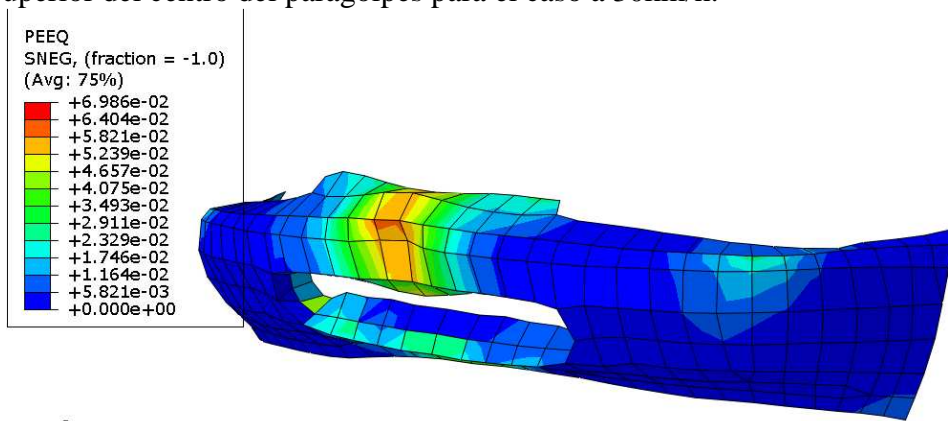


Figura 6_83

El PEEQ máximo a 45 km/h se produce en el FRAME 4 (0,04s), con un valor de $9,071 \cdot 10^{-2}$.

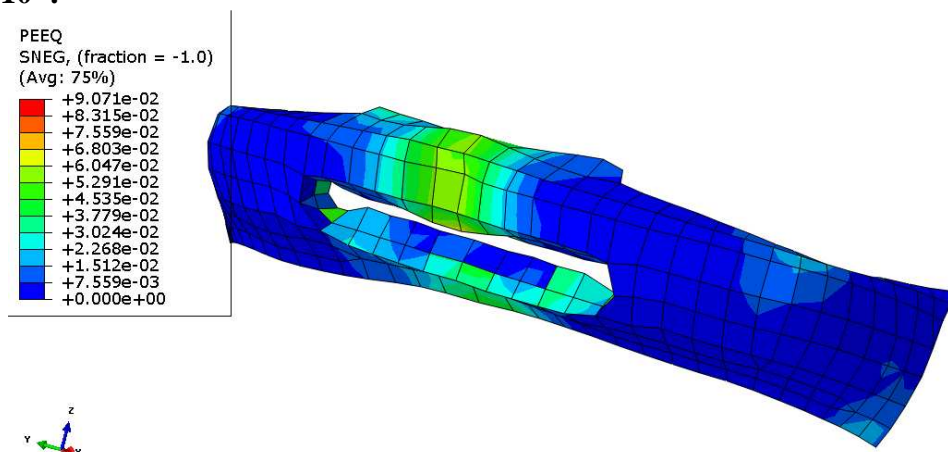


Figura 6_84

Para el caso a 60kmh/h, en el FRAME 3 (0,03s), con un valor de $1,057 \cdot 10^{-1}$, se produce el PEEQ máximo.

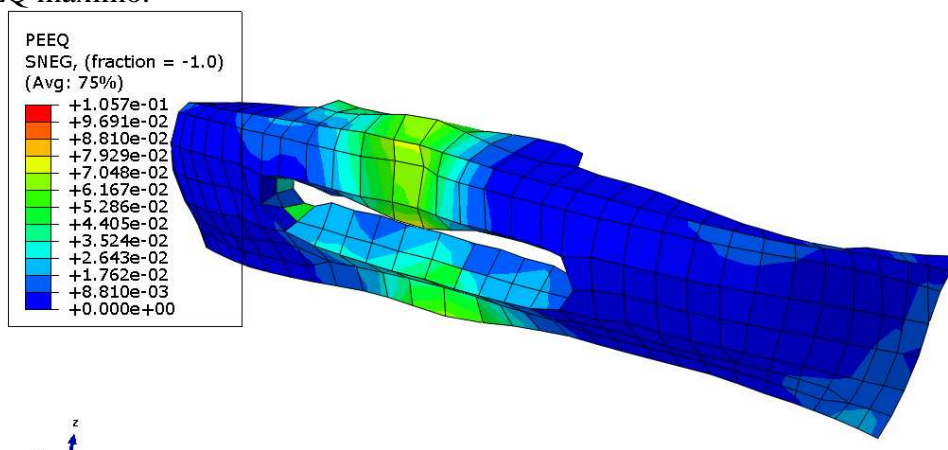


Figura 6_85

Suelo (Tensiones de Von Misses)

La tensión máxima de Von Misses a 30 km/h se produce en la parte delantera de la izquierda del suelo en FRAME 2 (0,02s), con un valor de **276 MPa**.

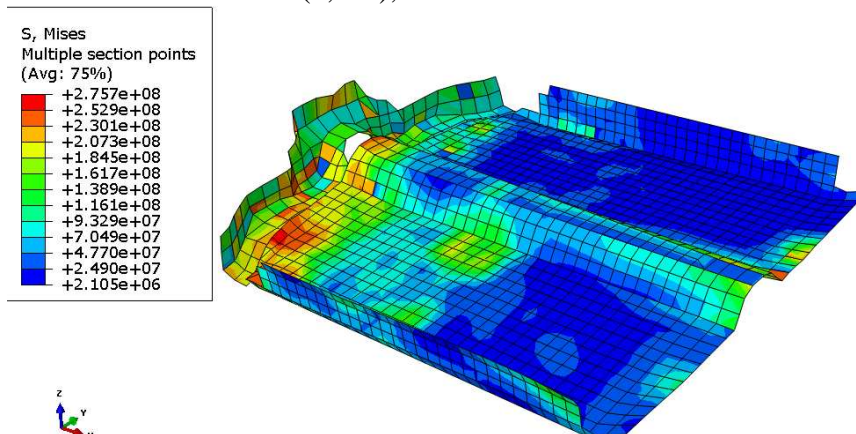


Figura 6_86

Para el caso a 45kmh/h, en el FRAME 2 (0,02s), con un valor de **283 MPa**, se produce la tensión máxima en la misma zona.

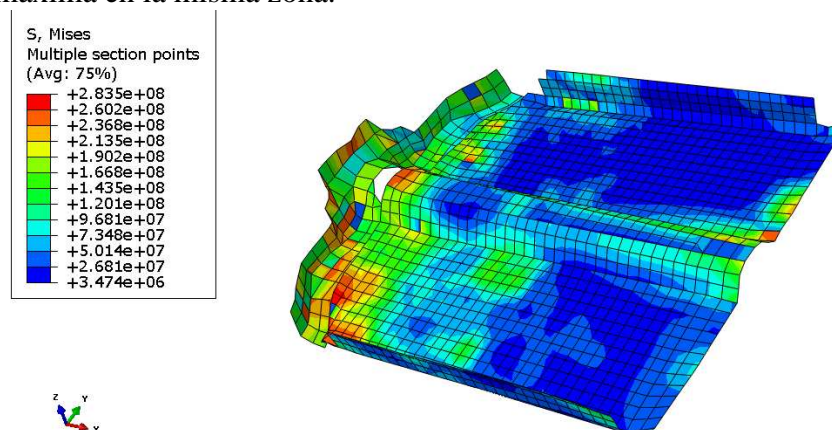


Figura 6_87

En el FRAME 3 (0,03s) a 60 km/h se produce en el mismo lugar, con un valor de **284 MPa** la tensión máxima

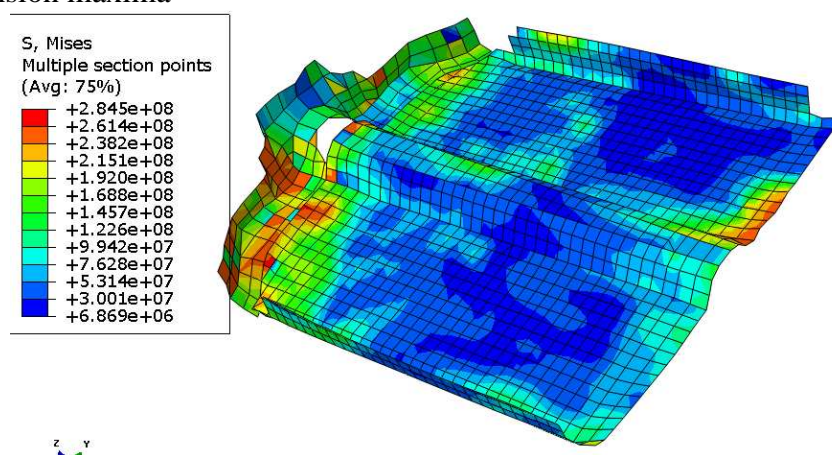


Figura 6_88

Suelo (PEEQ)

Para el caso a 30km/h, en el FRAME 5 al 6 (0,05s - 0,06s), con un valor de $3,160 \cdot 10^{-2}$, en la parte delantera del lateral izquierdo del suelo se produce la PEEQ máxima.

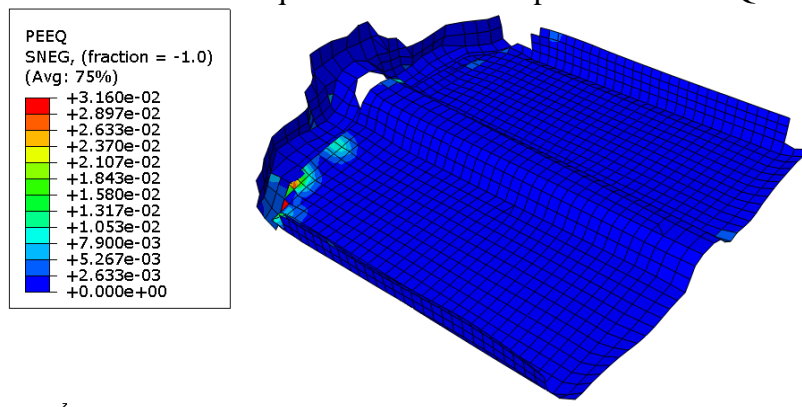


Figura 6_89

En el FRAME 4 (0,04s) a 45 km/h se produce con un valor de $2,671 \cdot 10^{-2}$ la PEEQ máxima en la misma zona.

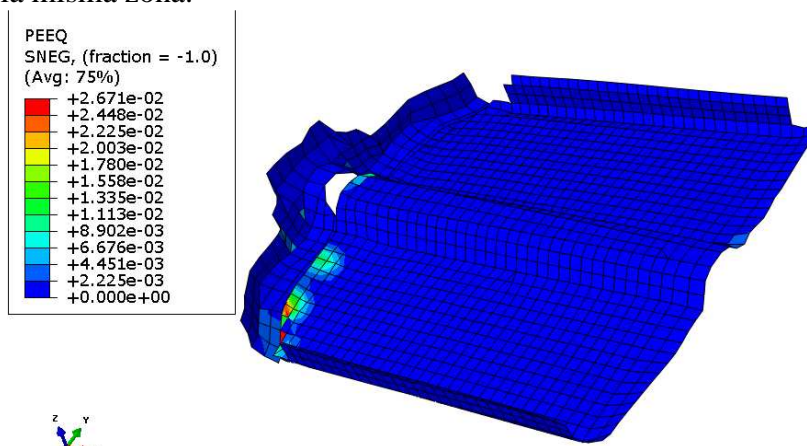


Figura 6_90

La PEEQ máxima a 60 km/h se produce en el mismo lugar en el FRAME 3 (0,03s), con un valor de $2,763 \cdot 10^{-1}$.

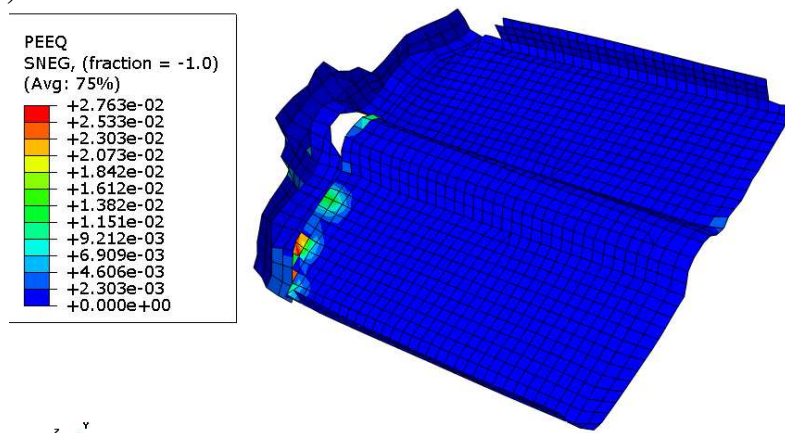


Figura 6_91

Vehículo

Para el caso a 30kmh/h, tras el impacto el coche se deformaría como sigue:

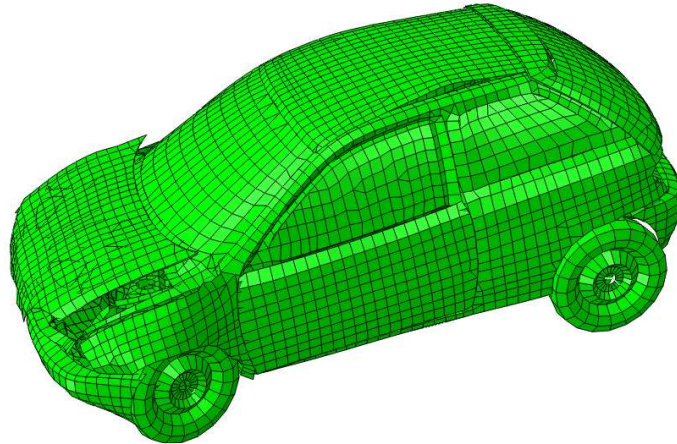


Figura 6_92

La deformación que habría sufrido el vehículo tras el choque para el caso a 45km/h sería la siguiente:

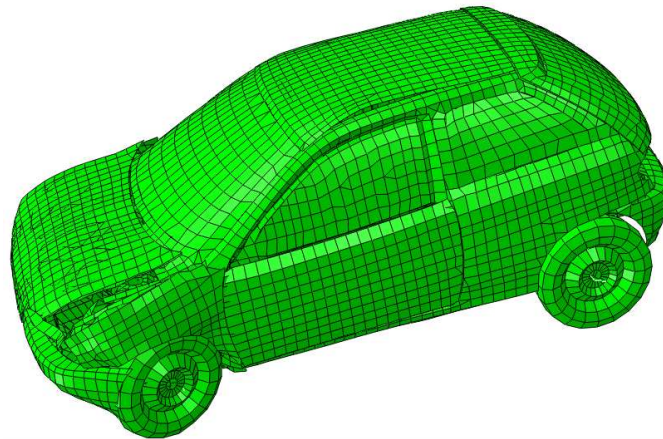


Figura 6_93

Tras el choque, el vehículo se habría deformado de la siguiente manera para el caso de 60km/h:

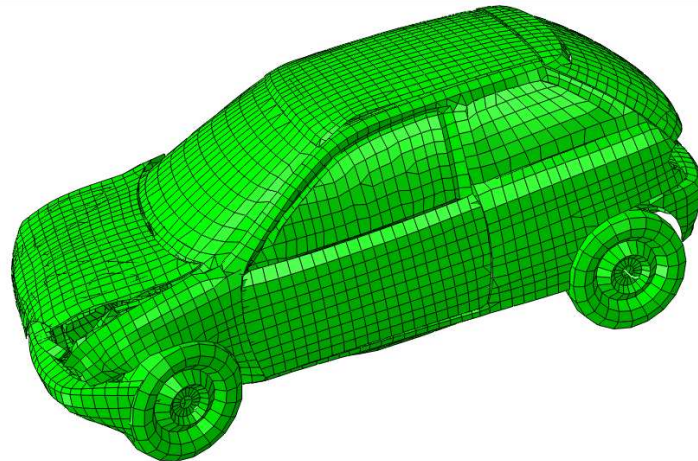


Figura 6_94

4.2.3.- Gráficas

Energía de deformación

El valor máximo de la energía de deformación para el modelo entero es **4250 J** para el caso de 30km/h. Y de **2750 J** para el semáforo y **1550 J** para el coche.

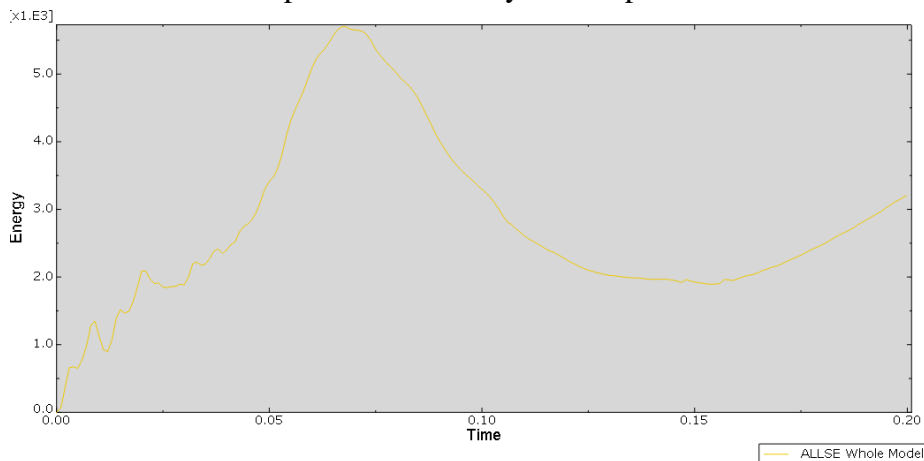


Figura 6_95

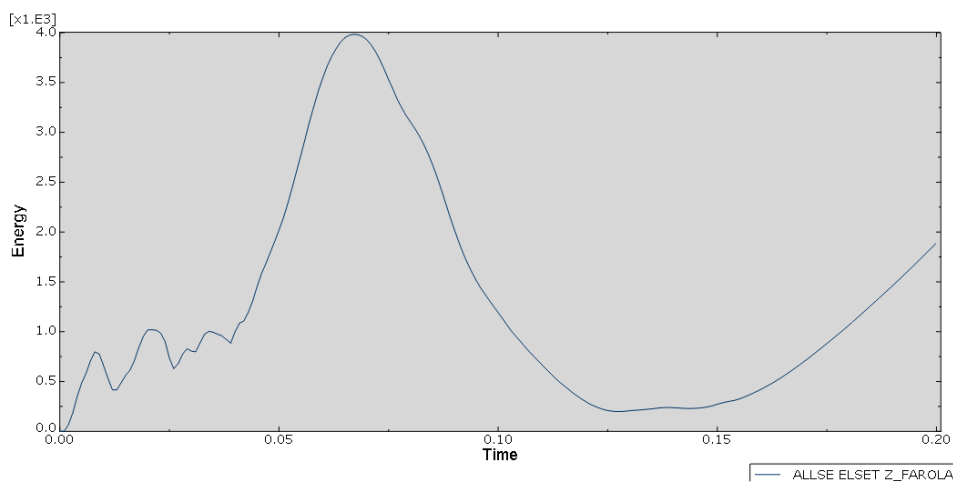


Figura 6_96

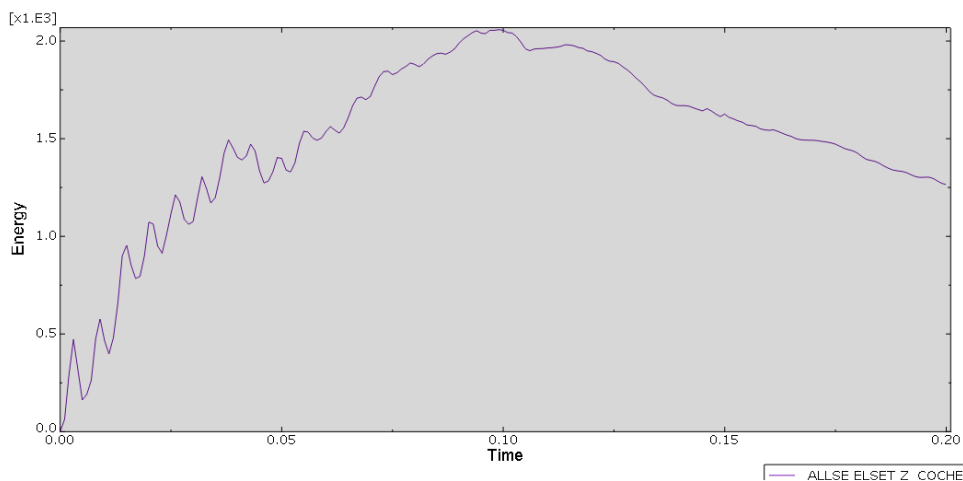


Figura 6_97

Para el caso de 45km/h, el valor máximo de la energía de deformación para el modelo entero es **4500 J**. Y de **3250 J** para el semáforo y **1500 J** para el coche.

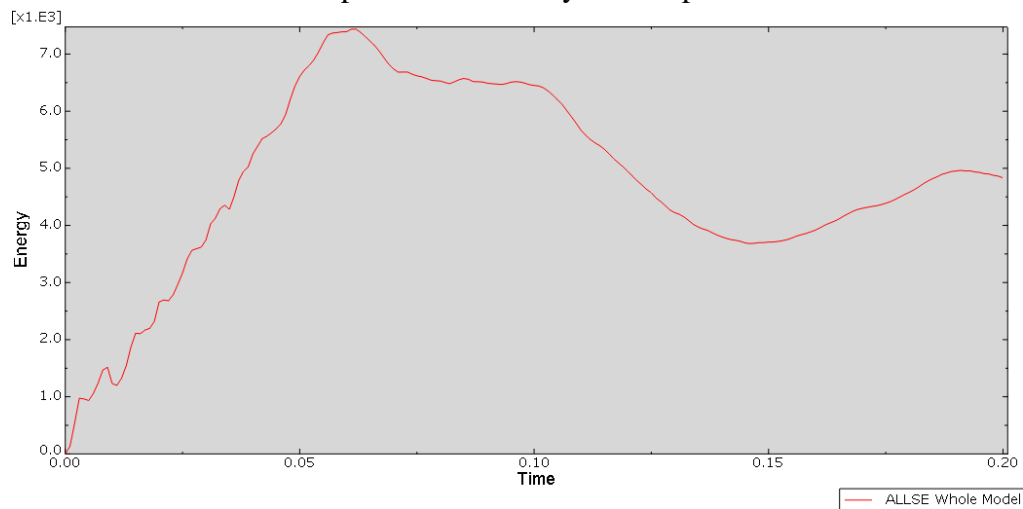


Figura 6_98

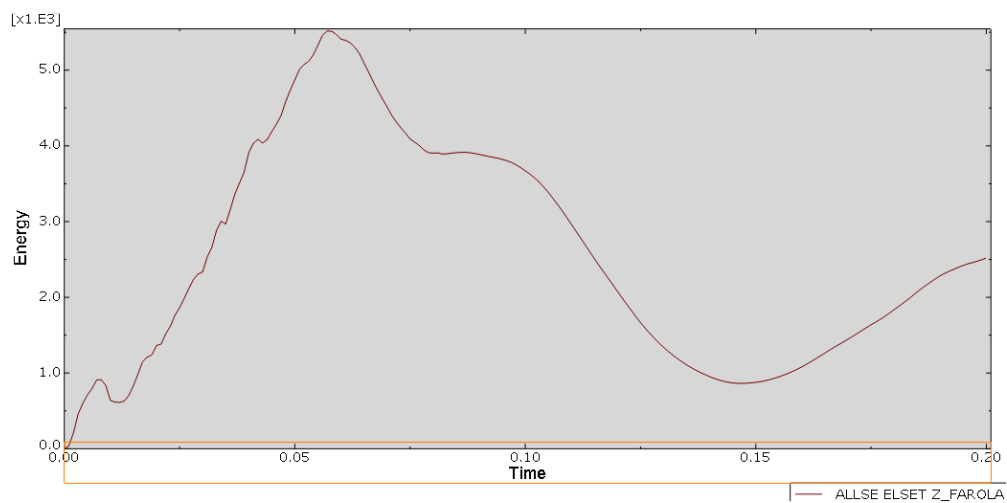


Figura 6_99

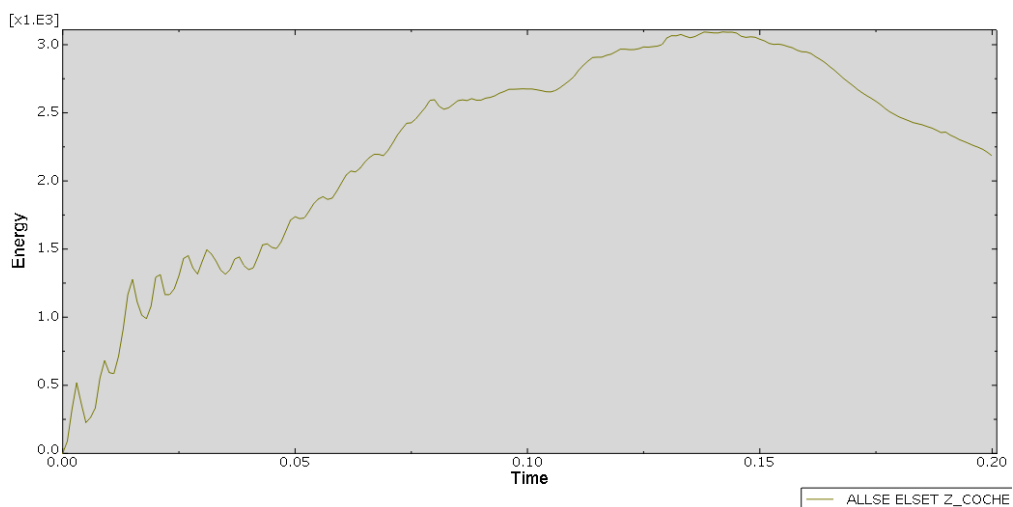


Figura 6_100

Para el caso de 60km/h, el valor máximo de la energía de deformación para el modelo entero es **5400 J**. Y de **3800 J** para el semáforo y **1600 J** para el coche.

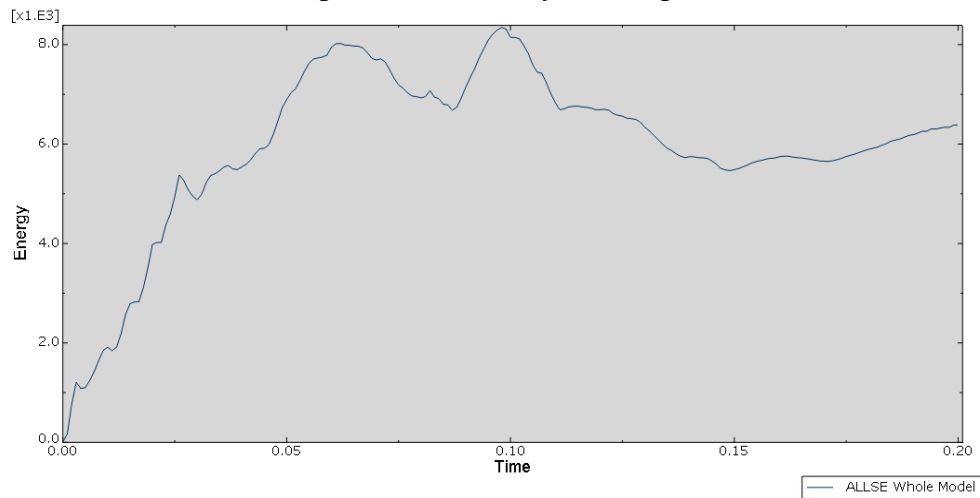


Figura 6_101

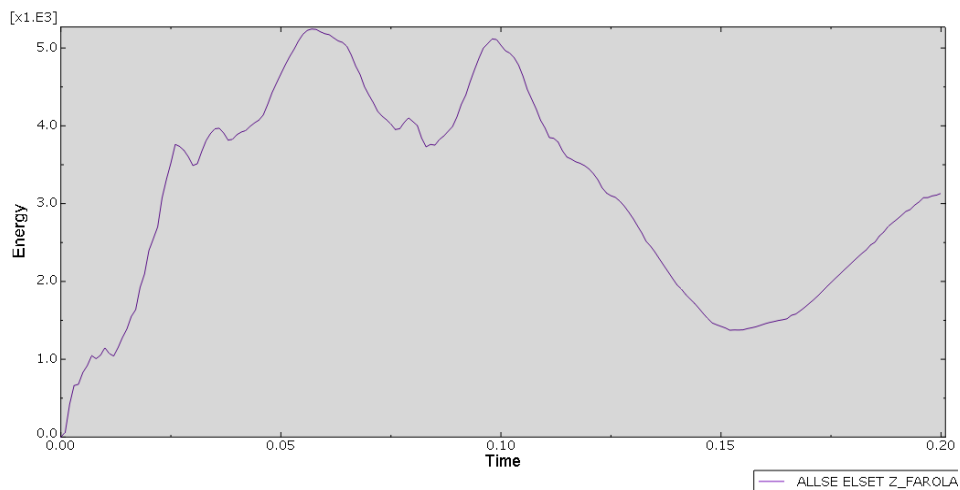


Figura 6_102

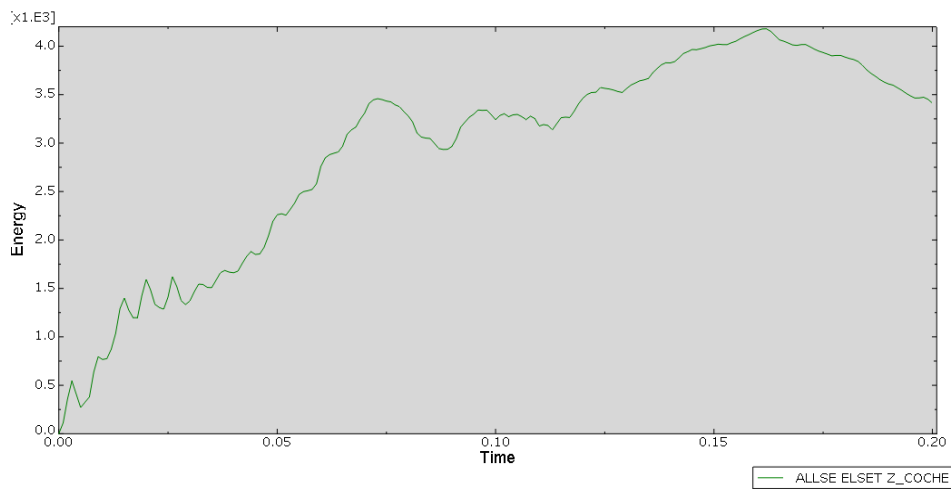


Figura 6_103

Disipación viscosa

El valor máximo de la energía disipada viscosamente para el modelo entero es **225 J** para el caso de 30km/h. Y de **4 J** para el semáforo y **150 J** para el coche.

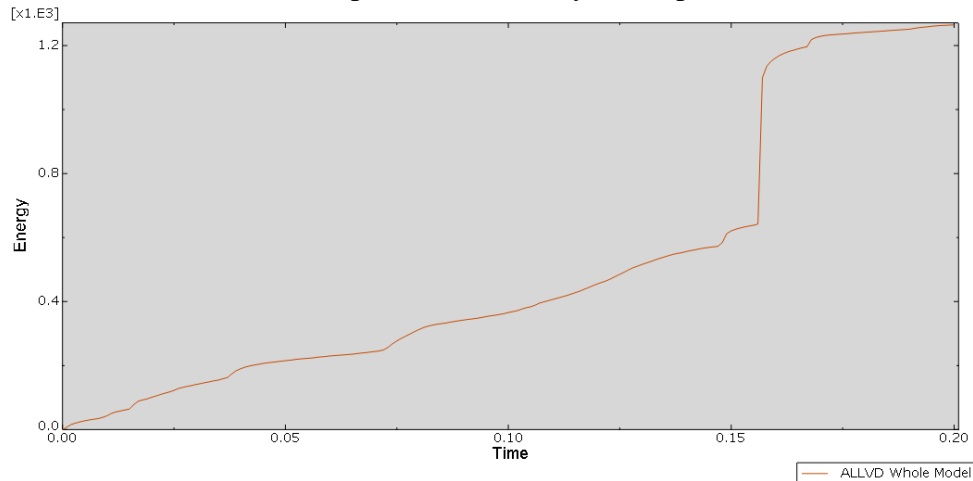


Figura 6_104

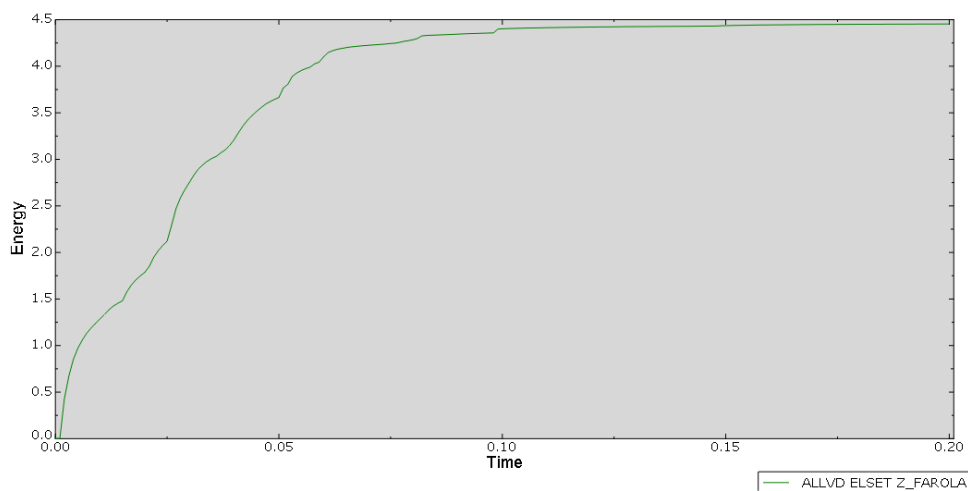


Figura 6_105

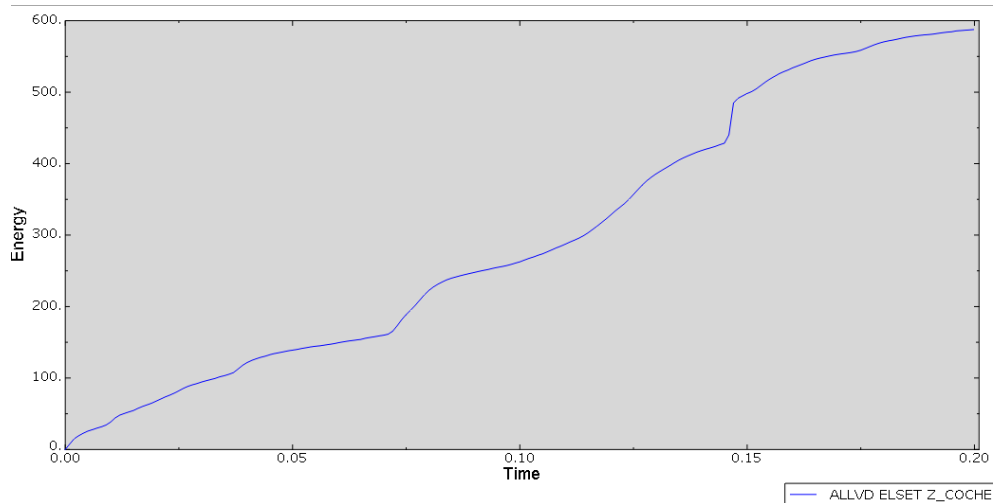


Figura 6_106

Para el caso de 45km/h, el valor máximo de la energía disipada viscosamente para el modelo entero es **300 J**. Y de **9 J** para el semáforo y **190 J** para el coche.

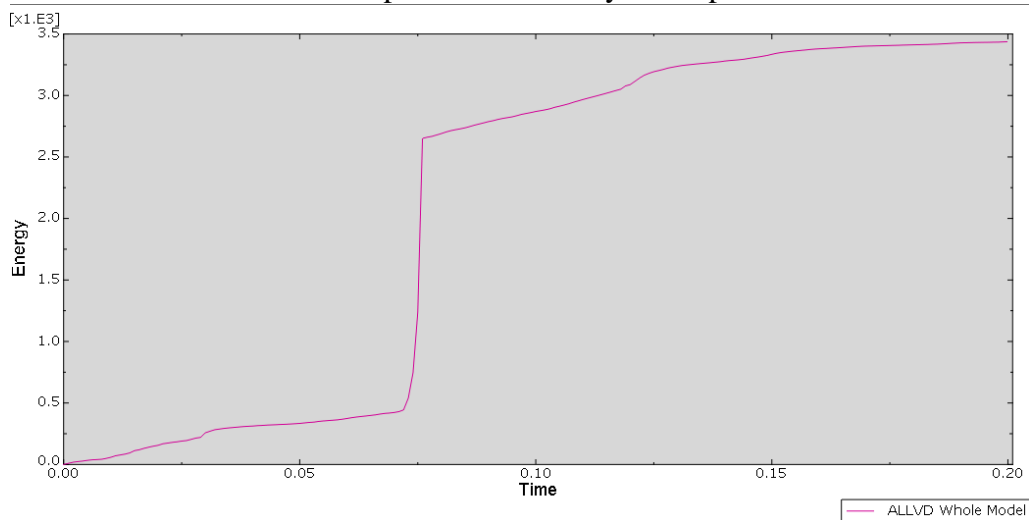


Figura 6_107

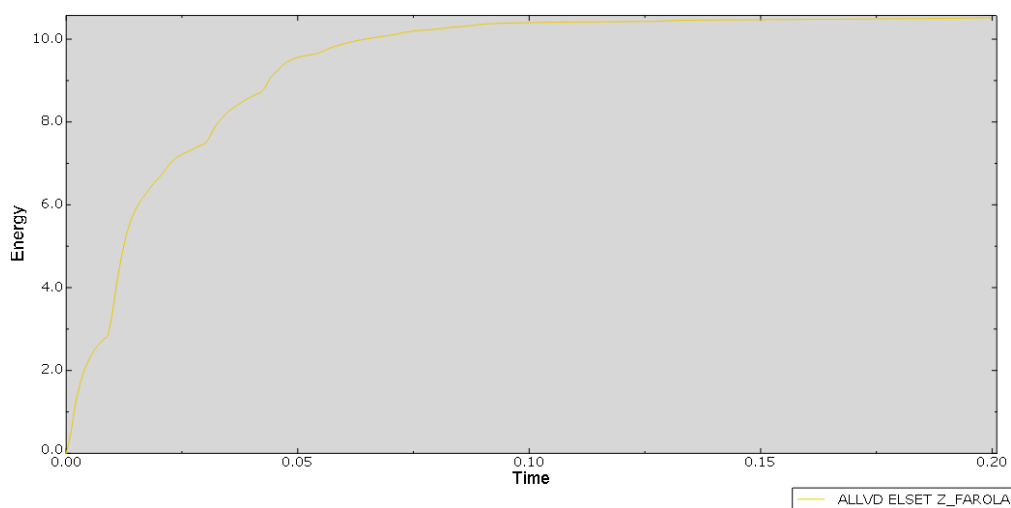


Figura 6_108

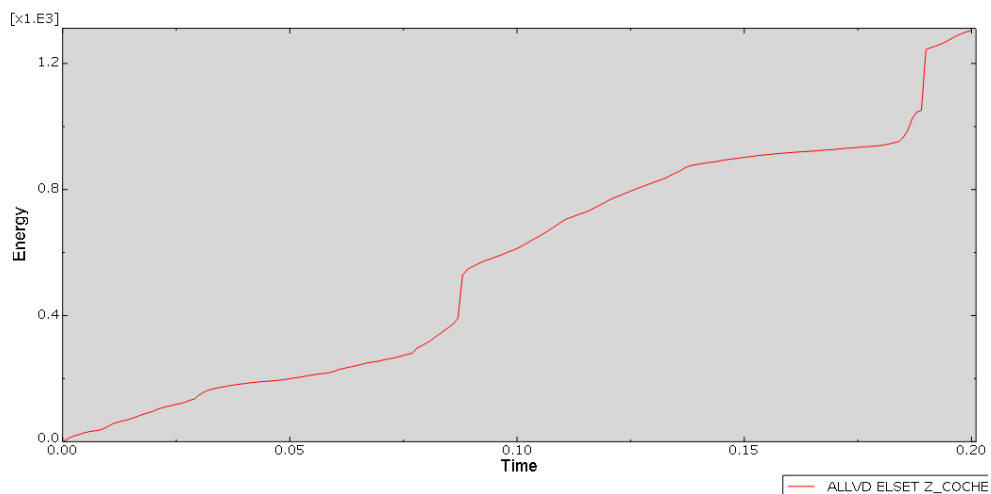


Figura 6_109

Para el caso de 60km/h, el valor máximo de la energía disipada viscosamente para el modelo entero es **400 J**. Y de **17 J** para el semáforo y **200 J** para el coche.

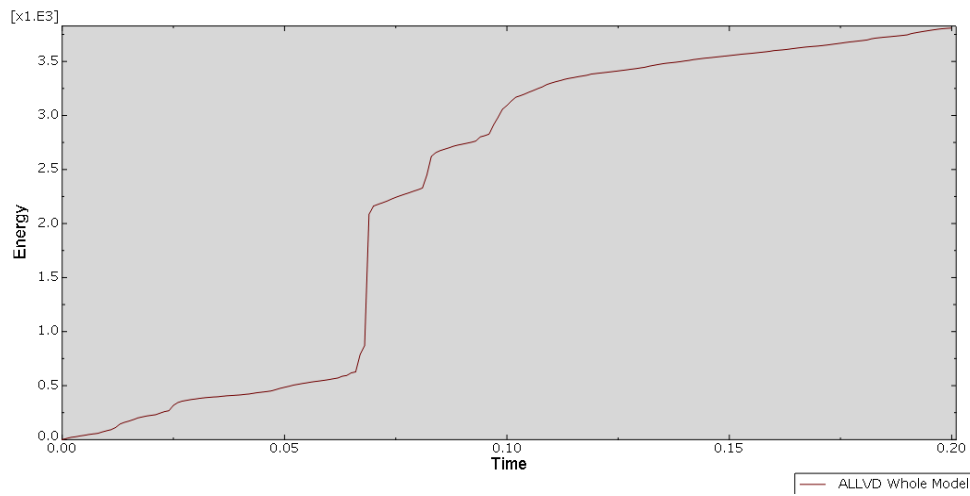


Figura 6_110

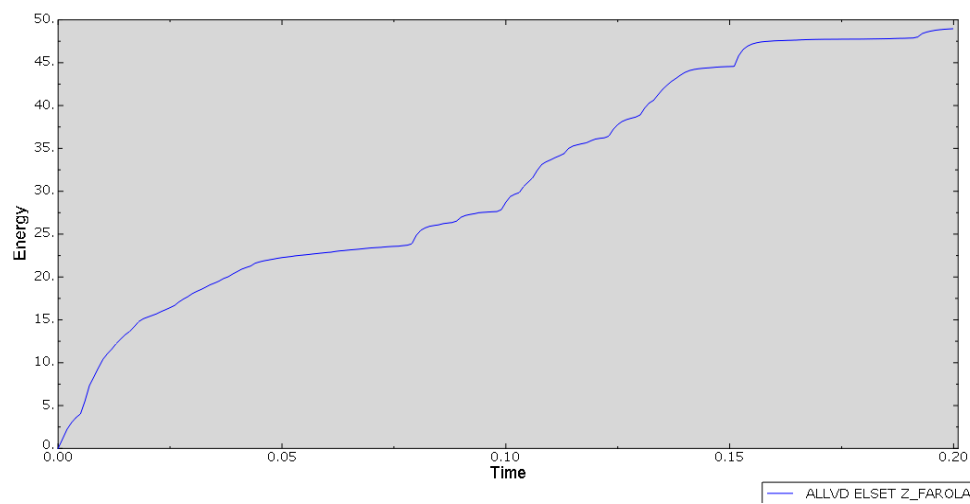


Figura 6_111

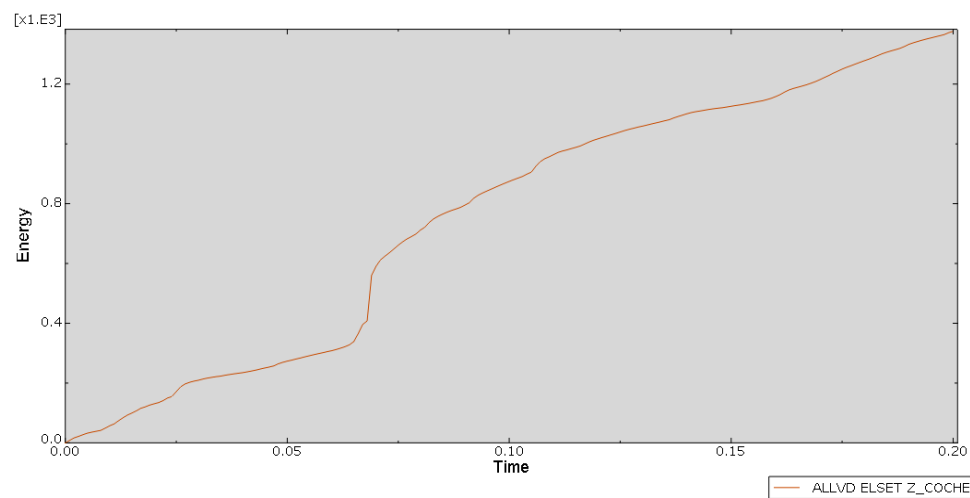


Figura 6_112

Disipación plástica

Para el caso de 30km/h, el valor máximo de la energía disipada plásticamente para el modelo entero es **14000 J**. Y de **8000 J** para el coche.

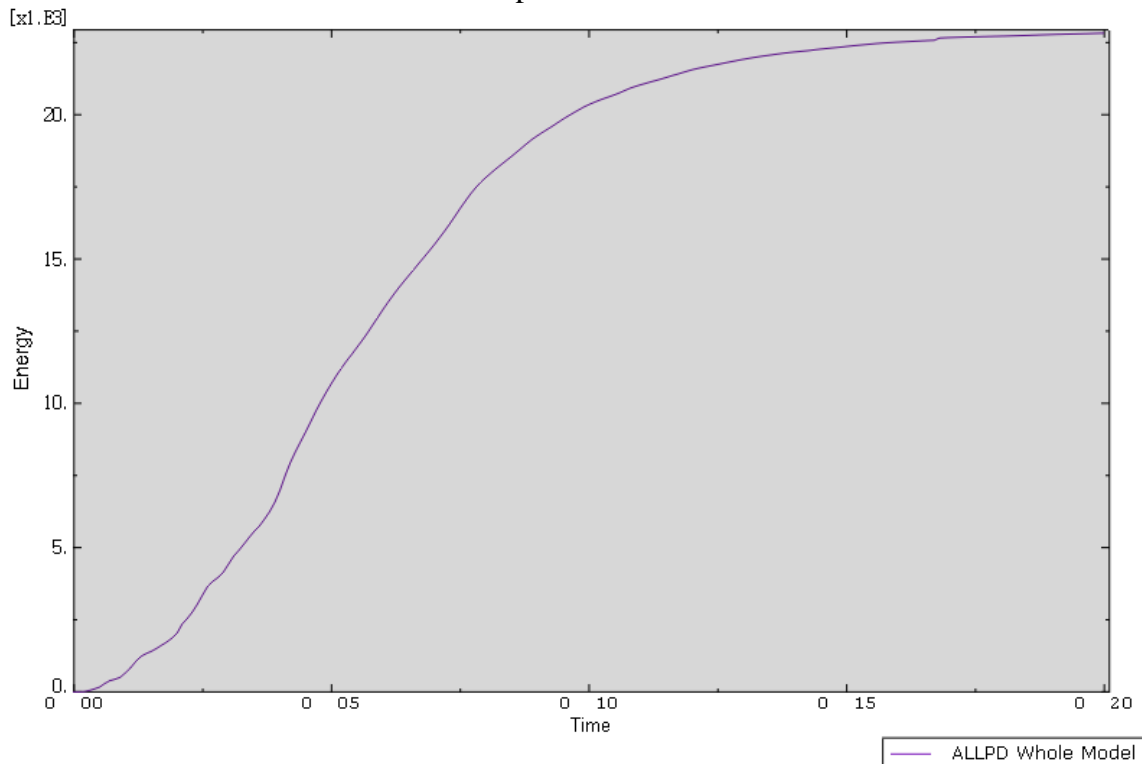


Figura 6_113

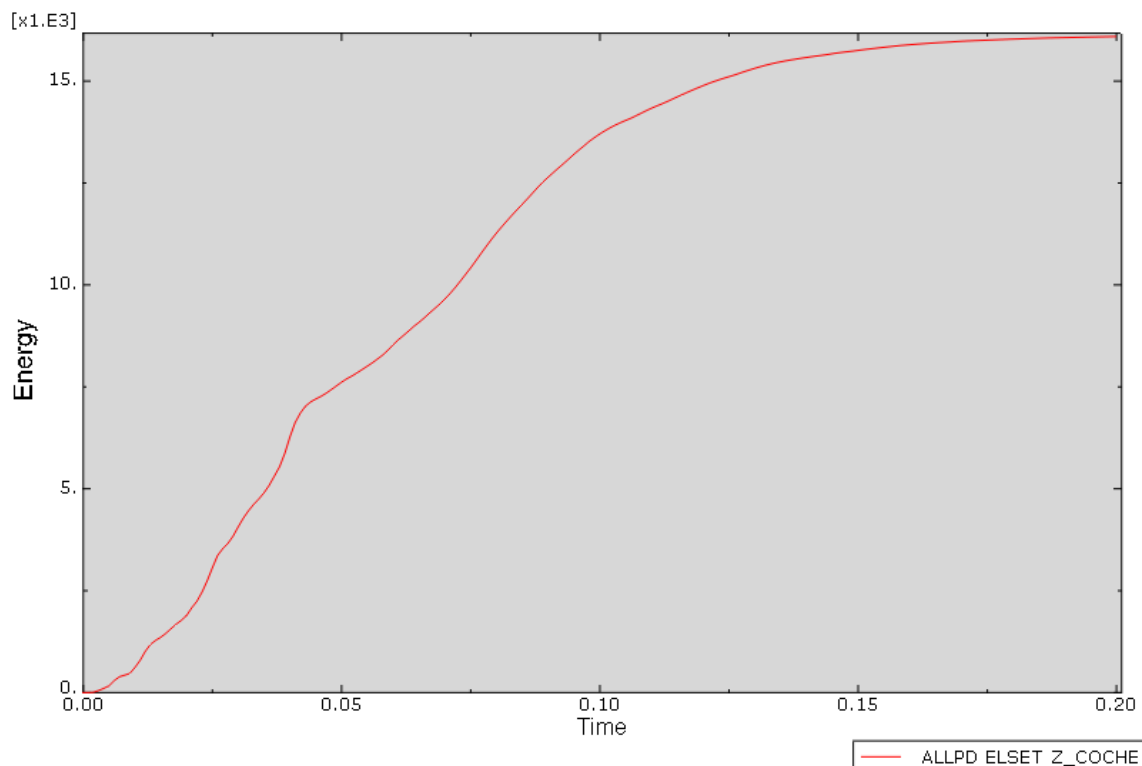


Figura 6_114

El valor máximo de la energía disipada plásticamente para el modelo entero es **21000 J** para el caso de 45km/h. Y de **10000 J** para el coche.

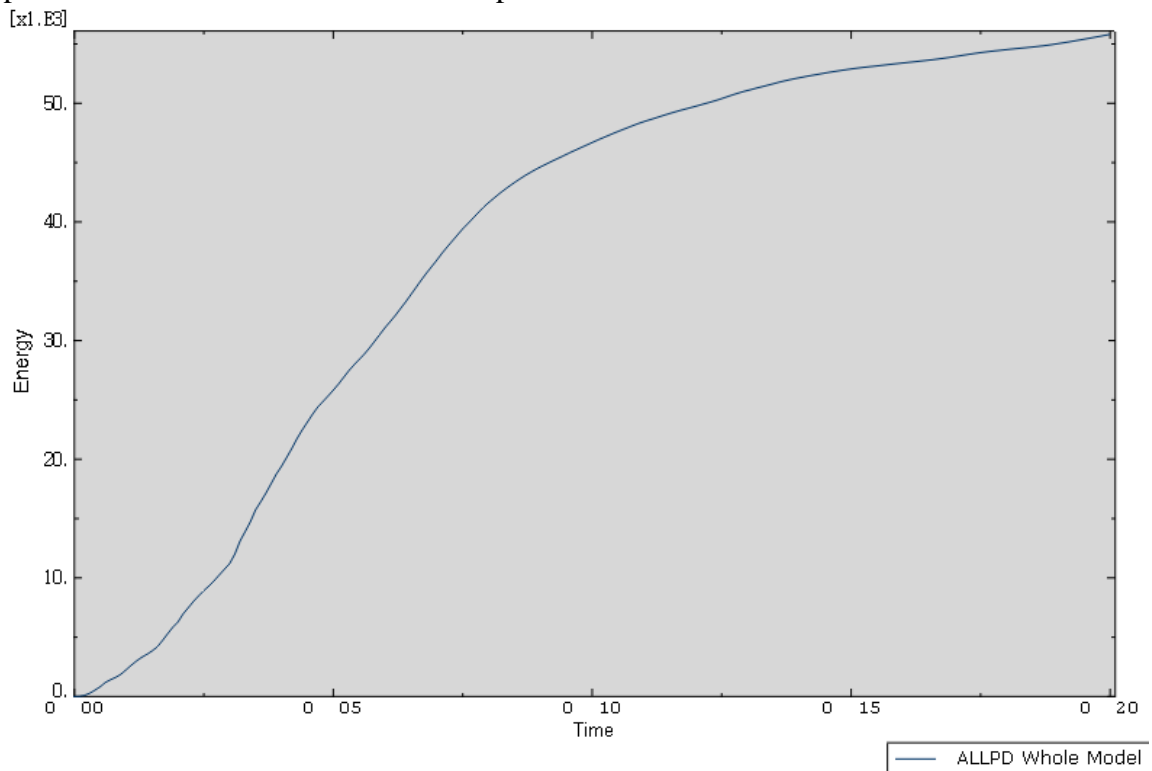


Figura 6_115

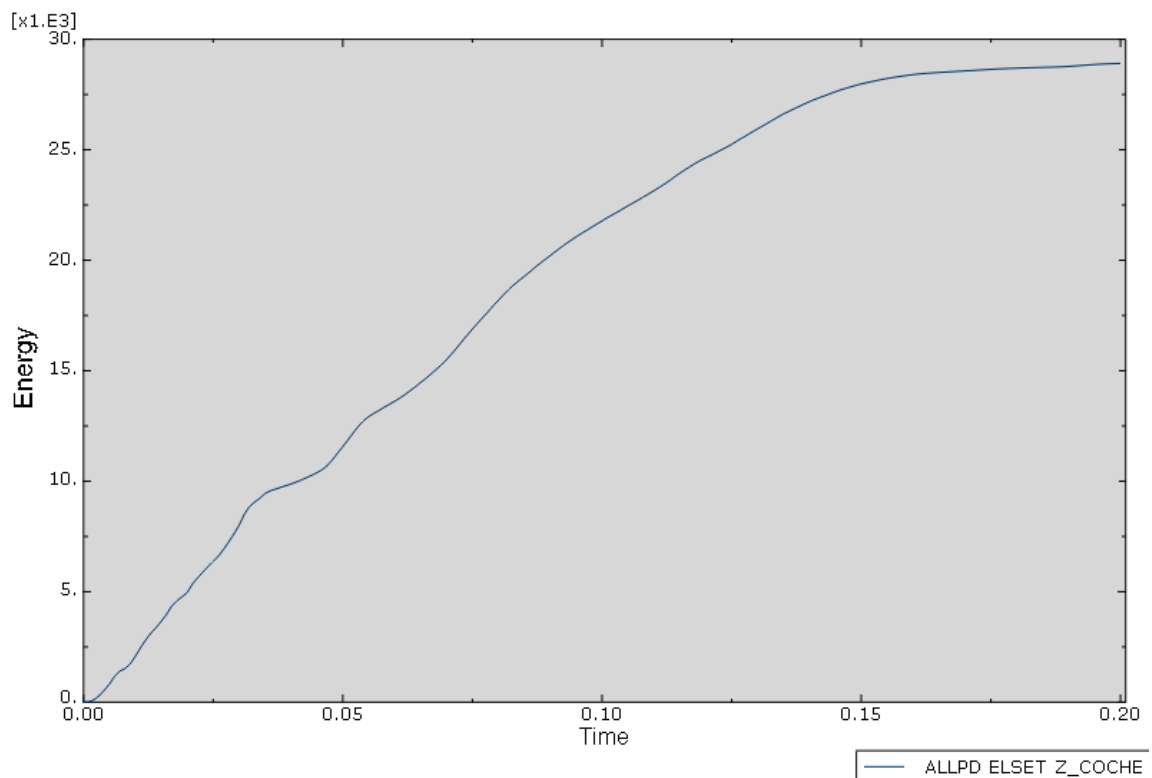


Figura 6_116

Para el caso de 60km/h, el valor máximo de la energía disipada plásticamente para el modelo entero es **23000 J**. Y de **12500 J** para el coche.

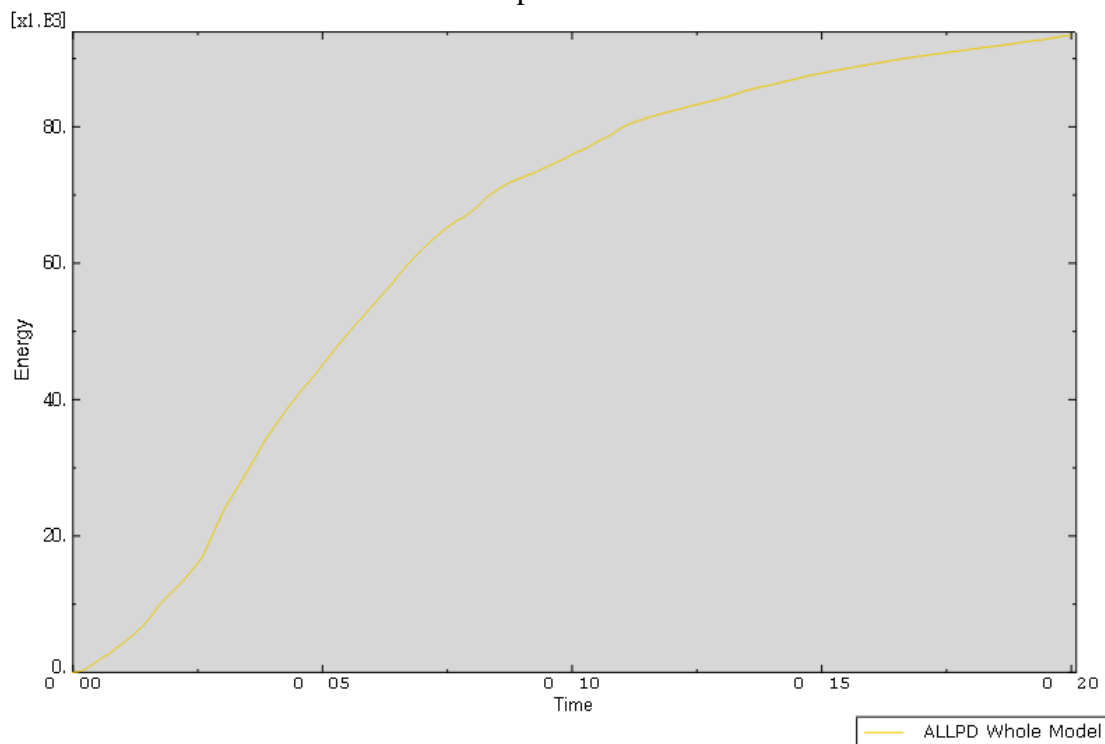


Figura 6_117

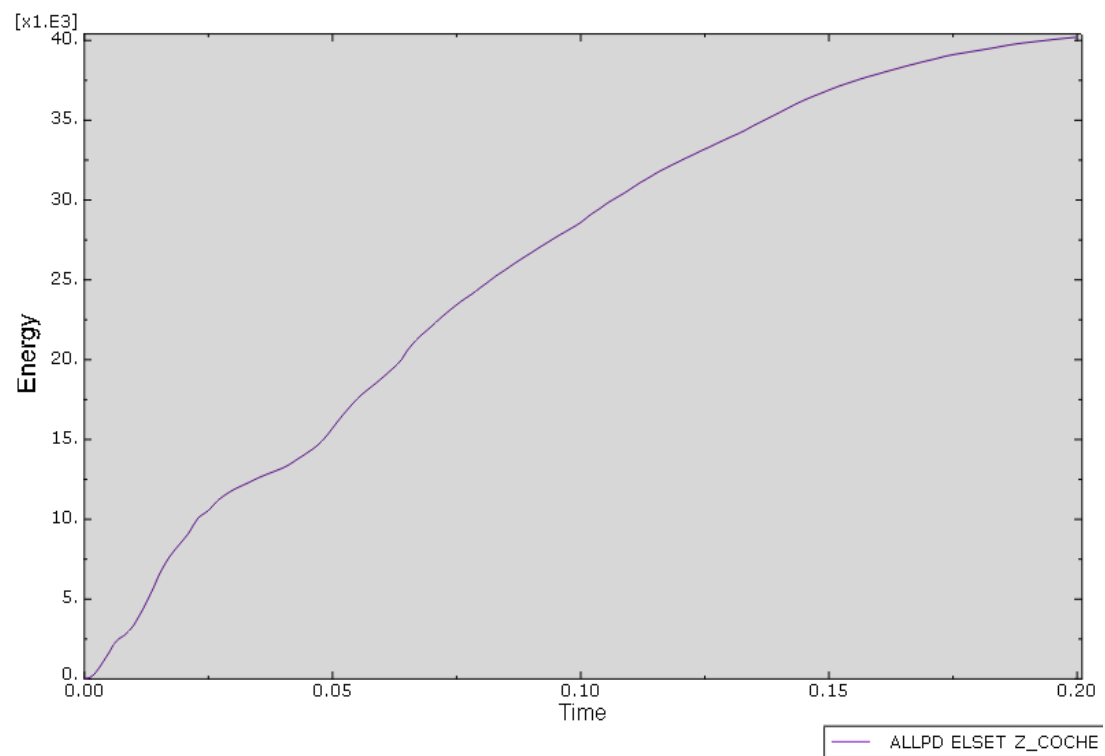


Figura 6_118

Progreso de tensiones de von Mises

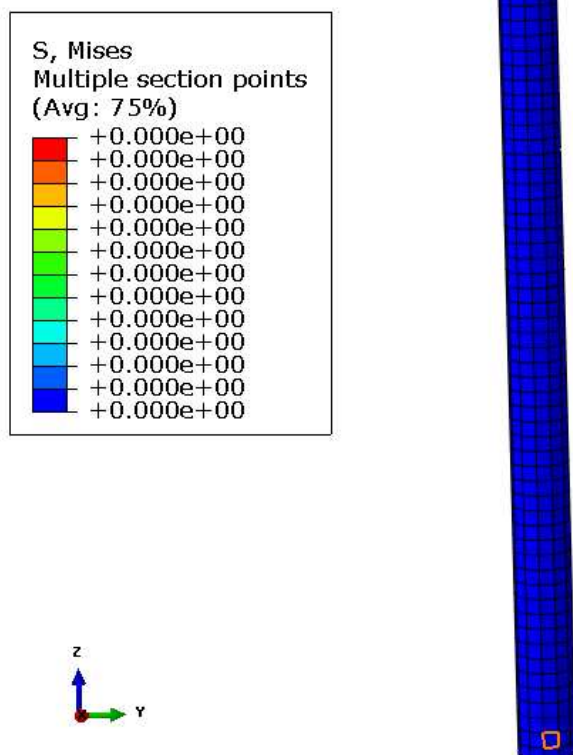


Figura 6_119

Para el caso de 30km/h:

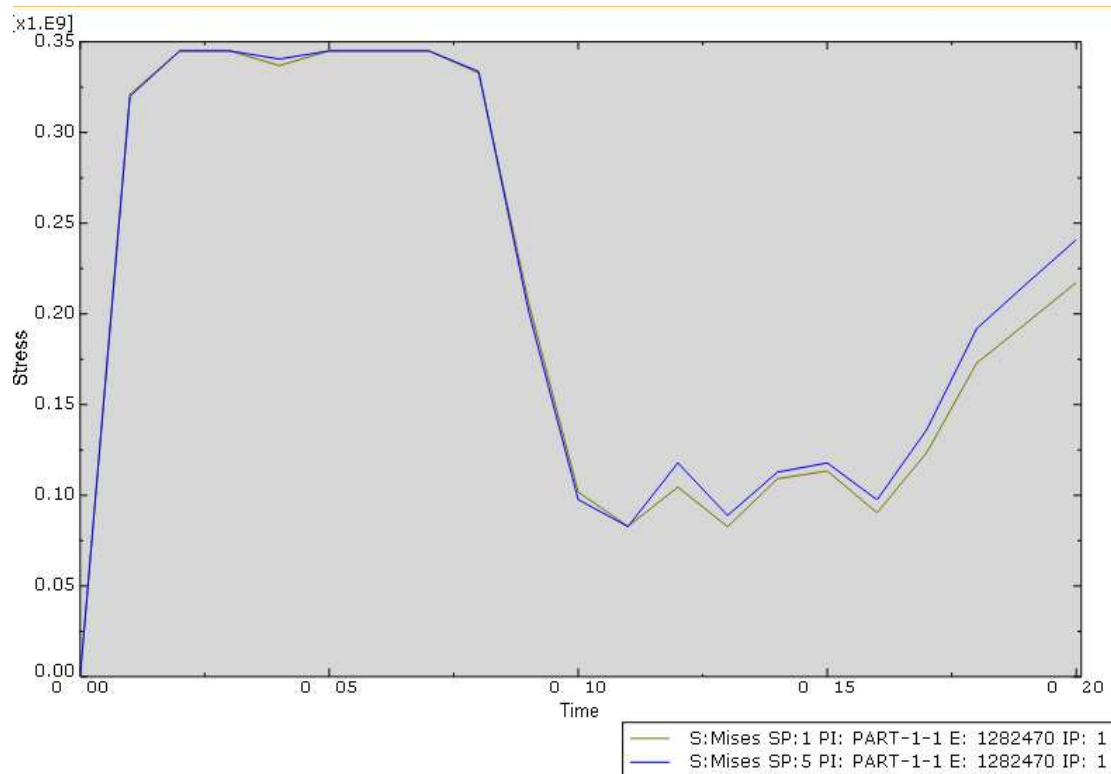


Figura 6_120

Para el caso de 45km/h:

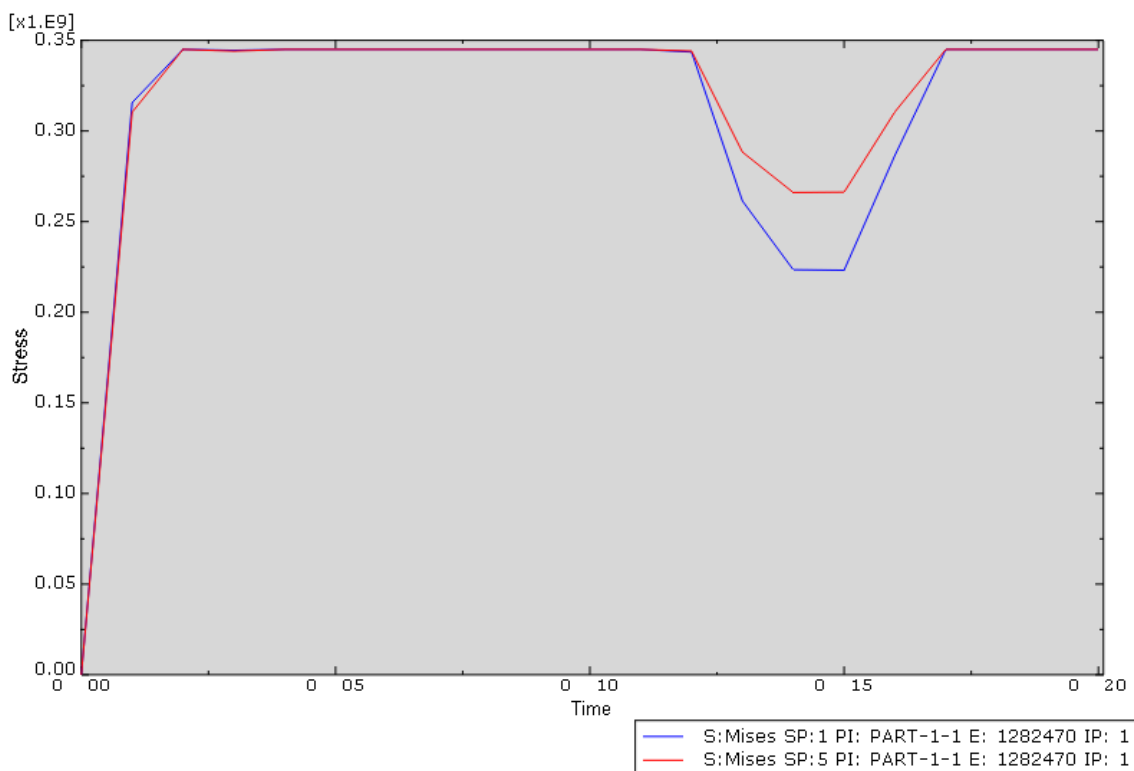


Figura 6_121

Para el caso de 60km/h:

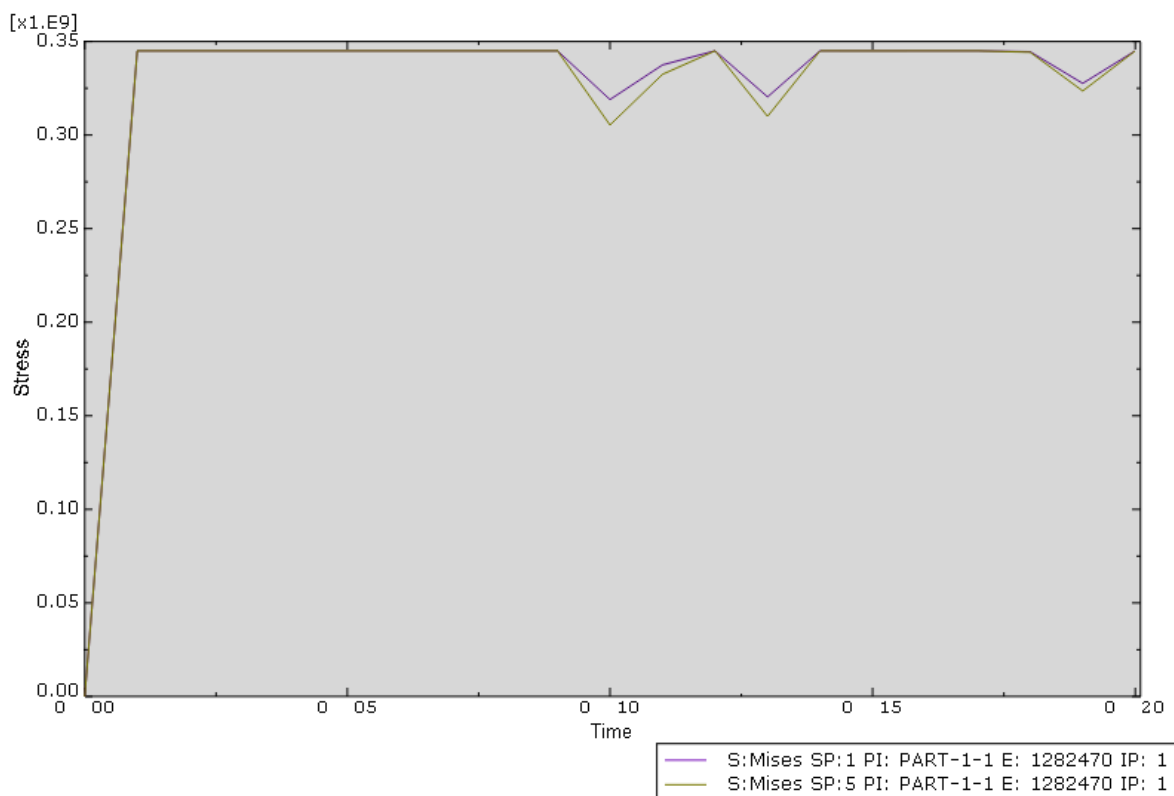


Figura 6_122

Progreso de velocidades del vehículo en dirección de avance

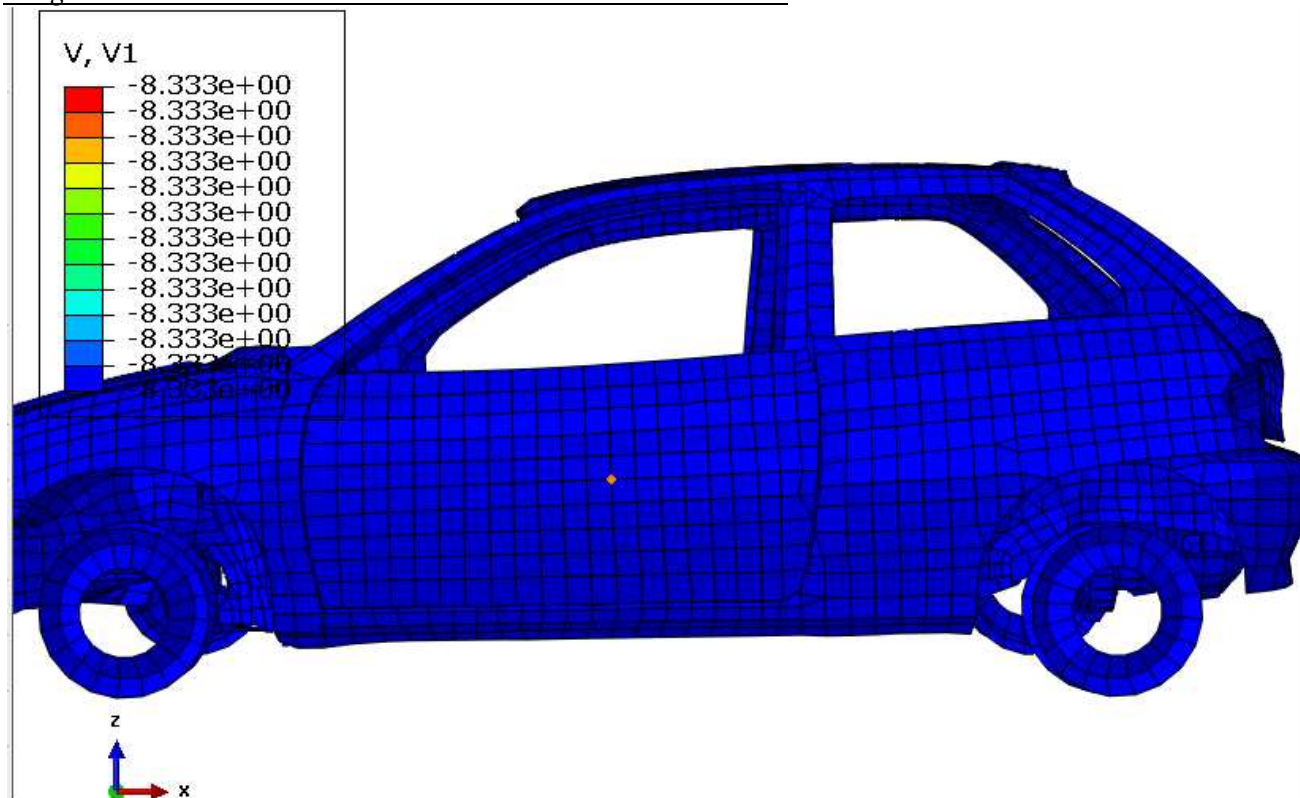


Figura 6_123

Para el caso de 30km/h, al velocidad de salida es de **5,5 m/s**:

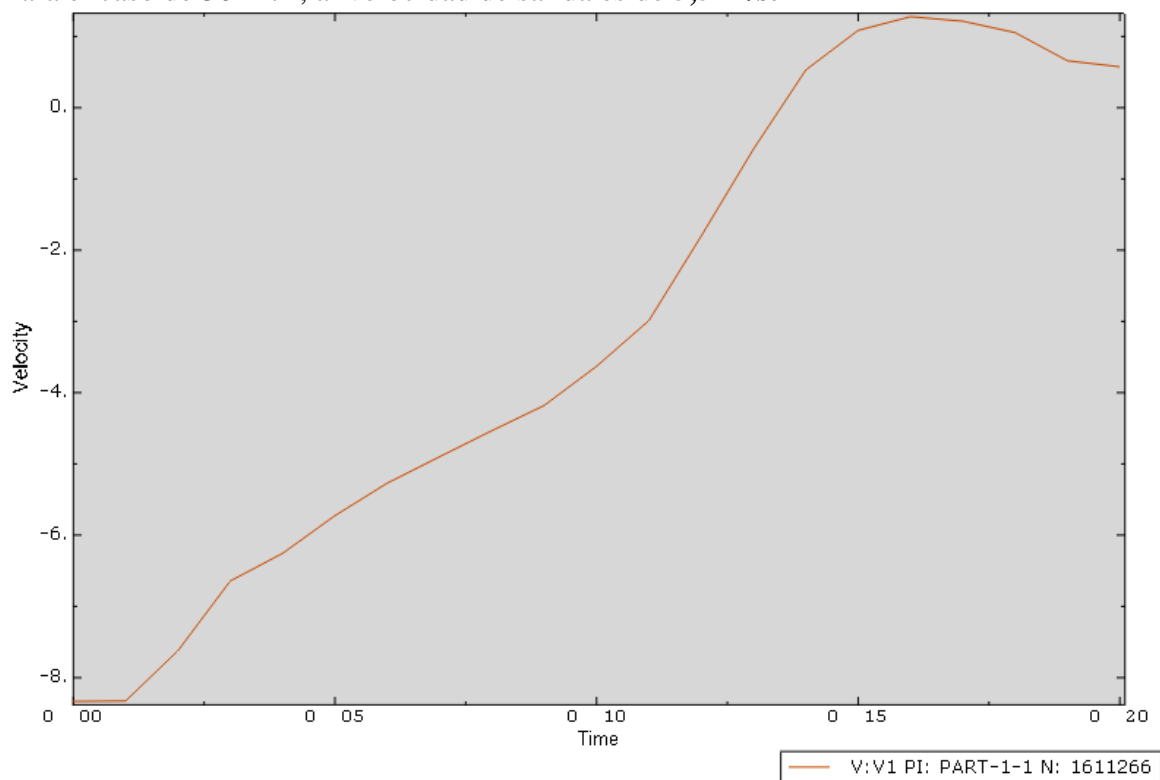


Figura 6_124

La velocidad de salida para el caso de 45km/h es de **10,5 m/s**:

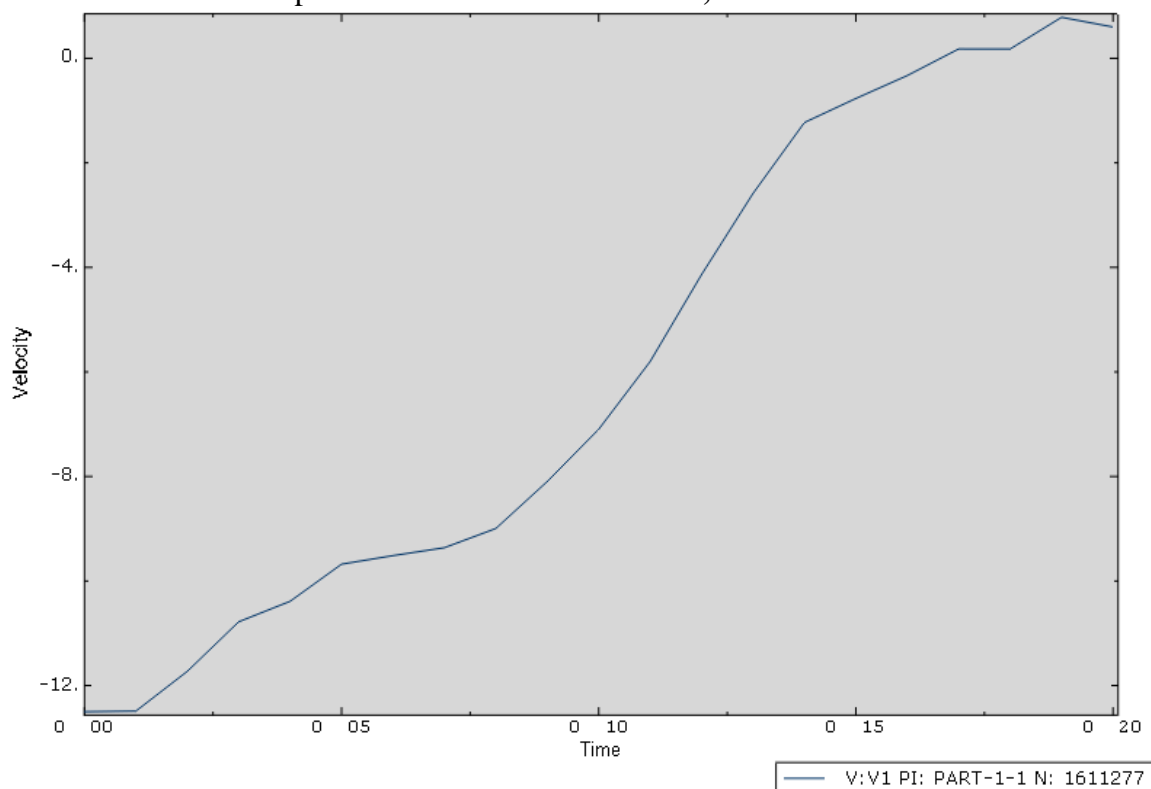


Figura 6_125

La velocidad de salida es de **15,0 m/s** para el caso de 60km/h:

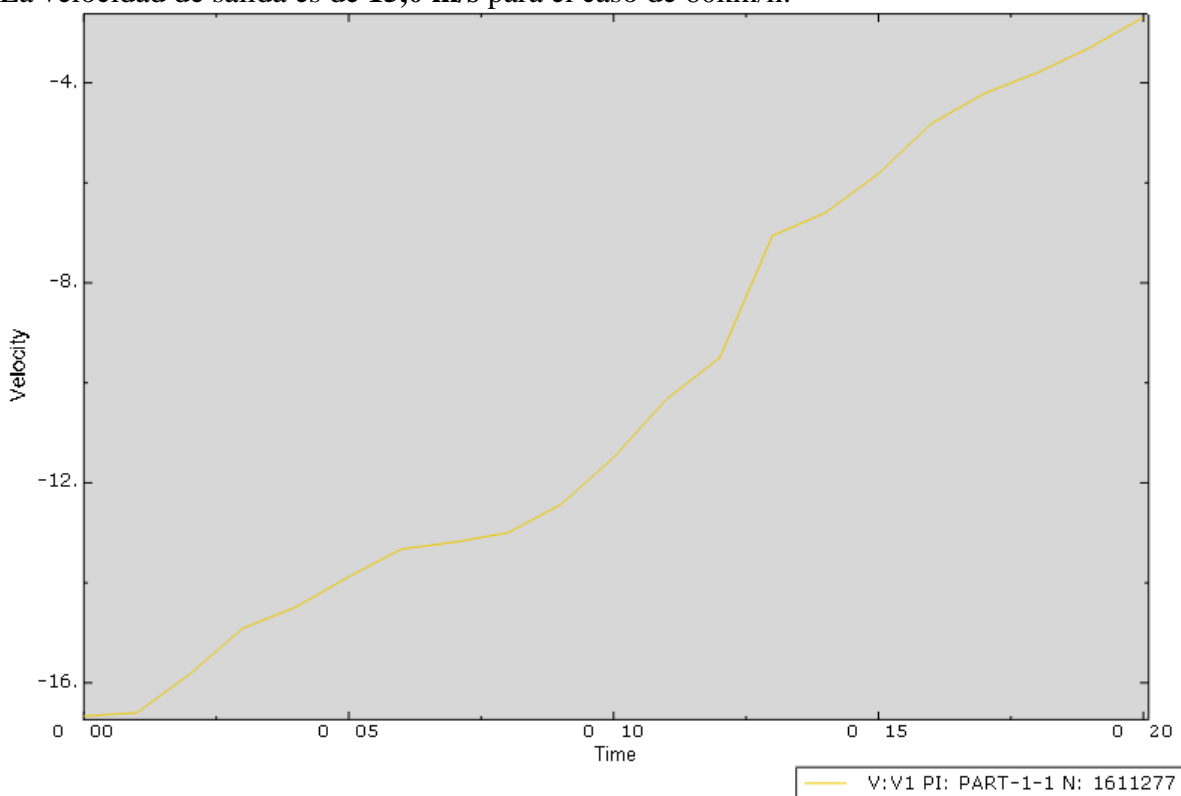


Figura 6_126

Progreso de aceleraciones del vehículo en dirección de avance

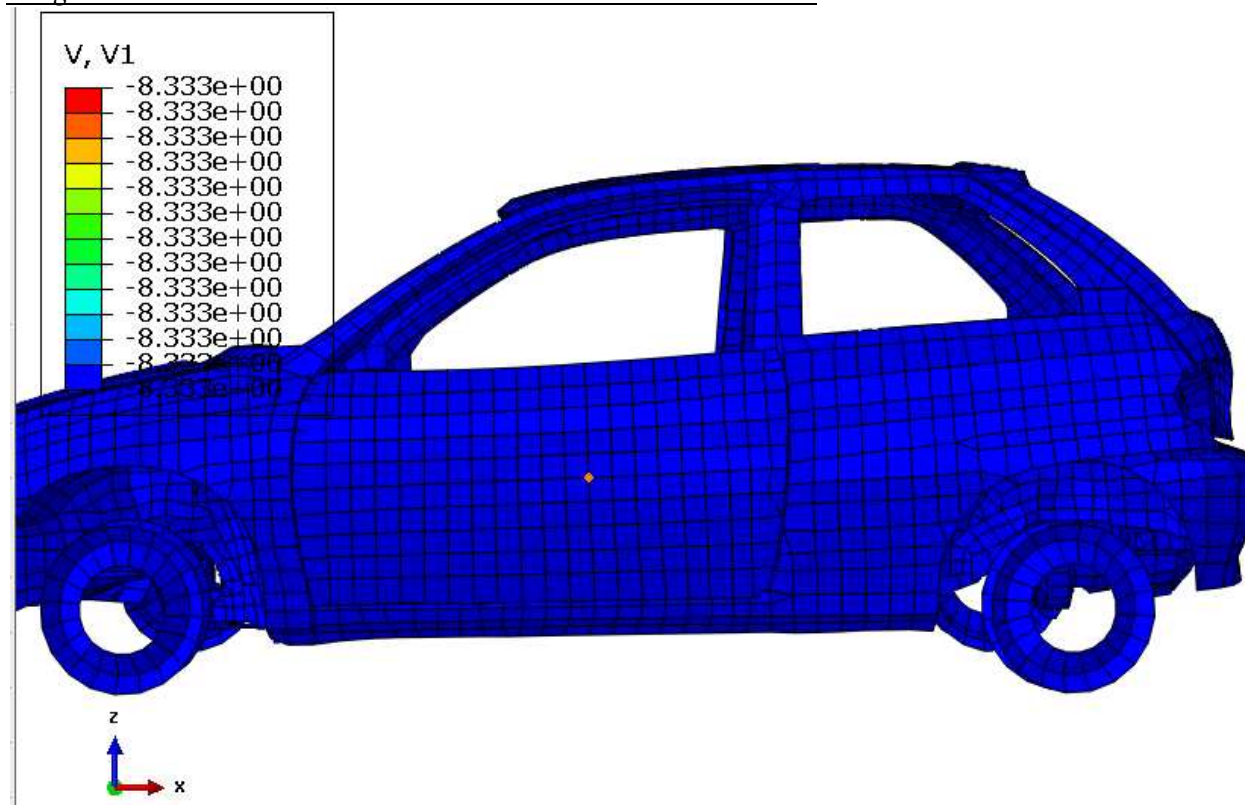


Figura 6_127

La aceleración máxima es de **-5750 m/s²** para el caso de 30km/h:

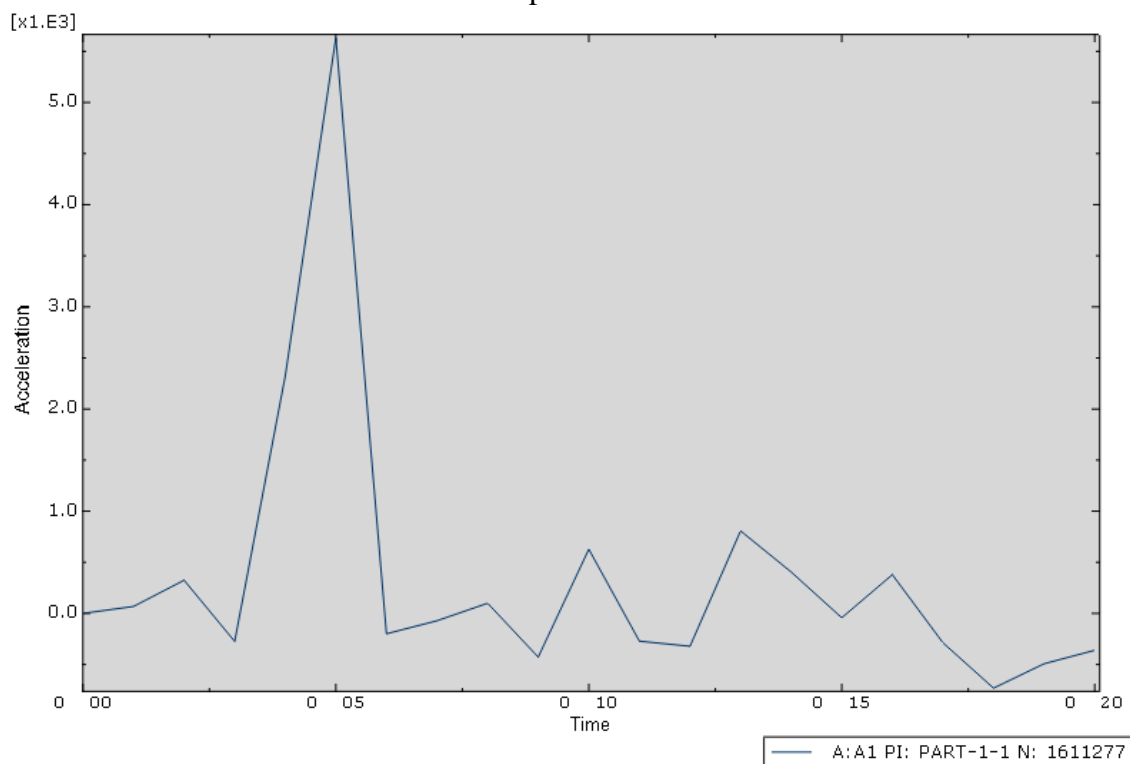


Figura 6_128

Para el caso de 45km/h, al aceleración máxima es de **-1300 m/s²**:

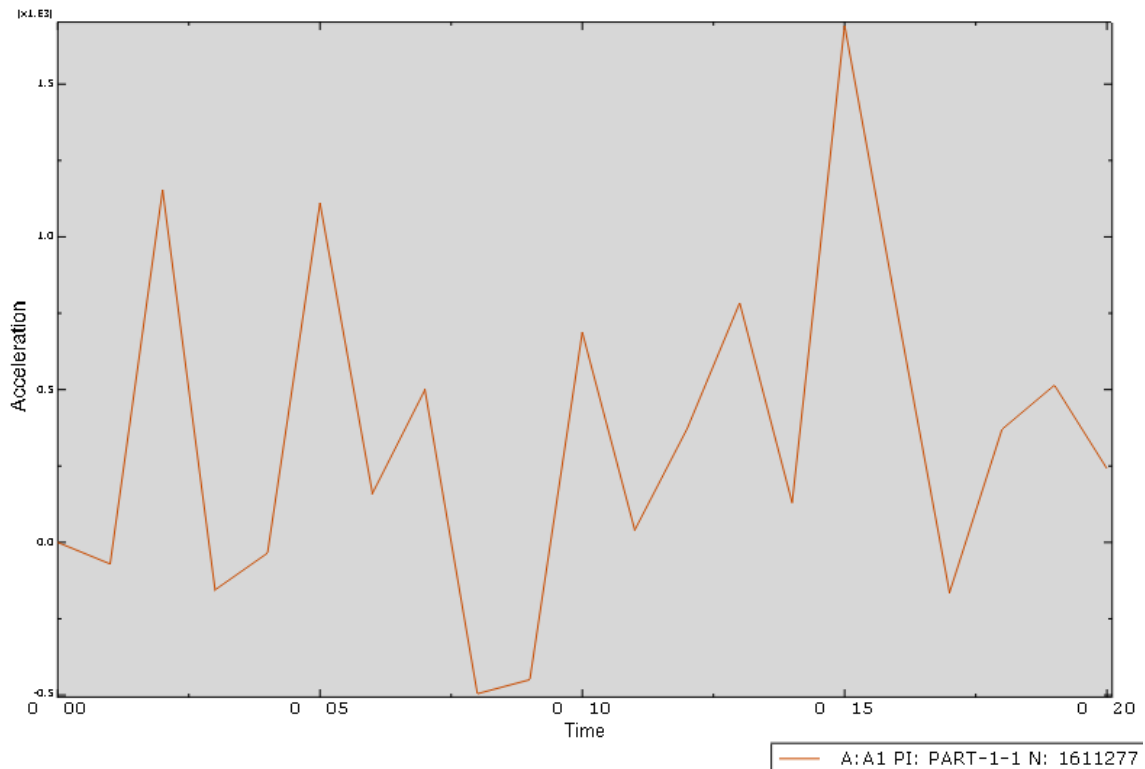


Figura 6_129

La aceleración máxima para el caso de 60km/h es de **1000 m/s²**:

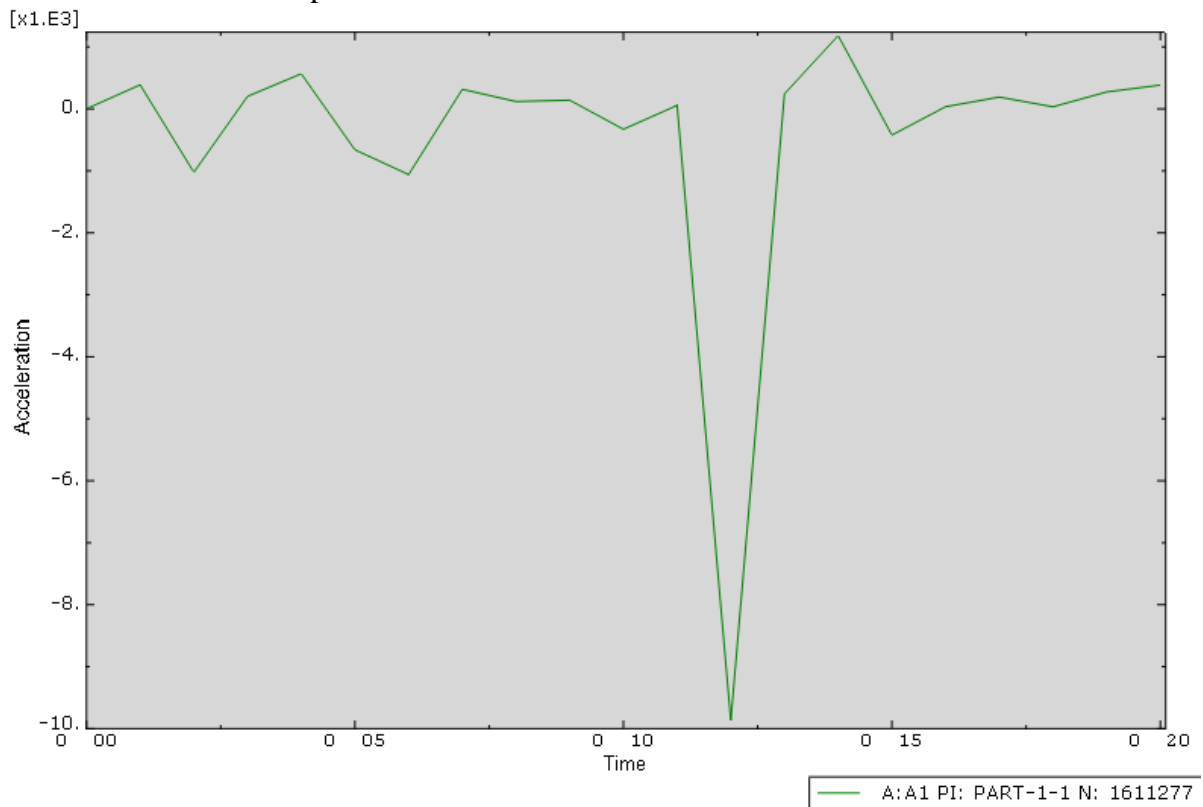


Figura 6_130

Progreso de intrusión del poste en el paragolpes del vehículo

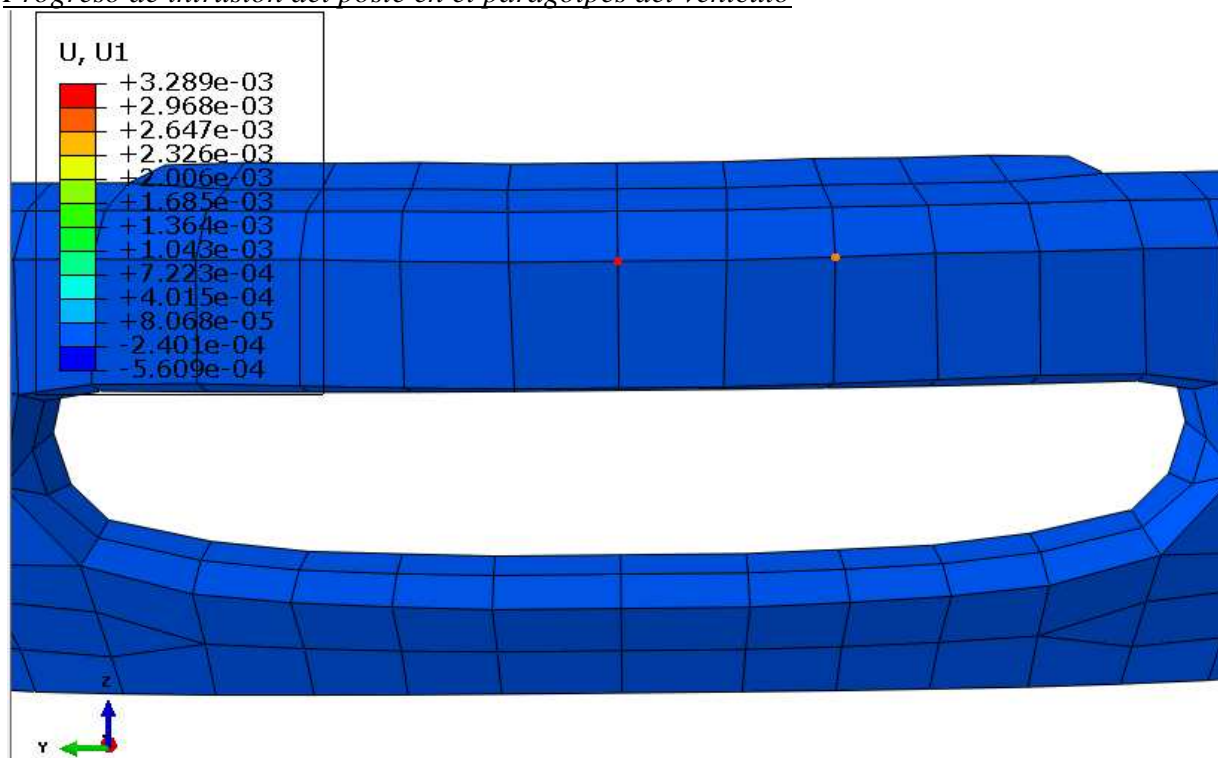


Figura 6_131

La intrusión máxima del poste es de **37,5 mm** para el caso de 30km/h:

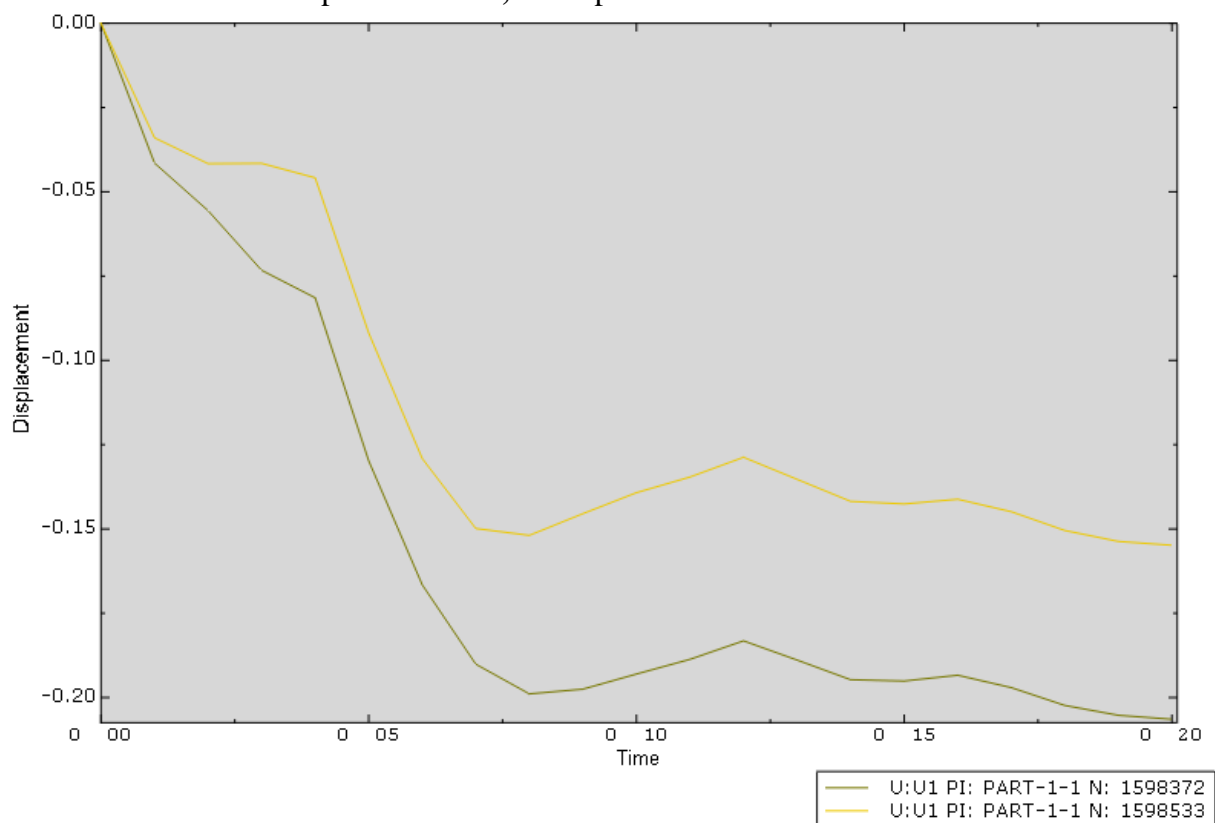


Figura 6_132

Para el caso de 45km/h, al intrusión máxima del poste es de **47,5 mm**:

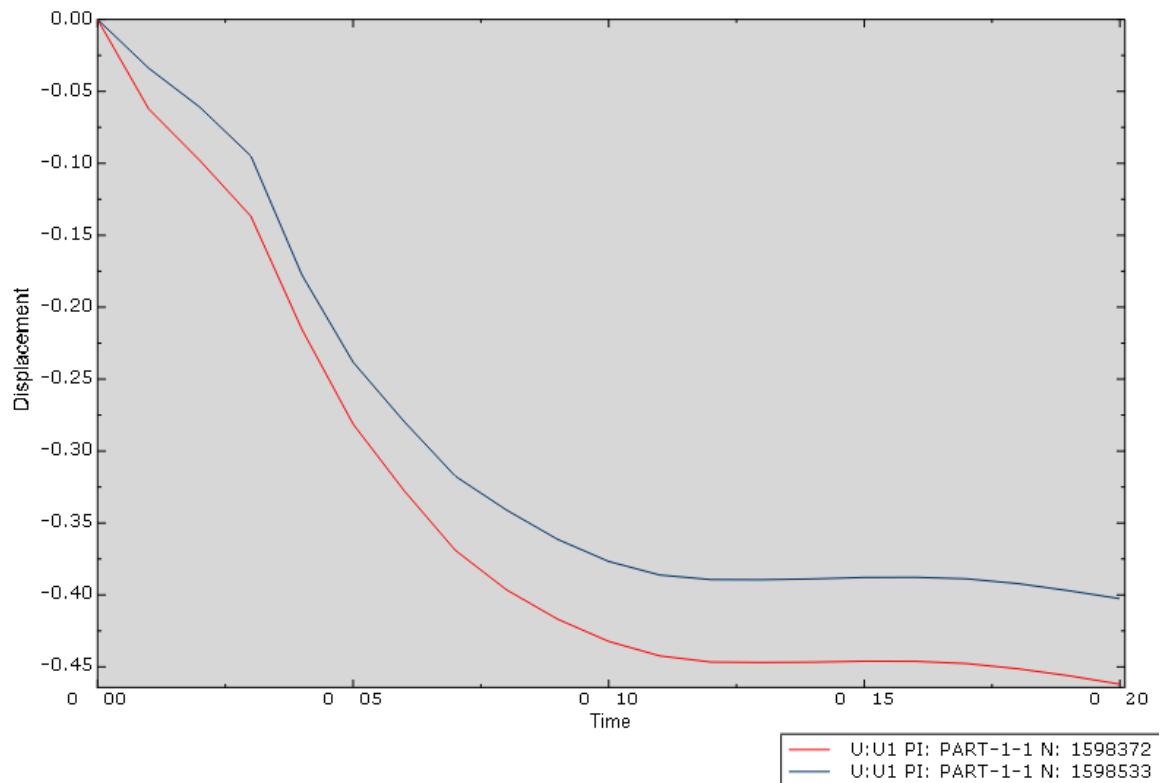


Figura 6_133

La intrusión máxima del poste es de **60 mm** para el caso de 60km/h:

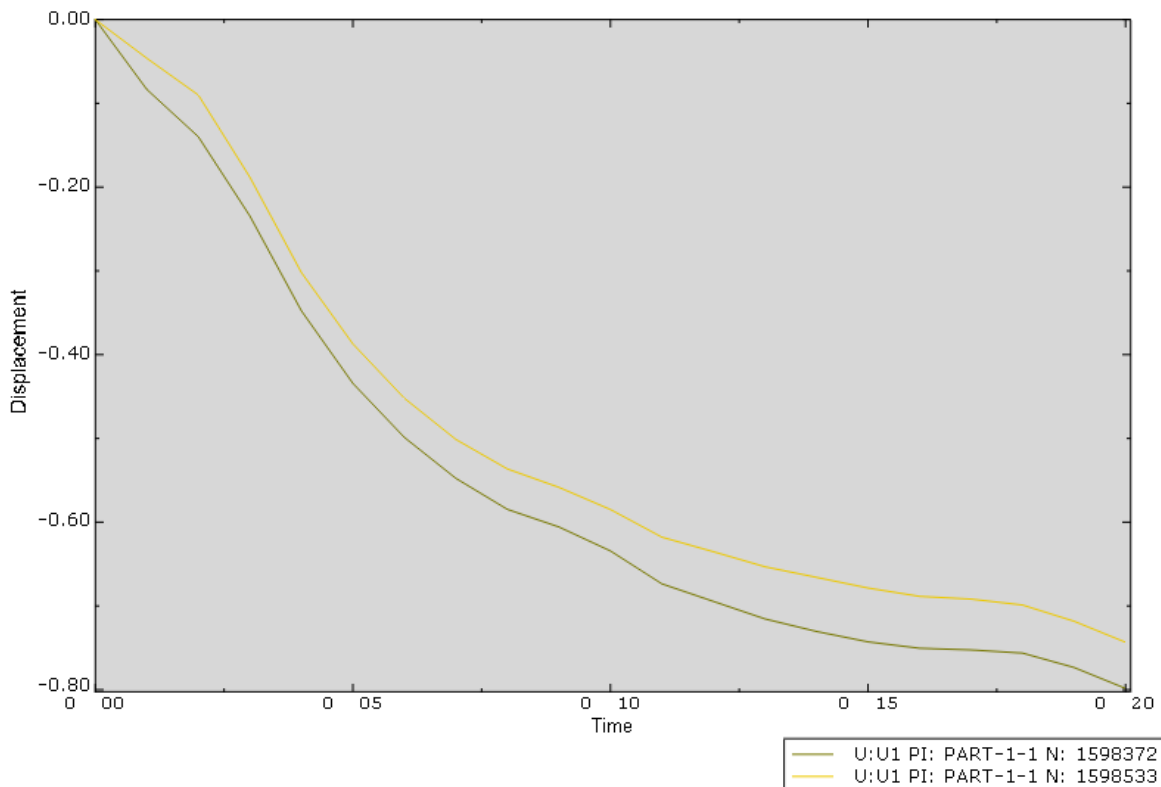


Figura 6_134

4.2.4.- Conclusiones

Semáforo

	30km/h	45km/h	60km/h
Tensión max (MPa)	345	345	345
Lugar	Base poste	Base poste	Base y centro poste
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03
Desplazamiento max (mm)	243	243	238
Lugar	Centro poste	Centro poste	Centro poste
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03
ROTURA	SI	SI	SI

Tabla 6_8

En todos los casos el poste del semáforo se rompe, lo que es un buen indicativo según los informes que se han estudiado, ya que indicarían que son menos lesivos para los integrantes del vehículo.

Por otro lado, que los desplazamientos máximos sean iguales, o en el caso de 60km/h sea inferior, se explica al coger los valores que se han dado hasta rotura del poste, por lo que se ha indicado antes de los resultados que da ABAQUS después no son reales. Esto último se ve, en que tras la rotura, en vez de que el poste sea despedido por encima del vehículo, el poste se va deformando igual y como lo haría con uno de acero.

Vehículo

	30km/h	45km/h	60km/h
Tensión max paragolpes (MPa)	326	323	343
Lugar	Centro	Centro	Centro
Tiempo(s)	0,06	0,03	0,02
Desplazamiento max paragolpes (mm)	125	172	184
Lugar	Centro	Centro	Centro
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03
PEEQ max paragolpes	$6,986 \cdot 10^{-2}$	$9,071 \cdot 10^{-2}$	$1,057 \cdot 10^{-1}$
Lugar	Centro	-----	-----
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03
PLASTIFICACION paragolpes	SI	SI	SI
ROTURA paragolpes	NO	NO	NO
Cs paragolpes	1,84	1,86	1,75
Tensión max suelo (MPa)	276	283	284
Lugar	Delante izquierda	Delante izquierda	Delante izquierda
Tiempo(s)	0,02	0,02	0,03

PEEQ max suelo	$3,160 \cdot 10^{-2}$	$2,671 \cdot 10^{-2}$	$2,763 \cdot 10^{-1}$
Lugar	Delante izquierda	Delante izquierda	Delante izquierda
Tiempo(s)	0,05 - 0,06	0,04	0,03
PLASTIFICACION suelo	SI	SI	SI
ROTURA suelo	NO	NO	NO
Cs suelo	2,17	2,12	2,11

Tabla 6_9

Los valores de tensión del paragolpes y del suelo, aunque van ascendiendo con la velocidad, salvo en el paragolpes para el caso de 45km/h, son muy similares. Lo que querría implicar que el semáforo se comportaría de forma muy similar para velocidades que variarían dentro de unos límites.

El caso especial del paragolpes cuando el choque se produce a 45km/h podría estar dado por la precisión de los cálculos del programa, o porque el valor real no se haya alcanzado antes de la rotura, que es hasta donde se han tomado los datos.

Los desplazamientos de los paragolpes a pesar de ser valores que podrían ser reales de la intrusión del poste, no habría que tomarlos como tales sin antes restarles la distancia que separaba en el principio el poste y el vehículo (14,3mm), y la distancia que haya podido recorrer el vehículo en la deformación del poste antes de la rotura.

Gráficas

	30km/h	45km/h	60km/h
Energía deformación total max (J)	4250	4500	5400
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,025
Energía deformación semáforo max (J)	2750	3250	3800
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,025
Energía deformación coche max (J)	1550	1500	1600
Tiempo(s)	0,06	0,03	0,025

Tabla 6_10

	30km/h	45km/h	60km/h
Disipación viscosa total max (J)	225	300	400
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03
Disipación viscosa semáforo max (J)	4	9	17
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03
Disipación viscosa coche max (J)	150	190	200
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03

Tabla 6_11

	30km/h	45km/h	60km/h
Disipación plástica total max (J)	14000	21000	23000
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03
Disipación plástica semáforo max (J)	0	0	0
Tiempo(s)	-----	-----	-----
Disipación plástica coche max (J)	8000	10000	12500
Tiempo(s)	0,06	0,04	0,03

Tabla 6_12

De las **tablas 6_10, 6_11 y 6_12**, podrían extraerse exactas conclusiones que sus homólogos **6_3, 6_4 y 6_5** para el acero.

Aunque esta vez el desajuste de cifras en el mismo instante de tiempo también se produce en los datos de la disipación plástica. En este caso este hecho se debe a que para poder introducir las líneas de código en el archivo .inp de ABAQUS sobre la fractura del material compuesto, hubo que definir un corto tránsito de comportamiento plástico, a pesar que esto no sea acorde a la realidad. Puesto que estas líneas de código debían de ir precedidas de otras que definían este comportamiento irreal para que ABAQUS pudiera leer el archivo.

Así mismo, de la observación de los trazos de las gráficas correspondientes a estas tablas (**Figuras 6_95 a 6_118**) podría extraerse la misma información, que sus equivalente para el acero, de como el choque se produce "a trompicones" y no de forma completa en un instante de tiempo determinado.

Sin embargo, sí que habría que fijarse que tanto el número de picos como su amplitud es menor, lo que indicaría que el impacto es más uniforme.

	30km/h	45km/h	60km/h
Velocidad de salida (m/s)	5,5	10,5	15,0
Aceleración max vehículo (m/s²)	-5750	-1300	1000
Tiempo(s)	0,05	0,02	0,02
Intrusión poste max (mm)	37,5	47,5	60
Tiempo(s)	0,04	0,03	0,02

Tabla 6_13

La disminución de la velocidad entre el inicio y tras la rotura del poste por el vehículo, que van desde 1,66 a 2,83 m/s, son muy bajas, lo que da a pensar que el impacto no tendría una severidad alta, por la uniformidad del mismo que se acaba de mencionar.

Como con el acero, los valores de las aceleraciones son excesivamente elevados, alcanzando hasta los -580g aproximadamente. Además, que el valor máximo para 60km/h no sea una desaceleración, solo pude verse como lo que ya se dijo, que ABAQUS en el cálculo de esta magnitud comete errores.

De nuevo, para darse cuenta de que estas aceleraciones no son posibles, sólo habría que hacer una pequeña comparación con las aceleraciones "aproximadas reales".

	30km/h	45km/h	60km/h
Aceleración vehículo (m/s^2)	-47,2	-50,0	-55,3

Tabla 6_14

Esta vez todos los valores, sin excepción, son acordes a lo esperado. A una mayor velocidad de partida, una mayor desaceleración.

Por último, los valores de la intrusión del poste en el paragolpes(vehículo) son acordes a lo que se esperaba, y con una magnitud para poderse considerar muy cercanos a la realidad. No llegando estos a alcanzar en ningún caso más de 2/3 del diámetro del poste, lo que indica que tienen un buen comportamiento como elementos de seguridad pasiva.

4.3.- Comparativa de resultados

4.3.1.- Semáforo

	30km/h ACERO	30km/h PRFV	45km/h ACERO	45km/h PRFV	60km/h ACERO	60km/h PRFV
Tensión max (MPa)	337	345	407	345	473	345
Desplazamiento max (mm)	760	243	1405	243	2373	238
PLASTIFICACION	SI	NO	SI	NO	SI	NO
ROTURA	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Cs	1,48	-	1,22	-	1,06	-

Tabla 6_15

Todos los valores, tanto tensiones como desplazamientos, que son menores para el caso de un poste de PRFV, son indicativos de que este tipo de semáforos serían menos lesivos desde el punto de vista de los ocupantes del vehículo.

Salvo una única excepción para el caso de 30km/h en las tensiones, de lo que se podría concluir que para velocidades reducidas los semáforos de PRFV no aportan ninguna ventaja sobre los convencionales de acero. Esto se hace más evidente cuando se observan los valores de los otros casos, en los que se comprueba que los postes de PRFV son más eficientes en la seguridad pasiva cuanto más alta es la velocidad, como de otra forma indicaban los estudios que se analizaron al comienzo de este trabajo.

Por otro lado, que todos los postes de PRFV lleguen a romperse, haría que hubiera más peligro para los viandantes. Sin embargo, en el estudio del TRL, ya se afirmó que el riesgo producido de que un poste partido tras un accidente de tráfico que salga volando golpee a un viandante es mucho menor, si incluso se compara con el provocado por avance del vehículo antes y después del accidente.

4.3.2.- Vehículo

	30km/h ACERO	30km/h PRFV	45km/h ACERO	45km/h PRFV	60km/h ACERO	60km/h PRFV
<i>Tensión max paragolpes (MPa)</i>	338	326	355	323	366	343
<i>Desplazamiento max paragolpes (mm)</i>	134	125	252	172	938	184
<i>PEEQ max paragolpes</i>	$9,056 \cdot 10^{-2}$	$6,986 \cdot 10^{-2}$	$1,229 \cdot 10^{-1}$	$9,071 \cdot 10^{-2}$	$1,410 \cdot 10^{-1}$	$1,057 \cdot 10^{-1}$
<i>PLASTIFICACION paragolpes</i>	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>ROTURA paragolpes</i>	NO	NO	NO	NO	NO	NO
<i>Cs paragolpes</i>	1,77	1,84	1,69	1,86	1,64	1,75
<i>Tensión max suelo (MPa)</i>	298	276	373	283	359	284
<i>PEEQ max suelo</i>	$6,305 \cdot 10^{-2}$	$3,160 \cdot 10^{-2}$	$2,371 \cdot 10^{-1}$	$2,671 \cdot 10^{-2}$	$2,371 \cdot 10^{-1}$	$2,763 \cdot 10^{-1}$
<i>PLASTIFICACION suelo</i>	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<i>ROTURA suelo</i>	NO	NO	NO	NO	NO	NO
<i>Cs suelo</i>	2,01	2,17	1,61	2,12	1,67	2,11

Tabla 6_16

Ambos valores, los correspondientes al paragolpes o al suelo, ya sea en forma de tensión o desplazamiento o PPEQ, son relevantes para ya ir empezando a concluir definitivamente, a falta de comparar las gráficas, que los semáforos fabricados en PRFV son menos lesivos si se comparan con sus homólogos de acero.

4.3.3.- Gráficas

	30km/h ACERO	30km/h PRFV	45km/h ACERO	45km/h PRFV	60km/h ACERO	60km/h PRFV
<i>Energía deformación total max (J)</i>	2250	4250	3300	4500	4200	5400
<i>Energía deformación semáforo max (J)</i>	490	2750	610	3250	760	3800
<i>Energía deformación coche max (J)</i>	2050	1550	3000	1500	3450	1600

Tabla 6_17

	30km/h ACERO	30km/h PRFV	45km/h ACERO	45km/h PRFV	60km/h ACERO	60km/h PRFV
<i>Disipación viscosa total max (J)</i>	4500	225	1850	300	2500	400
<i>Disipación viscosa semáforo max (J)</i>	9	4	14	9	260	17
<i>Disipación viscosa coche max (J)</i>	1875	150	1000	190	1400	200

Tabla 6_18

	30km/h ACERO	30km/h PRFV	45km/h ACERO	45km/h PRFV	60km/h ACERO	60km/h PRFV
<i>Disipación plástica total max (J)</i>	26000	14000	60000	21000	82500	23000
<i>Disipación plástica semáforo max (J)</i>	9200	0	27500	0	43750	0
<i>Disipación plástica coche max (J)</i>	16800	8000	32500	10000	38750	12500

Tabla 6_19

Que los valores de energía de deformación sean más altos para los semáforos y más bajos para los vehículos en los casos de choque contra una columna de PRFV, se podría explicar como que este tipo de elementos absorben más energía en accidente de tráfico que sus homólogos de acero.

Al contrario, que los valores de energía disipada viscosamente o plásticamente sean más altos tanto para los semáforos como para los vehículos, vendría a indicar que ambos elementos han sufrido un golpe más fuerte.

O lo que es lo mismo para cualquier **tabla (6_17, 6_18 y 6_19)**, la transmisión de energía al vehículo es más elevada en el caso de un impacto contra postes de acero, lo que se traduce en una mayor deformación del habitáculo del coche, y por lo tanto en una mayor peligro para sus ocupantes.

	30km/h ACERO	30km/h PRFV	45km/h ACERO	45km/h PRFV	60km/h ACERO	60km/h PRFV
<i>Velocidad de salida (m/s)</i>	-1,0	5,5	0,0	10,5	6,5	15,0
<i>Aceleración "real" (m/s²)</i>	-46,7	-47,2	-62,5	-50,0	-50,8	-55,3
<i>Intrusión poste max (mm)</i>	57,5	37,5	62,5	47,5	80,0	60,0

Tabla 6_20

Todos los valores de la **tabla 6_20**, son indicadores de un mejor comportamiento ante un accidente de tráfico producido contra un semáforo fabricado en materiales compuestos frente a uno convencional de acero.

Sólo habría que fijarse que la desaceleración a la que se ve sometida el vehículo es menor, en un 1g para el caso de 45km/h y se prevé que fuera menor también para 60km/h si el tiempo de ensayo fuera mayor. Así como la intrusión del poste en el paragolpes (vehículo) que también se ve reducida en un rango que oscila entre los 15 y 20mm.

Desde el punto de vista de la velocidad de salida, según los informes estudiados, los valores seguirían indicando un mejor comportamiento como elemento de seguridad pasiva a las columnas de PRFV.

Aun más si cabe, a altas velocidades, ya que aunque para el caso de 60km/h no se haya detenido el coche en el tiempo de estudio, como por otro lado se espera que haga en pocas décimas de segundo más, sufriendo así grandes desaceleraciones, la columna de PRFV sigue obteniendo buenos resultados. A excepción del caso de 30km/h.

En definitiva y sin error a dudas, ya se podría concluir finalmente que los semáforos fabricados en materiales compuestos son más eficientes en términos de seguridad ante el impacto de un vehículo que sus equivalentes de acero.

4.4.- Mejoras y trabajos futuros

Para mejorar el diseño, y en consecuencia para obtener resultados más precisos, lo fundamental sería rediseñar el poste del semáforo, teniendo en cuenta todos sus elementos de anclaje. Además, de crear un modelo del suelo y definir los contactos con las ruedas del coche, aparte de otros, ya que en la realidad el coche al impactar se despegaría del suelo.

También habría que realizar cambios en el modelo numérico, rediseñando el poste como un elemento sólido para poder utilizar el subcomando ERODE de ABAQUS, que daría mejores resultados tanto numéricos como cinematográficos, ya que con él se puede realizar la "verdadera" eliminación de elementos. Esto permitiría el poder visualizar de

forma correcta los datos e imágenes en el caso del impacto contra postes de PRFV, una vez se produjera el colapso de la estructura.

A su vez, se podría aumentar el tiempo de estudio para poder visualizar los datos que faltan hasta la parada del vehículo para el caso de choque contra la columna de acero a 60km/h. Además de visualizar como y hasta donde es lanzado el poste de PRFV tras su rotura.

Este aumento de tiempo, también serviría en futuros trabajos para poder medir la velocidad de salida de forma más precisa para categorizar la farola según su absorción de energía mediante la norma UNE-EN 12767.

Igualmente, para futuros trabajos, se podrían modelizar dummies con sus respectivos sistemas de retención al asiento para medir las aceleraciones de forma más precisa con el fin de averiguar el índice de severidad de la aceleración (ASI), o ver las velocidades en km/h a las que estos impactarían con la superficie del habitáculo (THIV) para poderla categorizar mejor según la norma UNE-EN 1317-1.

Aunque para obtener datos precisos de estas dos últimas magnitudes lo primero que se tendría que hacer sería la "reparación" del modelo del vehículo, ya que algunas partes de él mismo no se comportan como deberían.

Aquí, habría que hacer una aclaración indicando que estos problemas en el coche no son relevantes para la obtención de los resultados que se han precisado para realizar este trabajo.

Otra buena idea sería el realizar un mayor número de ensayos para modelizar mejor el comportamiento. Lanzando el coche con diferentes ángulos, otras velocidades, etc.

Por último, como un proyecto más alejado de las primeras líneas de investigación de este trabajo, pero con quizás una mayor relevancia científica, cabría la posibilidad de realizar un trabajo semejante, sin importar el elemento de seguridad vial contra el que impactará el vehículo, para estudiar el comportamiento de las sillitas de retención infantil ante un impacto vehicular con uno de estos elementos, ya este fabricado en materiales compuestos, aluminio o acero. Pudiendo comparar los futuros datos obtenidos con los que se dan, por ejemplo, en uno de los apartados del extenso informe estadístico de VINNOVA [4].

5.- Bibliografía

- [1] *Las farolas como elemento de seguridad pasiva de la vía*. RACE. 9 de agosto de 2005
- [2] *The use of passively safe signposts and lighting columns*. G L Williams, J V Kennedy, J A Carroll and R Bestley (Transport Research Laboratory). 2007
- [3] *Anuario estadístico de accidentes*. DGT. 2009, 2010, 2011
- [4] *Effects of Swedish traffic safety research 1971-2004*. VINNOVA. 2007
- [5] *Materiales avanzados en sistemas de automóviles*. Apuntes de la asignatura del máster en Sistemas Mecánicos. 2013
- [6] *UNE-EN 40*. 2003
- [7] *UNE-EN 12767*. 2009
- [8] *Abaqus Documentation 6.12*. SIMULIA. 2013

5.1.- Consultas web

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/07/pultrusion.html>

<http://www.compositec.es/>