



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**Traballo Fin de Mestrado**

**CURSO 2018/19**

---

*ESTUDO DA INFLUENCIA DA TIPOLOXÍA DO  
VEHÍCULO NAS CARGAS DE IMPACTO EN  
ESTRUTURAS*

---

**Mestrado en Enxeñaría Industrial**

**ALUMNO**

Adrián Paz Feijóo

**TITOR**

Manuel López López

**DATA**

XULLO 2019

## **ESTUDO DA INFLUENCIA DA TIPOLOXÍA DO VEHÍCULO NAS CARGAS DE IMPACTO EN ESTRUTURAS**

Neste TFM estúdase a influencia da tipoloxía do vehículo en cargas de impacto sobre estruturas mediante simulacións de elementos finitos realizadas co programa Abaqus. Para levalo a cabo, pátense dos modelos de elementos finitos de dous vehículos diferentes, un Chevrolet Silverado C1500 e un Geo Metro. Estes modelos, que se descargan da páxina web da NCAC (National Crash Analysis Center), están deseñados no programa Ls-Dyna, polo que será necesario realizar unha serie de operacións para poder importalos a Abaqus.

Unha vez importados a Abaqus estes modelos, faise necesario realizar unhas validacións dos mesmo. Para iso, lévanse a cabo unhas simulacións do impacto destes vehículos contra unha parede ríxida, co obxectivo de comparar os resultados obtidos cos resultados dos ensaios reais levados a cabo pola NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration)

Despois de validar os modelos, comézase a simular o impacto de ámbolos dous vehículos contra un pilar para comprobar a influencia da tipoloxía do vehículo na carga de impacto contra esta estrutura. Así mesmo, tamén se realizará a comprobación do cumprimento da normativa establecida no Documento Básico SE-AE (Seguridade estrutural – Accións na edificación) do CTE e no Eurocódigo relativa ás accións sobre un edificio causadas por un impacto.

## **ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TIPOLOGÍA DEL VEHÍCULO EN LAS CARGAS DE IMPACTO EN ESTRUCTURAS**

En este TFM se estudia la influencia de la tipología del vehículo en cargas de impacto sobre estructuras mediante simulaciones de elementos finitos realizadas con el programa Abaqus. Para llevarlo a cabo, se parte de los modelos de elementos finitos de dos vehículos diferentes, un Chevrolet Silverado C1500 pick up y un Geo Metro. Estos modelos, que se descargan de la página web de la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), están diseñados en el programa Ls-Dyna, por lo que será necesario realizar una serie de operaciones para poder importarlos a Abaqus.

Una vez importados a Abaqus estos modelos, es necesario realizar unas validaciones de los mismos. Para eso, se llevan a cabo unas simulaciones del impacto de estos vehículos contra una pared rígida, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los resultados de los ensayos reales desarrollados por la NHTS (National Highway Traffic Safety Administration).

Después de validar los modelos, se empieza a simular el impacto de ambos vehículos contra un pilar para comprobar la influencia de la tipología del vehículo en la carga de impacto contra esta estructura. Así mismo, también se realizará la comprobación del cumplimiento de la normativa establecida en el Documento Básico SE-AE (Seguridad estructural – Acciones en la edificación) del CTE y en el Eurocódigo relativa a las acciones sobre un edificio causadas por un impacto.

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF VEHICLE TYPOLOGY ON IMPACT LOADS IN STRUCTURES**

In this TFM, the influence of vehicle typology on impact loads in structures is studied by simulations of finite elements carried out with the program Abaqus. To carry it out, we start with the finite element models of two different vehicles, a Chevrolet Silverado C1500 pick up and a Geo Metro. These models, which are downloaded from the NHTSA website (National Highway Traffic Safety Administration), are designed in the program Ls-Dyna, so it will be necessary to carry out a series of operations in order to import them into Abaqus.

Once these models are imported into Abaqus, it is necessary to validate them. For that, simulations of the impact of these vehicles against a rigid wall are carried out, with the aim of comparing the results obtained with the results of the real tests developed by the NHTS (National Highway Traffic Safety Administration).

After validating the models, the impact of both vehicles against a pillar is begun to simulate the influence of the vehicle's type on the impact load against this structure. Likewise, the verification of compliance with the regulations established in the Basic Document SE-AE (Structural Security - Actions in the building) of the CTE and in the Eurocode relating to the actions on a building caused by an impact will also be carried out.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABALLO FIN DE MESTRADO  
CURSO 2018/19**

---

*ESTUDO DA INFLUENCIA DA TIPOLOXÍA DO  
VEHÍCULO NAS CARGAS DE IMPACTO EN  
ESTRUTURAS*

---

**Mestrado en Enxeñaría Industrial**

**Documento**

**MEMORIA**

## ÍNDICE

1	Obxectivo do proxecto .....	12
2	Introdución aos elementos finitos .....	13
3	Validación dos modelos .....	17
3.1	Validación do Chevrolet Silverado C1500 .....	17
3.1.1	Antecedentes: ensaio real .....	17
3.1.2	Modelo inicial do vehículo .....	22
3.1.3	Simulación do impacto frontal .....	24
3.1.4	Secuencia do impacto.....	28
3.1.5	Estado final do vehículo .....	31
3.1.6	Análise de resultados e verificación do modelo .....	34
3.2	Validación do Geo Metro.....	36
3.2.1	Antecedentes: ensaio real .....	36
3.2.2	Modelo inicial do vehículo .....	38
3.2.3	Simulación do impacto frontal .....	41
3.2.4	Secuencia do impacto.....	43
3.2.5	Estado final do vehículo .....	46
3.2.6	Análise de resultados e verificación do modelo .....	50
4	Antecedentes .....	51
5	Normativa .....	52
6	Modelos empregados.....	55
7	Partes das ensamblaxes .....	56
8	Ensamblaxe e restricións .....	59
8.1	Ensamblaxes dinámicas .....	59
8.2	Ensamblaxes estáticas .....	61
9	Simulacións do Chevrolet Silverado C1500 .....	63
9.1	Simulación dinámica do Chevrolet Silverado C1500 .....	63
9.1.1	Secuencia de impacto.....	63
9.1.2	Resultados da simulación .....	65
9.2	Simulación estática do Chevrolet Silverado C1500 .....	67
10	Simulacións do Geo Metro .....	72
10.1	Simulación dinámica do Geo Metro .....	72
10.1.1	Secuencia de impacto.....	72
10.1.2	Resultados da simulación .....	74
10.2	Simulación estática do Geo Metro .....	75

11 Resultados.....	78
Referencias.....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de elementos.....	13
Figura 2. Diferenza entre elementos e noddos.....	14
Figura 3. Diagrama de programa computacional de elementos finitos. ....	15
Figura 4. Ensaio real do Chevrolet Silverado C1500.....	17
Figura 5. Montaxe para a realización do test.....	18
Figura 6. Situación das células de carga sobre a barreira. ....	19
Figura 7. Frontal do Chevrolet Silverado C1500.....	20
Figura 8. Parte posterior do Chevrolet Silverado C1500. ....	21
Figura 9. Lateral esquerdo do Chevrolet Silverado C1500. ....	21
Figura 10. Modelo de elementos finitos do Chevrolet Silverado C1500.....	23
Figura 11. Datos do modelo do Chevrolet Silverado C1500.....	23
Figura 12. Propiedades dos materiais sen modificar.....	23
Figura 13. Propiedades dos materiais modificadas. ....	24
Figura 14. Puntos de masa engadidos ao Chevrolet Silverado C1500.....	24
Figura 15. Ensamblaxe do Chevrolet Silverado C1500. ....	25
Figura 16. Definición do contacto tanxencial. ....	25
Figura 17. Definición do "General contact". ....	26
Figura 18. Definición do "Surface to surface contact".....	26
Figura 19. Puntos seleccionado para o "Surface to surface contact".....	27
Figura 20. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,006$ s....	28
Figura 21. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,022$ s....	28
Figura 22. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,028$ s....	29
Figura 23. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,036$ s....	29
Figura 24. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,048$ s....	29
Figura 25. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,064$ s....	30
Figura 26. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,088$ s....	30
Figura 27. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,152$ s....	30
Figura 28. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en $t=0,2$ s.....	31
Figura 29. Estado final do Chevrolet Silverado C1500. ....	31
Figura 30. Vista lateral do estado final do Chevrolet Silverado C1500. ....	32
Figura 31. Vista superior do estado final do Chevrolet Silverado C1500. ....	32
Figura 32. Vista frontal do resultado final no ensaio real.....	33
Figura 33. Vista lateral do resultado final no ensaio real. ....	33
Figura 34. Vista xeral do resultado final do ensaio real. ....	34
Figura 35. Geo Metro antes do ensaio real. ....	36
Figura 36. Lateral do Geo Metro antes do ensaio. ....	37

---

Figura 37. Parte traseira do Geo Metro antes do ensaio. ....	37
Figura 38. Parte inferior do Geo Metro antes do ensaio. ....	37
Figura 39. Modelo de elementos finitos do Geo Metro. ....	38
Figura 40. Datos da malla do Geo Metro. ....	39
Figura 41. Vista inferior do modelo do Geo Metro. ....	39
Figura 42. Vista do interior do modelo do Geo Metro. ....	40
Figura 43. Puntos de masa da parte dianteira do Geo Metro. ....	40
Figura 44. Punto de masa da parte traseira do Geo Metro. ....	41
Figura 45. Ensamblaxe do Geo Metro. ....	41
Figura 46. Superficies do contacto "Surface to surface" do Geo Metro. ....	42
Figura 47. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,06$ s. ....	43
Figura 48. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,02$ s. ....	43
Figura 49. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,028$ s. ....	44
Figura 50. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,036$ s. ....	44
Figura 51. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,048$ s. ....	44
Figura 52. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,064$ s. ....	45
Figura 53. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,088$ s. ....	45
Figura 54. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,152$ s. ....	45
Figura 55. Secuencia de impacto do Geo Metro en $t=0,2$ s. ....	46
Figura 56. Estado final do Geo Metro. ....	46
Figura 57. Vista lateral do estado final do Geo Metro. ....	47
Figura 58. Vista superior do estado final do Geo Metro. ....	47
Figura 59. Vista inferior do estado final do Geo Metro. ....	47
Figura 60. Vista frontal do Geo Metro despois do ensaio real. ....	48
Figura 61. Vista lateral Geo Metro despois do ensaio real. ....	48
Figura 62. Vista inferior do Geo Metro despois do ensaio real. ....	49
Figura 63. Vista xeral do Geo Metro despois do ensaio real. ....	49
Figura 64. Ensaio real [13]. ....	51
Figura 65. Ensaio real II [13]. ....	51
Figura 66. Carga estática equivalente e carga de impacto. ....	53
Figura 67. Puntos de masa no Chevrolet Silverado C1500. ....	55
Figura 68. Puntos de masa no Geo Metro. ....	55
Figura 69. Esbozo da sección do pilar. ....	56
Figura 70. Pilar HEB-450. ....	57
Figura 71. Pilar HEB-450 mallado. ....	57
Figura 72. Chan. ....	58
Figura 73. Vista lateral da ensamblaxe do Geo Metro. ....	59



Figura 74. Ensamblaxe do Geo Metro.....	59
Figura 75. Vista lateral da ensamblaxe do Chevrolet Silverado C1500. ....	60
Figura 76. Ensamblaxe do Chevrolet Silverado C1500. ....	60
Figura 77. Velocidade do vehículo (I).....	61
Figura 78. Velocidade do vehículo (II).....	61
Figura 79. Ensamblaxe para as simulacións estáticas. ....	62
Figura 80. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en $t=0,006$ s. ....	63
Figura 81. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en $t=0,017$ s. ....	63
Figura 82. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en $t=0,03$ s. ....	64
Figura 83. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en $t=0,052$ s. ....	64
Figura 84. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en $t=0,101$ s. ....	64
Figura 85. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en $t=0.15$ s. ....	65
Figura 86. Modelo empregado para a realización da simulación estática.....	67
Figura 87. Vista lateral da simulación finalizada. ....	68
Figura 88. Vista lateral da simulación finalizada cun factor de escala de 200. ....	68
Figura 89. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en $t=0,006$ s.....	72
Figura 90. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en $t=0,026$ s.....	72
Figura 91. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en $t=0,037$ s.....	73
Figura 92. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en $t=0,056$ s.....	73
Figura 93. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en $t=0,092$ s.....	73
Figura 94. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en $t=0,12$ s.....	74

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Forza de contacto (kN) fronte ao tempo (ms) na barreira de impacto .....	20
Gráfica 2. Comparativa das curvas da forza de contacto en modelos previos a este estudo. ....	35
Gráfica 3. Gráfica da forza de contacto resultante na parede para o Chevrolet Silverado C1500 no ensaio real e na simulación. ....	35
Gráfica 4. Gráfica da forza de contacto resultante na parede para o Geo Metro no ensaio real e na simulación en Abaqus. ....	50
Gráfica 5. Desprazamento de todos os nodos do pilar. ....	65
Gráfica 6. Ampliación da Gráfica 5 no punto de máximo desprazamento. ....	66
Gráfica 7. Desprazamento de todos os nodos do pilar aplicando unha carga de 130 kN na simulación estática. ....	69
Gráfica 8. Ampliación da gráfica de desprazamentos no seu punto máximo .....	69
Gráfica 9. Desprazamento de todos os nodos do pilar ao aplicar a carga estática equivalente. ....	70
Gráfica 10. Desprazamento de 1,026 mm acadado coa forza estática equivalente. ....	70
Gráfica 11. Desprazamento de todos os nodos do pilar na simulación dinámica. ....	74
Gráfica 12. Ampliación da gráfica de desprazamentos no seu punto máximo. ....	75
Gráfica 13. Resultado final da simulación estática do Geo Metro. ....	76
Gráfica 14. Desprazamentos dos nodos do pilar durante a simulación estática do Geo Metro. ....	76
Gráfica 15. Ampliación da gráfica da simulación estática do Geo Metro no seu punto máximo. ....	77

## ÍNDICE DE TÁBOAS

Táboa 1. Unidades empregadas na simulación.....	16
Táboa 2. Datos identificativos do vehículo. ....	22
Táboa 3. Características do ordenador empregado e tempo de simulación. ....	27
Táboa 4. Datos identificativos dos Geo Metro. ....	38
Táboa 5. Características do ordenador e tempo de simulación do Geo Metro. ....	42
Táboa 6. Valores da forza estática equivalente que aporta a normativa.....	54
Táboa 7. Datos empregados para o cálculo da forza estática equivalente. ....	54
Táboa 8. Resume das características do ordenador empregado na simulación do Chevrolet Silverado C1500.....	66
Táboa 9. Comparativa de resultados co artigo de referencia. ....	71
Táboa 10. Resume das características do ordenador empregado na simulación do Geo Metro.....	75
Táboa 11. Comparación dos resultados obtidos co CTE.....	78
Táboa 12. Comparación dos resultados obtidos co Anexo C do Eurocódigo 1. ....	78

## 1 OBXECTIVO DO PROXECTO

O obxectivo do proxecto é comprobar a validez da normativa actual establecida no CTE [1] e no Eurocódigo [2] relativa a cargas de impacto en pilares de edificios producidas por vehículos, en función da tipoloxía destes.

Para elo, lévanse a cabo unha simulación dinámica e outra estática para cada un dos tipos de vehículos estudados, que son un Chevrolet Silverado C1500 e un Geo Metro. Na simulacións dinámicas estúdase o impacto do vehículo contra o pilar, mentres que nas simulacións estáticas o que se estuda é a deformación producida no pilar debido a unha carga estática equivalente á do impacto do vehículo e que está establecida na normativa consultada.

Estas simulacións realízanse empregando o método dos elementos finitos co programa informático Abaqus/CAE.

## 2 INTRODUCCIÓN AOS ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos (MEF en galego ou FEM en inglés) é un método de cálculo utilizado en diversos problemas de enxeñería, que se basea en considerar ao corpo ou estrutura dividido en elementos discretos, con determinadas condicións de vínculo entre si, xerándose un sistema de ecuacións que se resolve numericamente e proporciona o estado de tensións e deformacións. Tamén se utiliza en matemáticas como método nodal aproximado para resolver ecuacións diferenciais en forma numérica.

A base do método é a división dun medio continuo en partes máis pequenas chamadas elementos e que representan o dominio continuo do problema. Esta división resolve un problema complexo ao subdividilo en problemas máis simples, o que permite á computadora facer as tarefas con máis eficiencia.

O método propón que un número infinito de variables descoñecidas sexan substituídas por un número limitado de elementos de comportamento ben definido. Esas divisións poden ter diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre outros; dependendo do tipo e tamaño do problema.

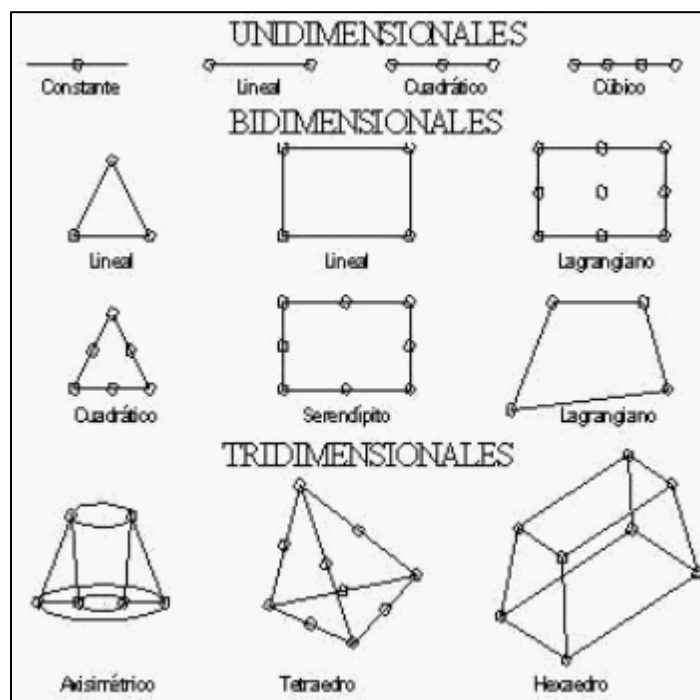


Figura 1. Tipos de elementos.

Os elementos finitos están conectados entre si por puntos que se chaman nodos ou puntos nodais. Ao conxunto de todos estes ítems – elementos e nodos – denomínaselles malla. Debido ás subdivisións da xeometría, as ecuacións matemáticas que rexen o comportamento físico non se resolverán dunha maneira exacta, se non que aproximada por este método numérico. A precisión dos métodos dos elementos finitos depende da cantidade de nodos e elementos, do tamaño e dos tipos de elementos de malla. Polo tanto, canto menor sexa o tamaño e maior o número de elementos nunha malla, máis precisos serán os resultados das análises.

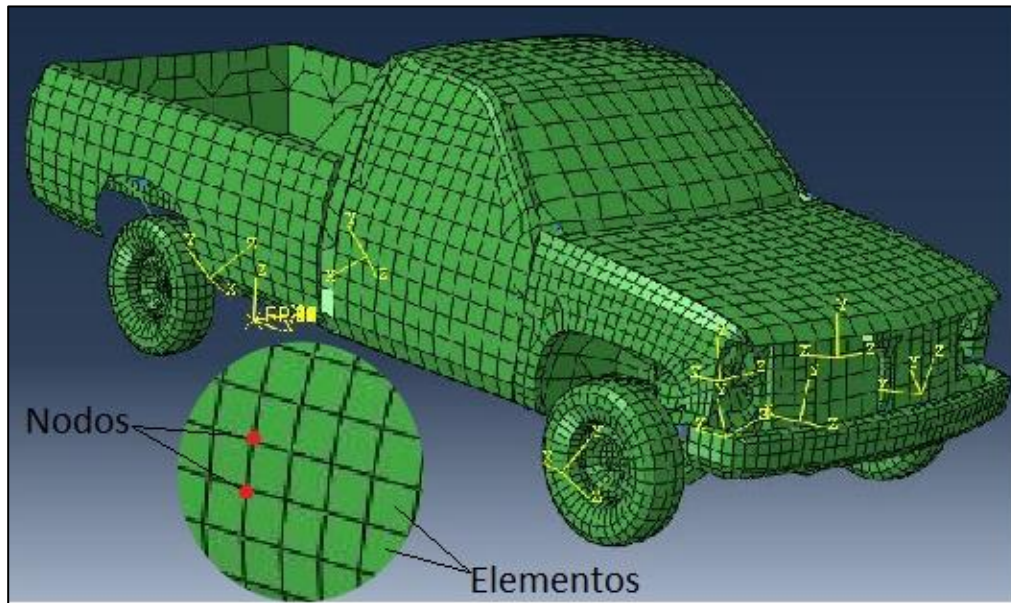


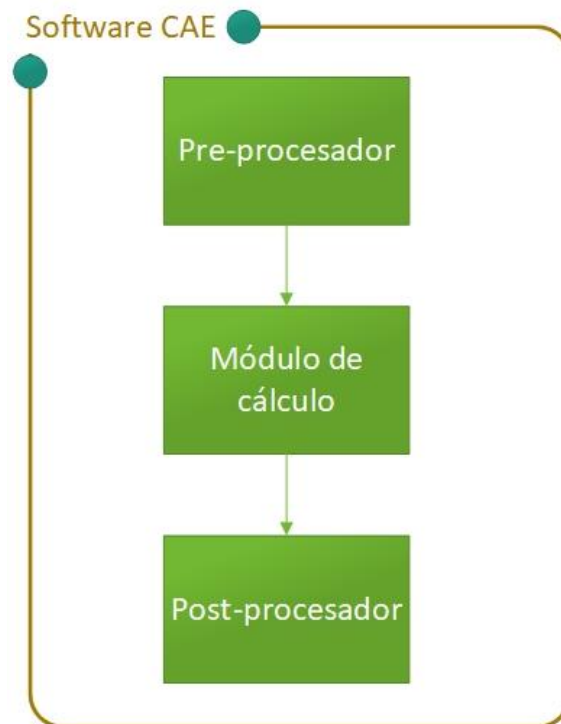
Figura 2. Diferenza entre elementos e noddos.

Este método, por novidoso que pareza, ten xa varios anos na súa forma conceptual, xa que podemos recordar as bases do cálculo diferencial e integral propostas por Isaac Newton. Sen embargo, o desenvolvemento moderno desta técnica comeza en 1940, concretamente no campo de enxeñería estrutural, onde se propuxo o uso de liñas nunha dimensión para representar elementos como barras ou vigas para o cálculo de esforzos en sólidos con sección transversal continua.

O desenvolvemento deste método está claramente ligado aos métodos computacionais de cálculo que se veñen dando dende as décadas finais do século XX. Neste período de tempo xurdiron un gran número de técnicas que permitiron a resolución de problemas de enxeñería, que anteriormente solucionábanse mediante métodos iterativos que debían ser resoltos a man.

Tódolos programas de resolución do MEF a ordenador constan de tres partes fundamentais: un pre-procesador, o propio módulo de cálculo de elementos finitos e un post-procesador

- **Pre-procesador:** é onde se definen a xeometría, a malla, as condicións de contorno, os materiais, as interaccións...
- **Módulo de cálculo:** nel xenáranse as ecuacións que definen o modelo e resólvense as incógnitas correspondentes mediante un algoritmo de resolución de sistemas de ecuación lineais. En problemas dependentes do tempo faise unha sucesión destes sistemas e resólvense un a continuación do outro.
- **Post-procesador:** permite a visualización dos resultados obtidos.



**Figura 3. Diagrama de programa computacional de elementos finitos.**

Hoye en día existen unha gran variedade de programas de ordenador para a aplicación do método dos elementos finitos, como poder ser o caso de SolidWorks ou NX entre moitos outros. Sen embargo, para a realización deste TFM utilizarase o programa Abaqus/CAE.

En Abaqus/CAE o modelo de elementos finitos xérase no Pre-procesador, habitualmente sobre a base dunha xeometría CAD ou sobre unha malla orfa; sen xeometría CAD asociada, tal e como se realiza neste traballo. Unha vez obtido o modelo, Abaqus realiza os cálculos a través do módulo de cálculo correspondente, Abaqus-Standard ou ben Abaqus-Explicit, dependendo dos requirimentos do modelo en cuestión, e finalmente representa de forma gráfica os resultados desexados no Post-procesador.

Para as simulacións levadas a cabo neste proxecto utilízase o módulo Abaqus-Explicit. Este módulo é un módulo de elementos finitos de dinámica explícito. O procedemento de análise dinámico explícito en Abaqus/Explicit baséase na aplicación dunha regra de integración explícita xunto co uso de matrices diagonais de masa.

O procedemento explícito dinámico realiza un gran número de pequenos incrementos de tempo de maneira eficiente, xa que se utiliza unha regra de integración central explícita no diferencial de tempo. Cada incremento é relativamente pouco custoso en comparación coa integración directa (procedemento de análise dinámico dispoñible en Abaqus-Standard), xa que non hai unha solución para un conxunto de ecuacións simultáneas.

Abaqus-Explicit é un módulo recomendado para simular eventos transitorios dinámicos, tales como o choque dun automóbil, un impacto balístico, etc. A gran capacidade de Abaqus-Explicit para manexar eficazmente o comportamento non lineal severo fai que sexa ideal para simular problemas nos cales o contacto adquire un papel relevante.

Abaqus, ao igual que gran maioría de programas de elementos finitos, non ten definidas unhas unidades por defecto, polo que será necesario definilas antes de comezar as

simulacións. No caso deste traballo, as unidades elixidas son as que se mostran na seguinte táboa:

**Táboa 1. Unidades empregadas na simulación.**

Lonxitude	mm
Masa	Tn
Tempo	s
Forza	N
Tensión	MPa



### 3 VALIDACIÓN DOS MODELOS

Antes de realizar as simulacións do impacto dos vehículos contra o pilar dun aparcadoiro co obxectivo de comprobar a validez das normativas españolas e europeas actuais, faise necesario validar os modelos empregados para asegurarse de que os resultados obtidos son adecuados para extraer unhas conclusións correctas.

Esta validación lévase a cabo realizando as simulacións do impacto dos vehículos contra unha parede ríxida, xa que existen dispoñibles datos de ensaios reais destes impactos, que foron desenvolto pola NHTSA [3].

A validación dos modelos realízase mediante unha comparación da forza de contacto entre o vehículo e a parede cos obtidos nos ensaios reais e os valores calculados nas simulacións.

#### 3.1 Validación do Chevrolet Silverado C1500

##### 3.1.1 Antecedentes: ensaio real

A NHTSA e outras institucións colaboradas coma a NCAC levaron acabo numerosos ensaios reais de impacto de vehículos contra estruturas, polo que, para a realización da validación do modelo do Chevrolet Silverado C1500, tómase como referencia o ensaio inscrito co número de test 1741. Os detalles deste ensaio, que se realizou en 1994, están dispoñibles na páxina web da NHTSA e son accesibles para todo o mundo [3].

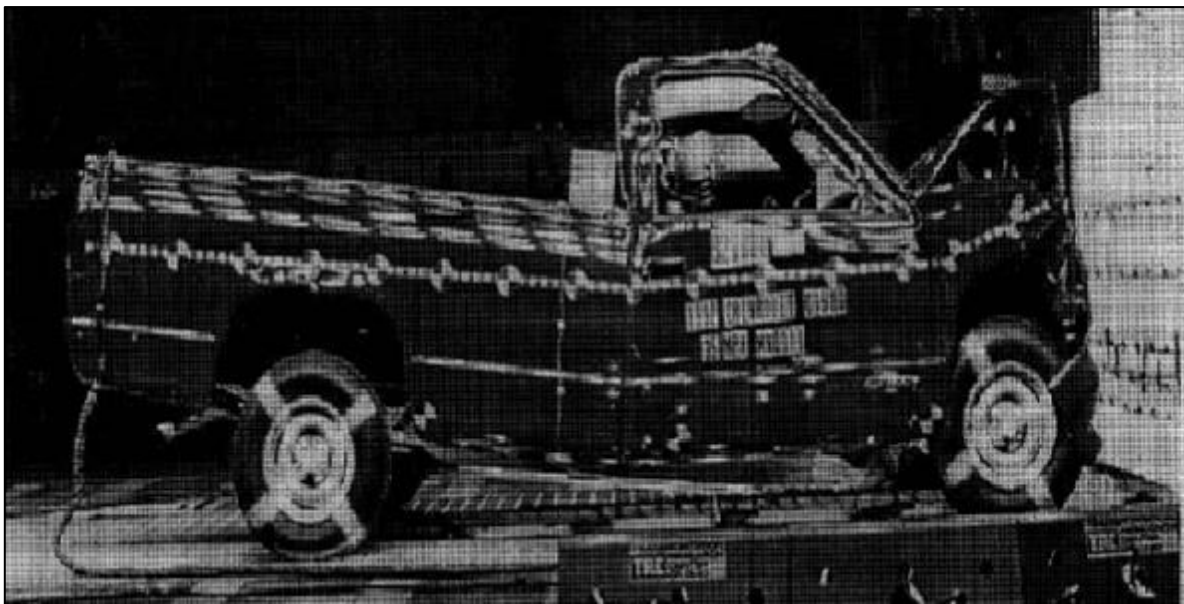
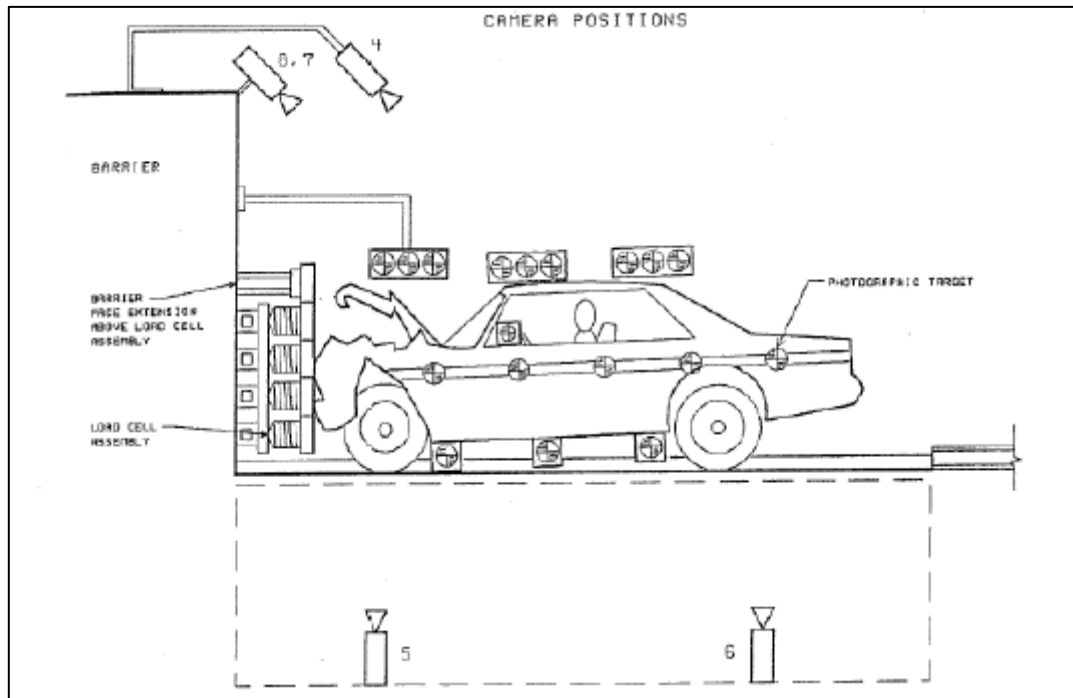


Figura 4. Ensaio real do Chevrolet Silverado C1500.

Finalmente, dispónse dun artigo de investigación realizado na Universidade de Manchester [4], no cal se realiza unha validación dun modelo de elementos finitos do vehículo Chevrolet empregado no test, que tamén se usará para valorar obxectivamente o traballo levado a cabo. Ademais, outros autores xa realizaron traballos similares relativos ao estudo do impacto dun vehículo [5], [6] y [7].

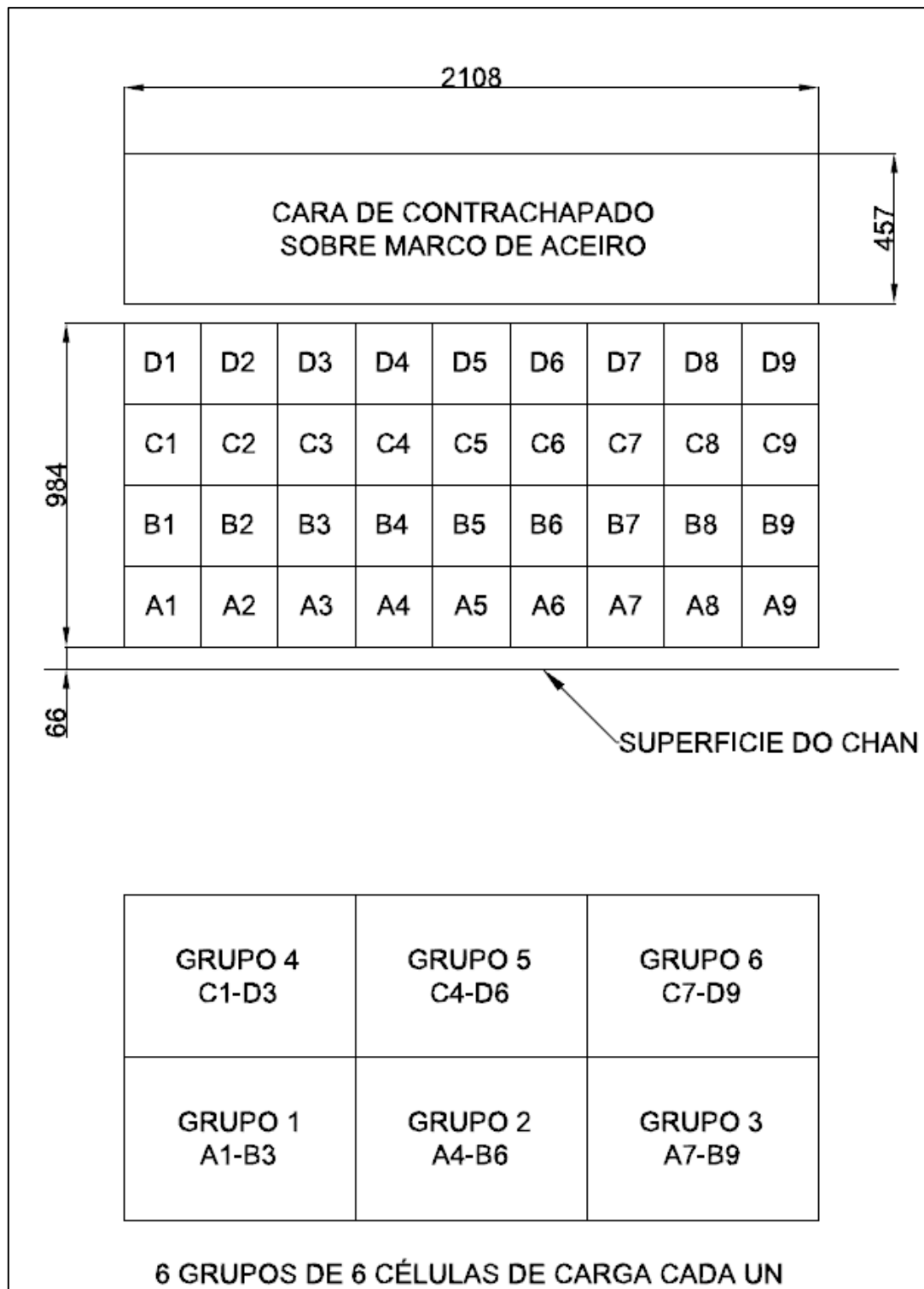
Para a validación do modelo empregárase o criterio usado no artigo de Al-Thairy, que está baseado na reprodución e comparación da curva de forza de contacto fronte a tempo no contacto frontal que se produce a causa do impacto contra a parede ríxida.

Os datos que desprende o ensaio real respecto a esta forza de contacto foron obtidos no seu día mediante o uso dunhas células de carga situadas na parede ríxida contra a que impacta o vehículo a unha velocidade de 55,8 km/h. A montaxe empregado pódese ver na Figura 5.



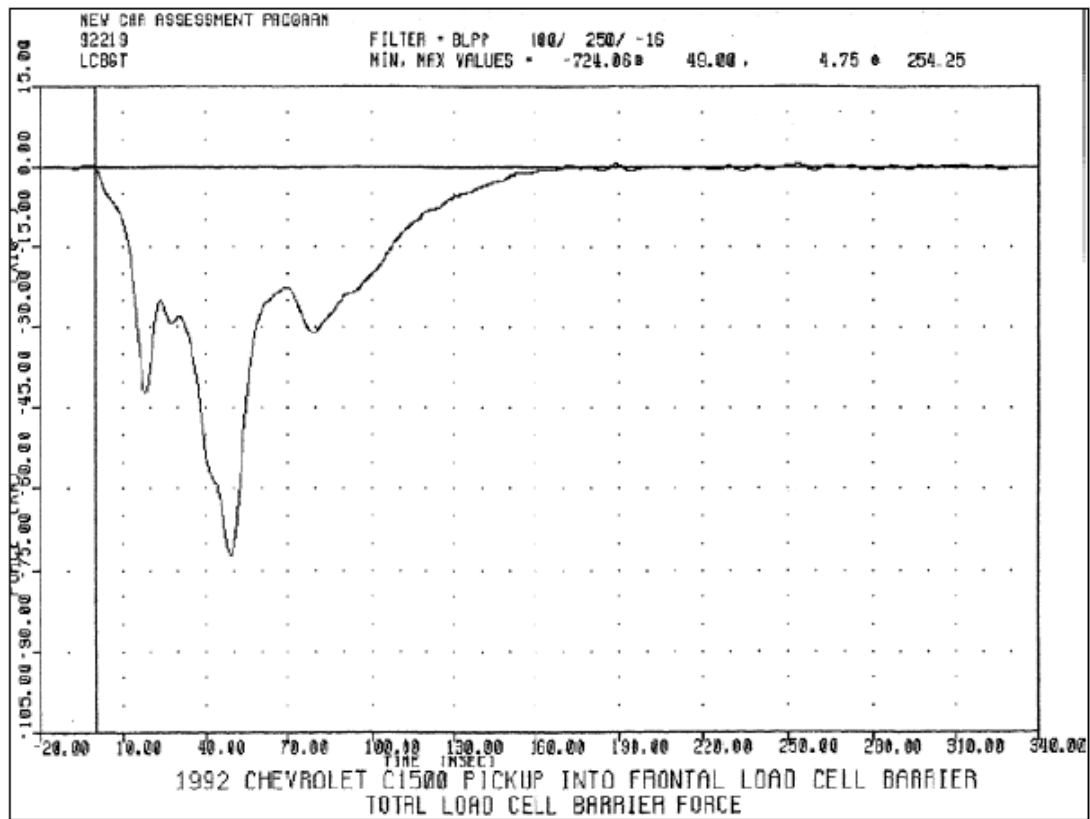
**Figura 5. Montaxe para a realización do test.**

As células de carga empregadas para medir a forza que soporta a parede durante o impacto distribuíanse coherentemente nunha barreira rectangular lixeiramente separada do chan que abarca toda a superficie frontal do automóbil. Na Figura 6 amósase a distribución en 4 filas e 9 columnas das 36 células de carga empregadas.



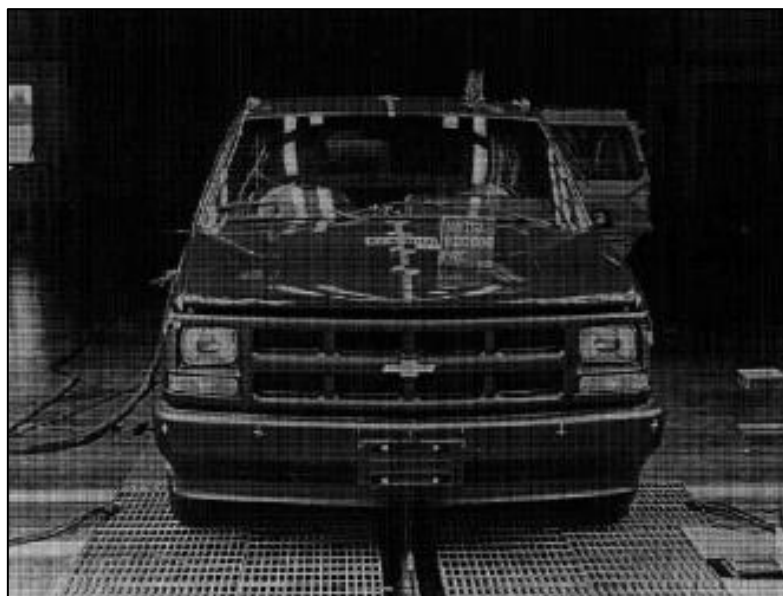
**Figura 6. Situación das células de carga sobre a barreira.**

Onde a magnitude total da forza de contacto obtense do sumatorio de todos os valores recollidos por ditas células. Na gráfica 1, presente tamén no informe do test da NTHSA, pódese observar a súa evolución temporal.



**Gráfica 1. Forza de contacto (kN) fronte ao tempo (ms) na barreira de impacto**

Respecto ao vehículo empregado no ensaio real, na Táboa 2 amósanse os datos identificativos relativos ao mesmo.



**Figura 7. Frontal do Chevrolet Silverado C1500.**



Figura 8. Parte posterior do Chevrolet Silverado C1500.

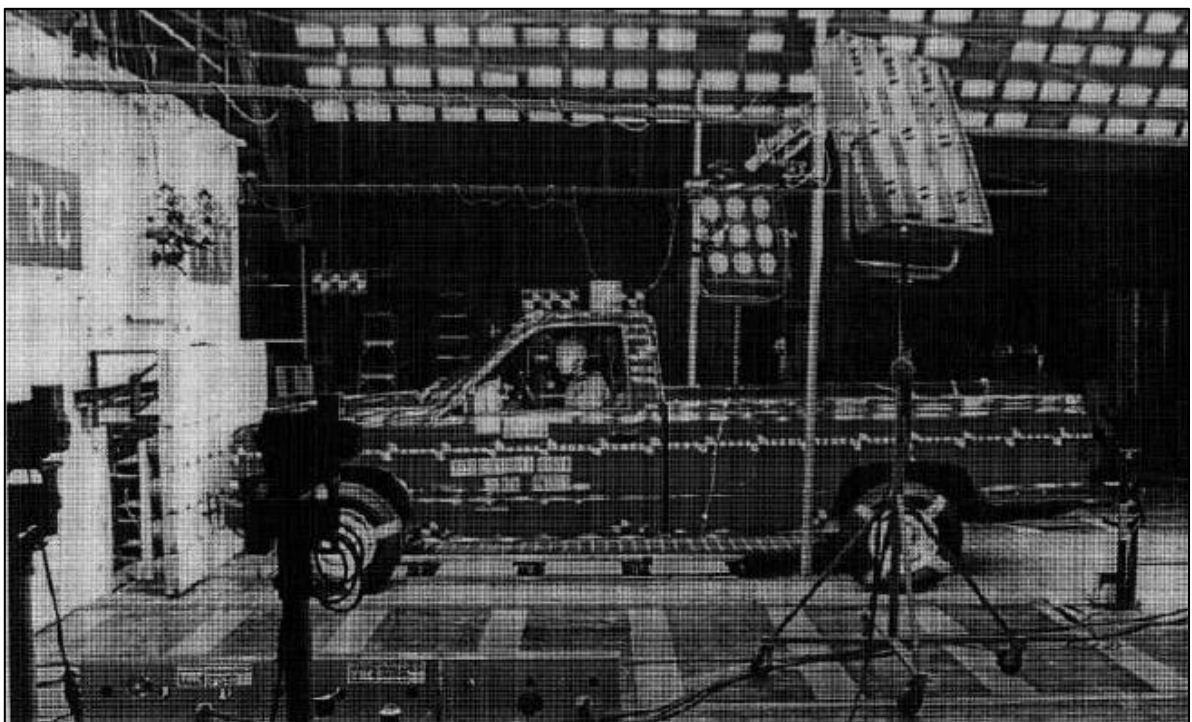


Figura 9. Lateral esquerdo do Chevrolet Silverado C1500.

Táboa 2. Datos identificativos do vehículo.

VEHICLE MANUFACTURER: General Motors Corporation			
MAKE/MODEL: Chevrolet/C1500	VIN: 1GCDC14Z9NE198224		
BODY STYLE: pickup	MODEL YEAR: 1992		
NHTSA NO.: MN0111	COLOR: Red		
ENGINE DATA: TYPE: Inline	CYLINDERS: 6	DISPLACEMENT: 4.3 liter	
TRANSMISSION DATA: <u>4</u> SPEED, ___ MANUAL, <u>X</u> AUTOMATIC, ___ FWD, <u>X</u> RWD, ___ 4WD			
DATE VEHICLE RECEIVED: 07/24/92	ODOMETER READING: 88.5		
DEALER'S NAME AND ADDRESS: Bill Swad Chevrolet, Inc. 100 South Hamilton Rd. Columbus, OH 43213			
<u>ACCESSORIES:</u>			
POWER STEERING	Yes	AUTOMATIC TRANSMISSION	Yes
POWER BRAKES	Yes	AUTOMATIC SPEED CONTROL	No
POWER SEATS	No	TILTING STEERING WHEEL	No
POWER WINDOWS	No	TELESCOPING STEERING WHEEL	No
TINTED GLASS	Yes	AIR CONDITIONING	No
RADIO	No	ANTI-SKID BRAKE	Rear only
CLOCK	No	REAR WINDOW DEFROSTER	No
OTHER	None		

Cabe destacar que a masa declarada do vehículo á hora de realizar o test resultou ser 2023 kg.

### 3.1.2 Modelo inicial do vehículo

O modelo de elementos finitos do que se parte está realizado no programa Ls-Dyna e estaba dispoñible na páxina web da NCAC, a cal xa non existe. Sen embargo, pódese recorrer a outro enlace [8] onde están dispoñibles varios modelos de vehículos. Este modelo é unha malla de elementos finitos orfa, é dicir, non ten unha xeometría CAD asociada.

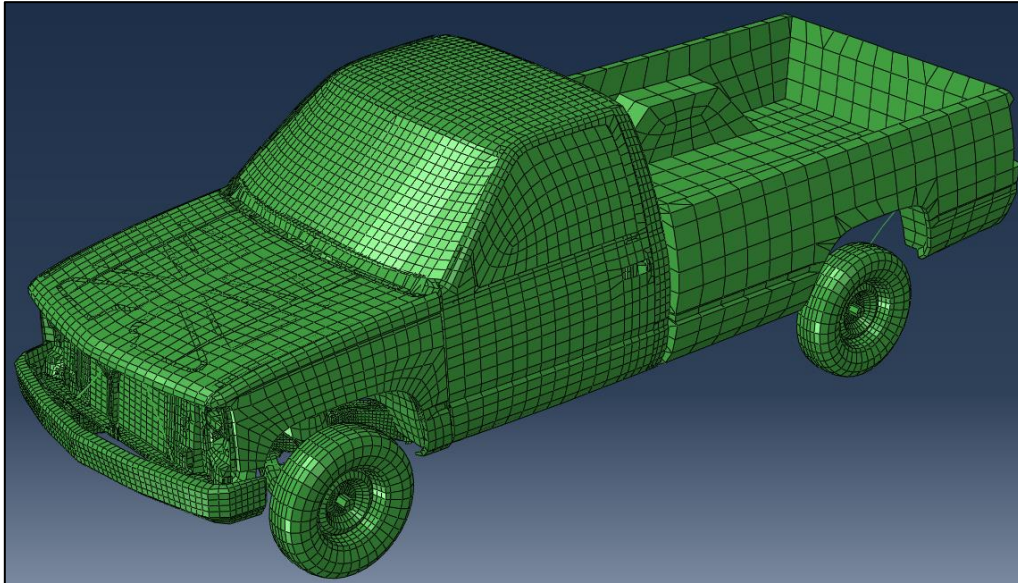


Figura 10. Modelo de elementos finitos do Chevrolet Silverado C1500.

```
NUMBER OF ELEMENTS IS                54965
NUMBER OF NODES IS                    62865
NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER  62435
NUMBER OF INTERNAL NODES GENERATED BY THE PROGRAM  430
TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL 358789
(DEGREES OF FREEDOM PLUS MAX NO. OF ANY LAGRANGE MULTIPLIER
VARIABLES. INCLUDE *PRINT,SOLVE=YES TO GET THE ACTUAL NUMBER.)
```

Figura 11. Datos do modelo do Chevrolet Silverado C1500.

O arquivo baixado, ao estar modelado en Ls-Dyna, ten a extensión .key, sen embargo, para poder importalo a Abaqus é necesario converter este arquivo a .inp. Durante este proceso de conversión, algunhas propiedades dos materiais vense afectadas.

O problema das propiedades dos materiais resólvese modificando o código do propio arquivo .inp con un programa tipo Notepad++, xa que neste caso as únicas alteracións que se producen son a mala importación dos datos que aparecen en notación científica no código do arquivo .key.

```
*Material, ,Name=M10;MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITYCRLE
**CRLE
*DensityCRLE
...1.8900000e+00,CRLE
**CRLE
*ElasticCRLE
...2.1000000e+00, ...3.0000000e-01CRLE
**CRLE
*PlasticCRLE
...0.0000000e+00, ...0.0000000e+00, CRLE
...2.7039999e+02, ...1.3490000e+00, CRLE
...3.2029999e+02, ...4.8790000e-02, CRLE
...3.6629999e+02, ...9.5310000e-02, CRLE
...4.0250000e+02, ...1.3980000e-01, CRLE
...4.3879999e+02, ...2.2310000e-01, CRLE
...4.3979999e+02, ...2.6240000e-01, CRLE
...4.4079999e+02, ...1.0000000e+01CRLE
```

Figura 12. Propiedades dos materiais sen modificar.

```
*Material, Name=M10;MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY**CRLE
**CRLE
*DensityCRLE
...7.8900000e-09, CRLE
**CRLE
*ElasticCRLE
...2.1000000e+05, ...3.0000000e-01CRLE
**CRLE
*PlasticCRLE
...2.7000000e+02, ...0.0000000e+00, CRLE
...4.5179999e+02, ...3.9920000e-03, CRLE
...5.1509998e+02, ...1.1930000e-02, CRLE
...5.3040002e+02, ...3.9220000e-02, CRLE
...5.4040002e+02, ...5.8270000e-02, CRLE
...5.4540002e+02, ...9.5310000e-02, CRLE
...5.5040002e+02, ...2.3980000e+00CRLE
```

Figura 13. Propiedades dos materiais modificadas.

Para igualar as condicións do ensaio real, faise necesario engadir masa ao vehículo, xa que o modelo ten unha masa de 1.640 kg. Polo tanto, engádense dous puntos de masa, de 80 kg cada un deles, nos asentos da parte dianteira de maneira que simulen a presenza de dous ocupantes. Ademais, tamén é necesario engadir un punto de masa na parte traseira do vehículo para que simule o transporte dunha carga. Este último punto de masa é de 223 kg. Desta maneira, obtéñense os 2023 kg que se declarou que tiña o vehículo no momento do ensaio real.

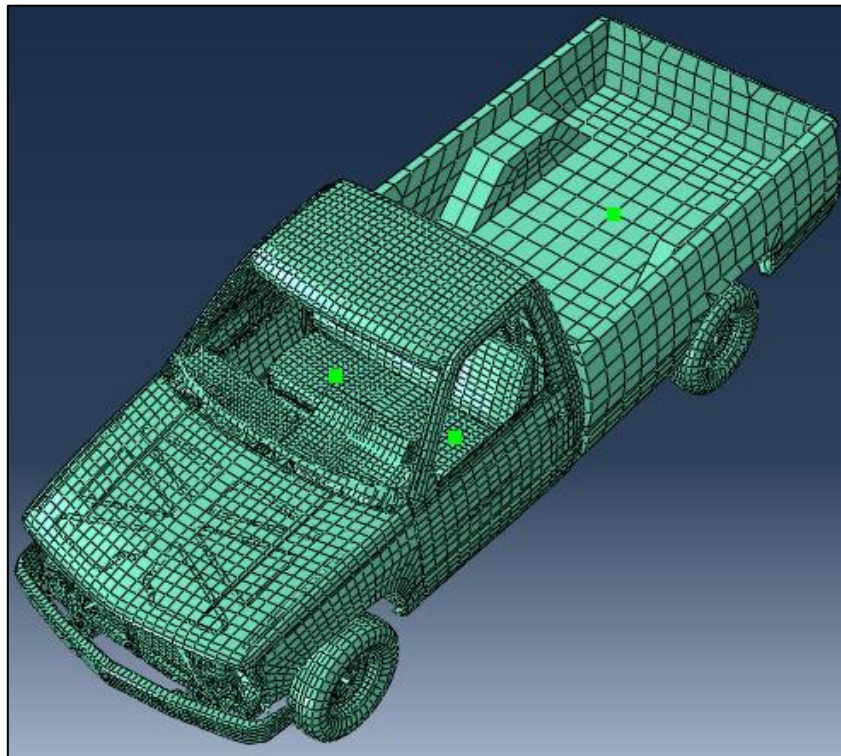


Figura 14. Puntos de masa engadidos ao Chevrolet Silverado C1500.

### 3.1.3 Simulación do impacto frontal

Para levar a cabo a simulación do impacto frontal do vehículo é necesario realizar a ensamblaxe das seguintes partes, tal e como mostra na Figura 15.



- Vehículo.
- Pared ríxida analítica vertical.
- Pared ríxida analítica horizontal.

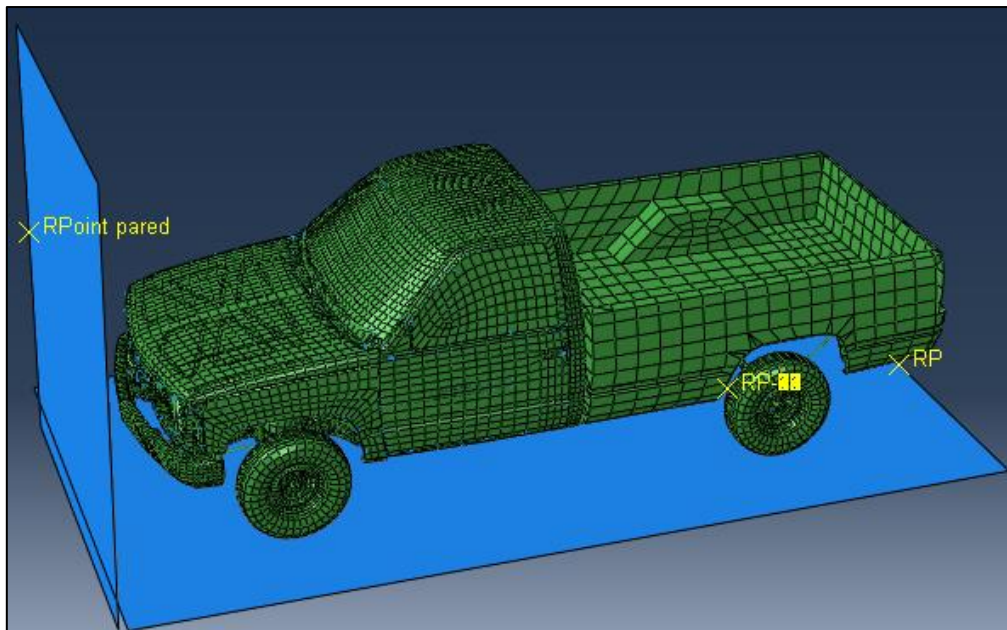


Figura 15. Ensamblaxe do Chevrolet Silverado C1500.

A continuación, procédese a definir o contacto entre os diferentes compoñentes que forman a ensamblaxe. En primeiro lugar defínense as propiedades do contacto, que neste caso trátase dun contacto normal do tipo “Hard Contact” e un contacto tanxencial con coeficiente de fricción 0,3. Esta formulación de contacto é similar á empregada no artigo de investigación [9].

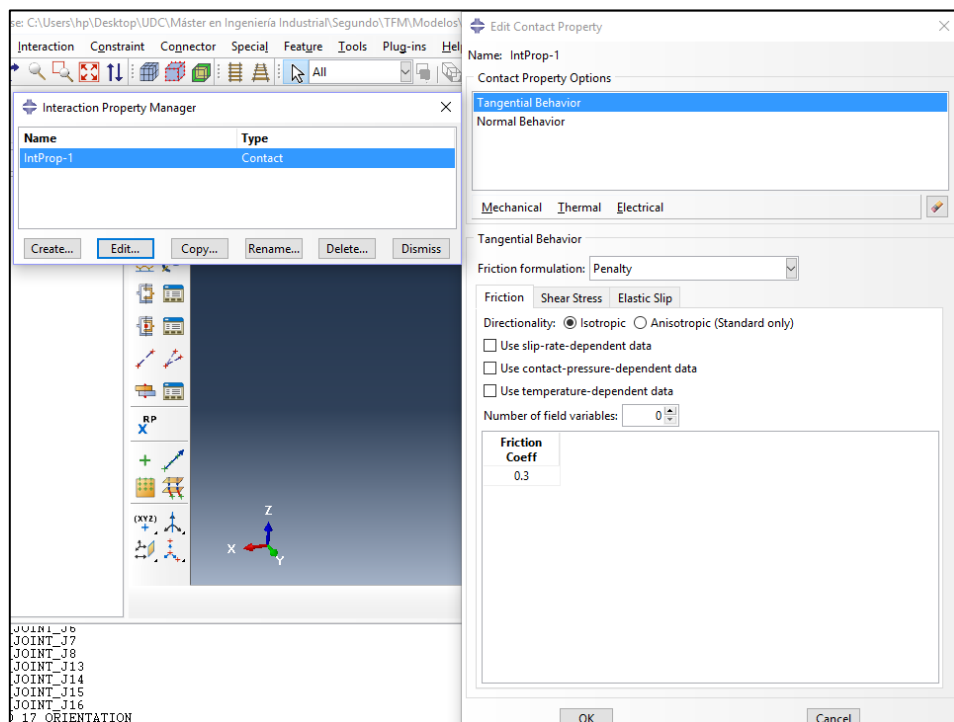


Figura 16. Definición do contacto tanxencial.

Unha vez definidas as propiedades do contacto, hai que crear as interaccións correspondentes entre elementos. Polo xeral, é suficiente definir unha interacción de tipo "General contact".

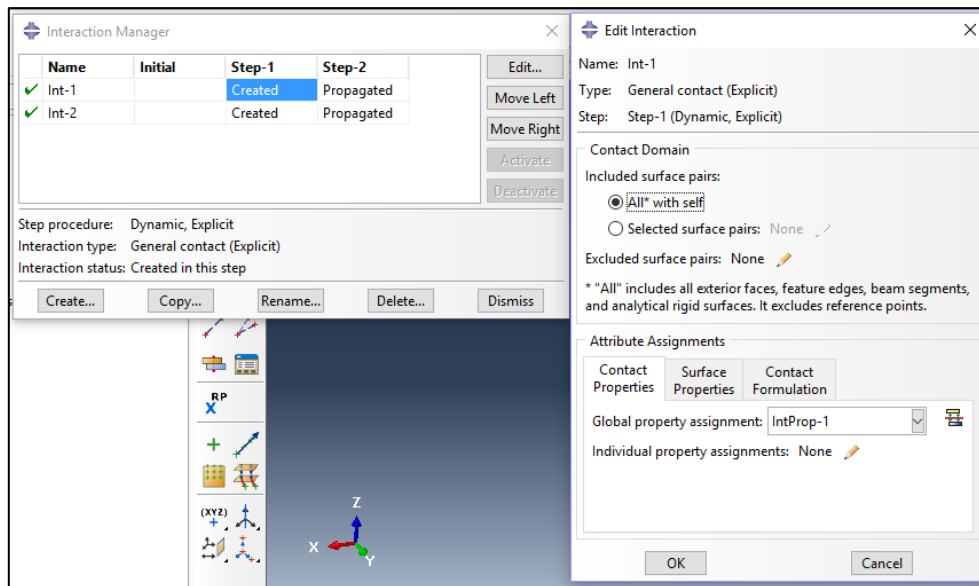


Figura 17. Definición do "General contact".

Sen embargo, neste caso, debido a que se está a traballar cunha paraxe analítica débese definir unha segunda interacción "Surface to surface", seleccionando como superficie escrava as partes do coche que interaccionan contra a parede e como superficie mestra a propia parede. Desta forma pódense obter resultados relativos á forza de contacto na parede, os cales se empregarán máis adiante para a validación do modelo.

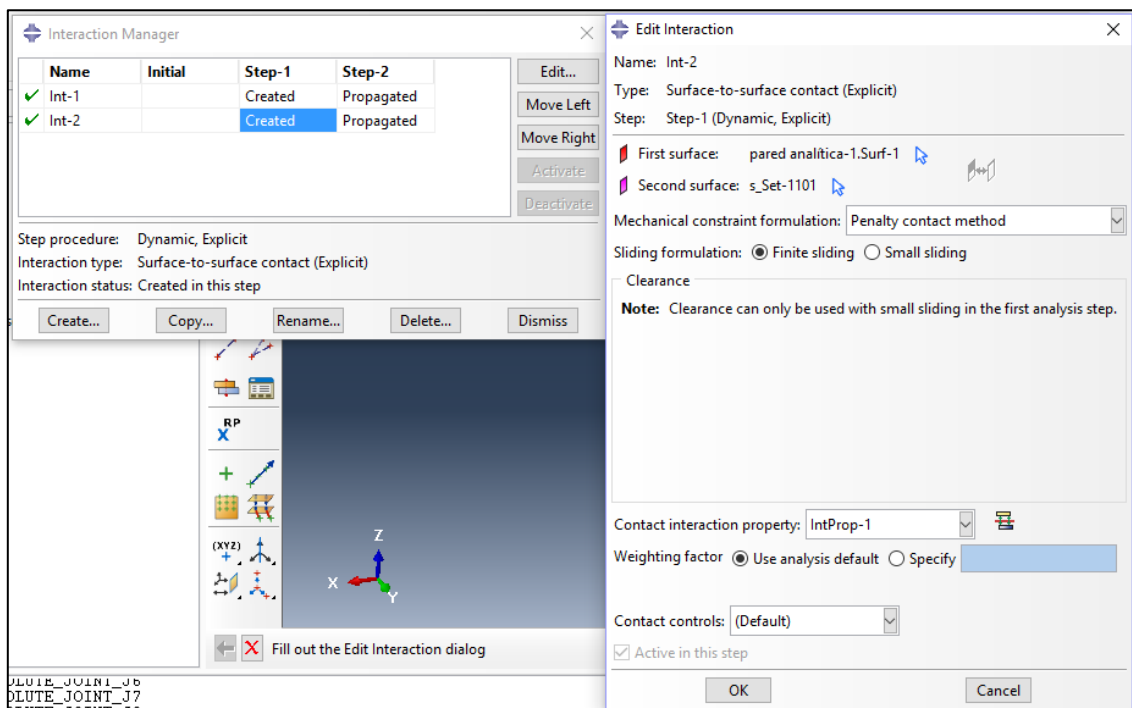
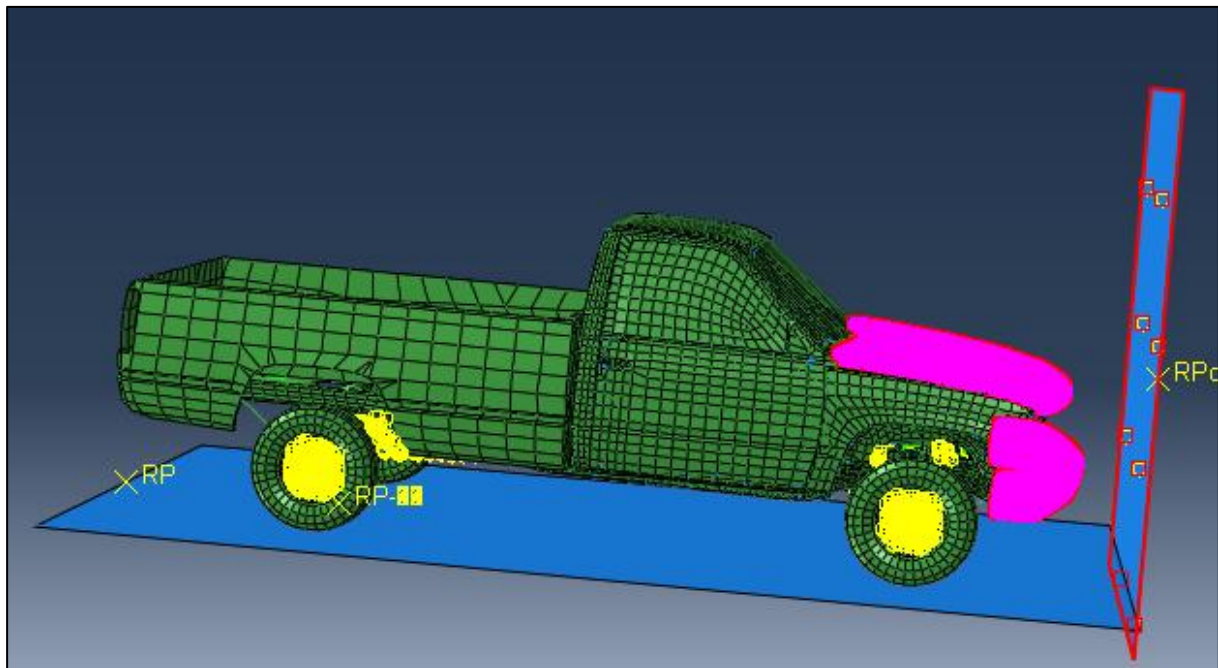


Figura 18. Definición do "Surface to surface contact".



**Figura 19. Puntos seleccionado para o "Surface to surface contact".**

Finalmente, o pre-procesado termina engadindo a velocidade do vehículo, 15500 mm/s, e dicir, 55,8 km/h, na dirección X positiva. Esta velocidade aplícase coa ferramenta campo predefinido (Create Predefined Field), posto que é máis adecuado para este tipo de ensaios que introducila como unha condición de contorno –de ser así, deberíase introducir a velocidade como 2 condicións de contorno (BCs) en 2 pasos (Steps): O primeiro con velocidade ata que se produce contacto coa parede e o segundo con velocidade nula a partir dese momento-. Ademais, tamén se aplica a gravidade sobre todo o sistema ( $9819 \text{ mm/s}^2$ ) na dirección Z negativa.

Unha vez finalizado todos estes proceso, lánzase o traballo (Job) para o cálculo do modelo. Para este cálculo empréganse dos pasos de tempo (steps), do tipo Dynamic Explicit, de duración 0.04 e 0.16 segundos respectivamente.

Na seguinte táboa amósanse os datos máis significativos do ordenador empregado para a simulación e o tempo necesario para levala a cabo.

**Táboa 3. Características do ordenador empregado e tempo de simulación.**

Modelo	HP Pavilion Notebook
Sistema operativo	Windows 10 Home 64 bits
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-6500 CPU @ 2.50GHz 2.59GHz
RAM	8,00 GB (7,89 GB utilizable)
Tarxeta gráfica	NVIDIA GeForce 940MX
Versión de Abaqus/CAE	6.14-5
Tempo de simulación	3 horas e 6 minutos.

### 3.1.4 Secuencia do impacto

Dende a Figura 20 ata a Figura 28 obsérvase a secuencia correspondente ao impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 contra a parede, coas tensións de Von Mises representadas sobre os elementos.

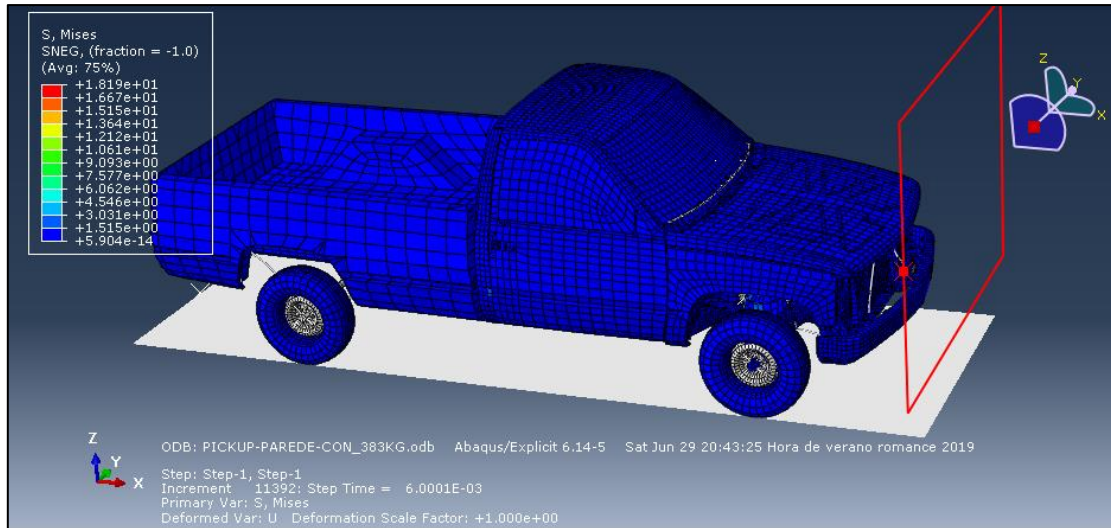


Figura 20. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en  $t=0,006$  s.

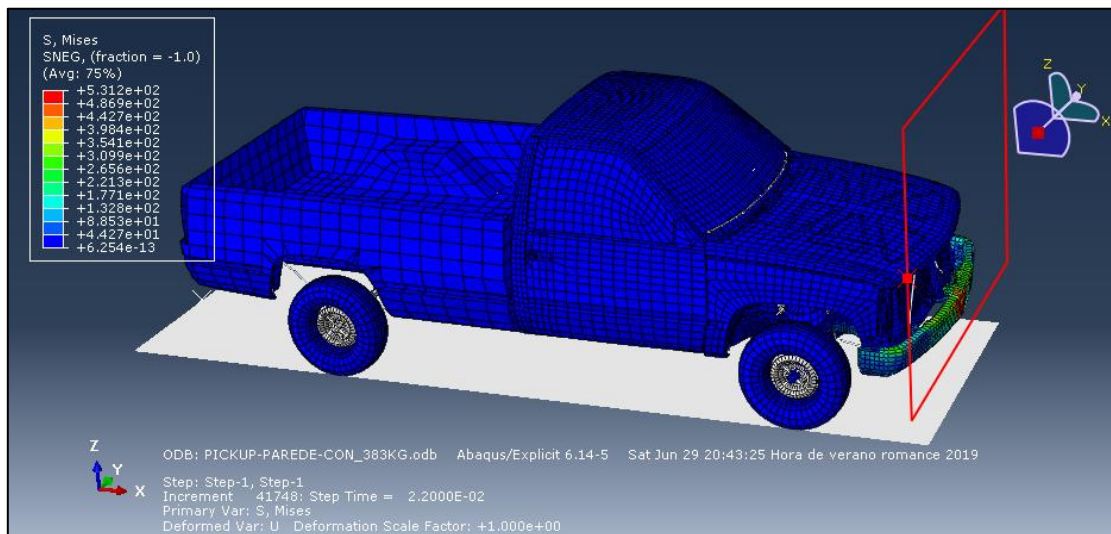


Figura 21. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en  $t=0,022$  s.

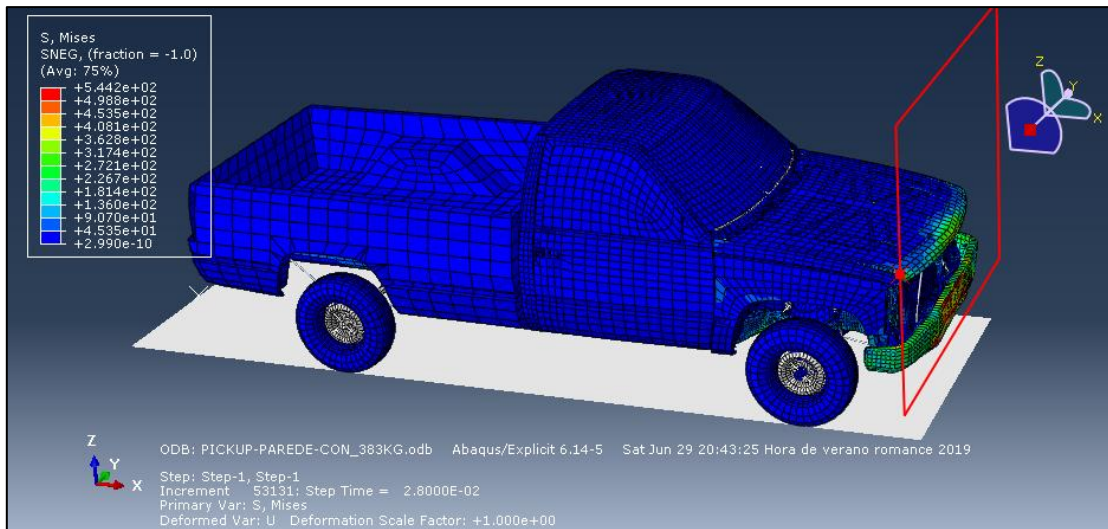


Figura 22. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en t=0,028 s.

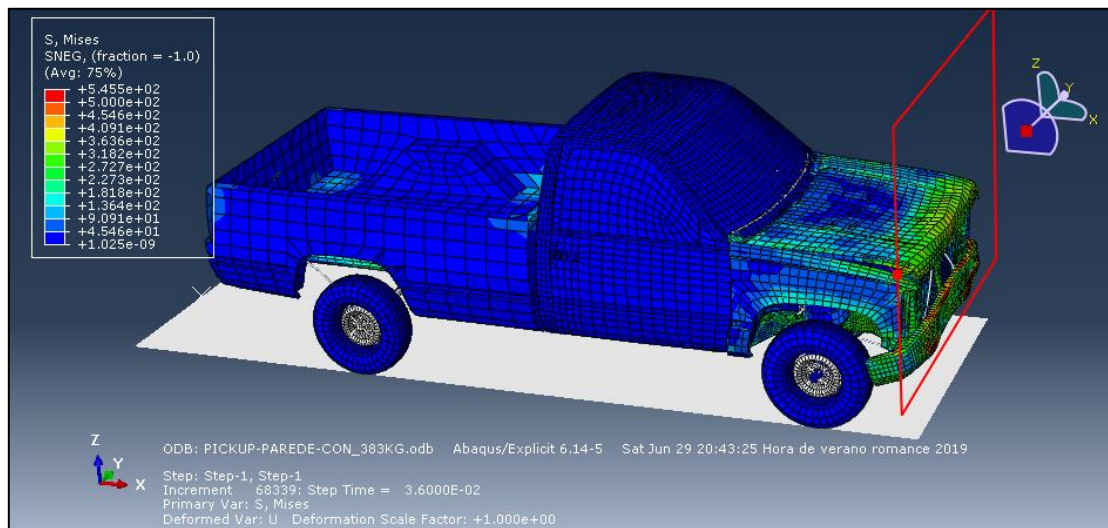


Figura 23. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en t=0,036 s.

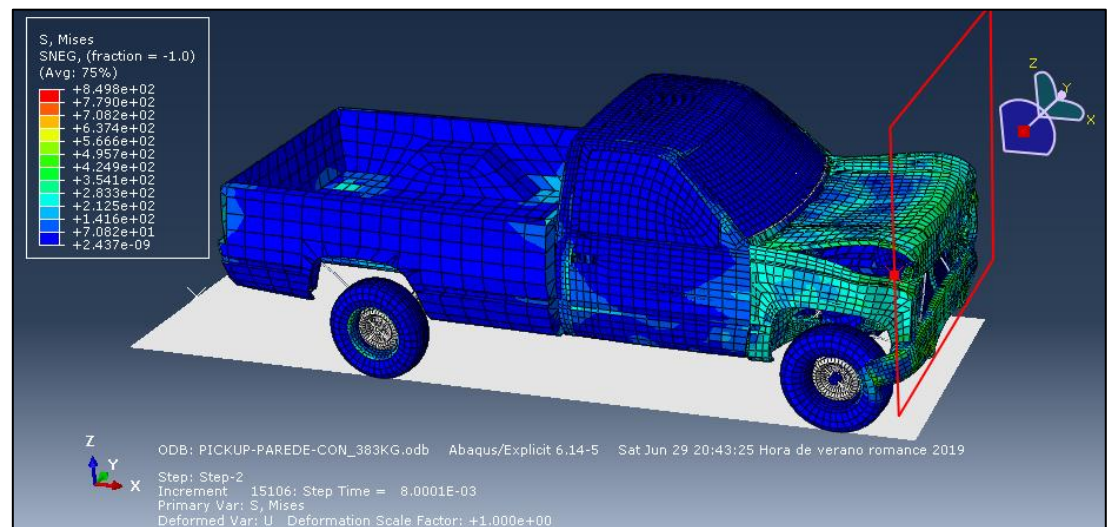


Figura 24. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en t=0,048 s.

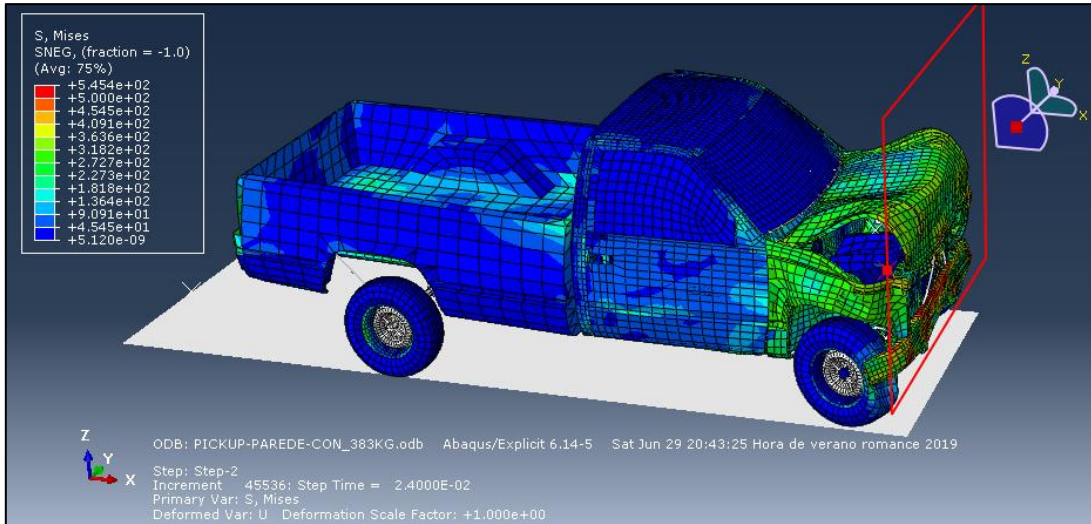


Figura 25. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en  $t=0,064$  s.

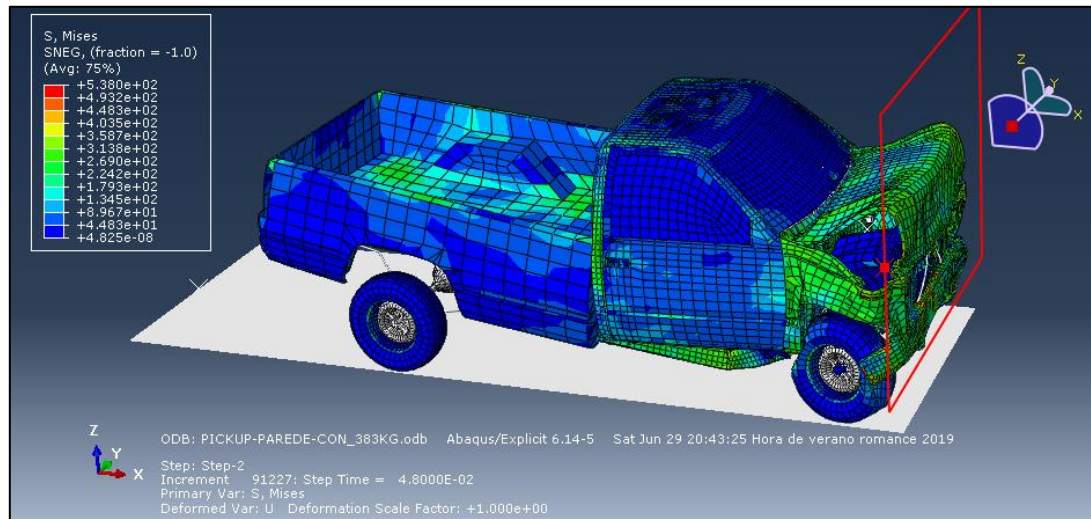


Figura 26. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en  $t=0,088$  s.

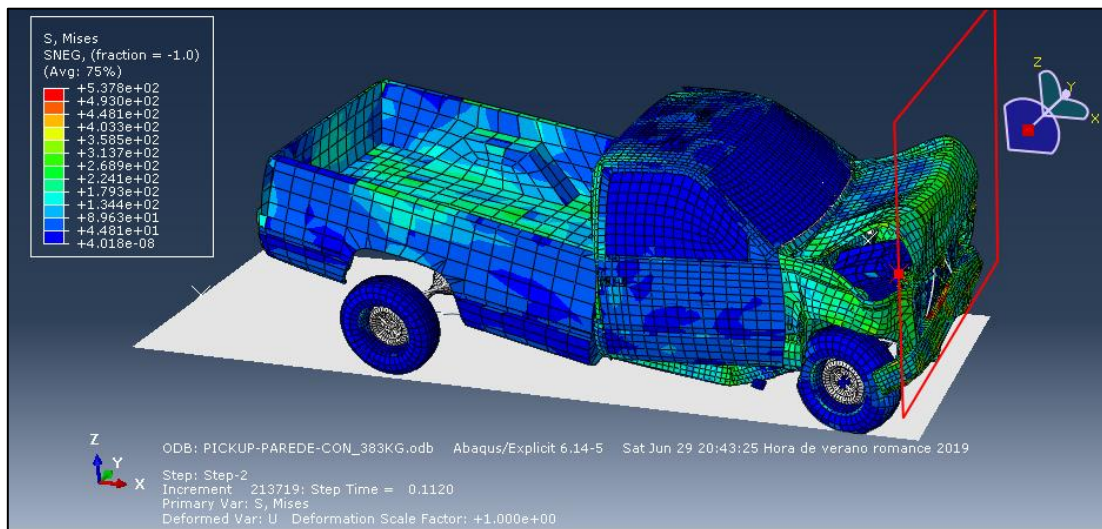


Figura 27. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en  $t=0,152$  s.

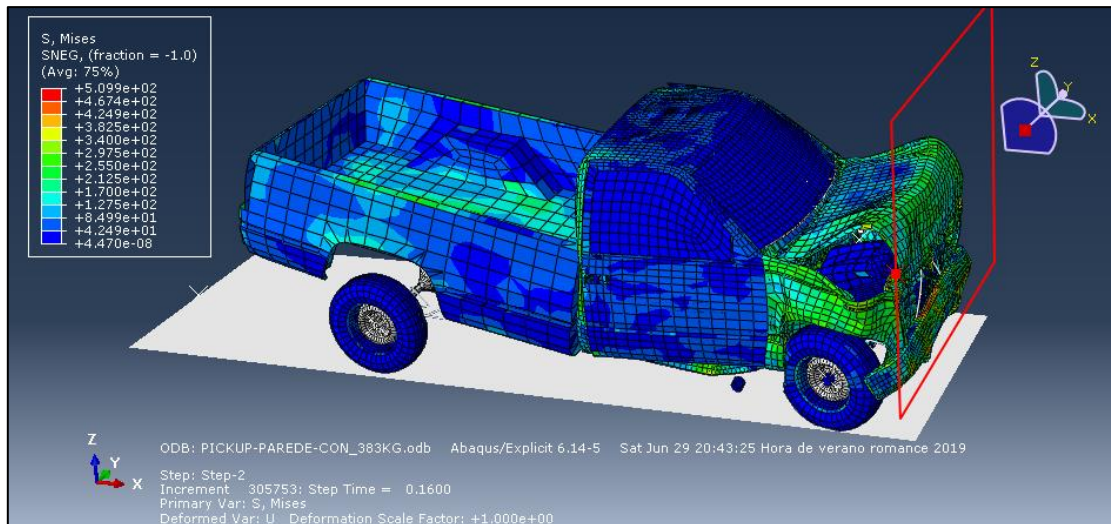


Figura 28. Secuencia do impacto frontal do Chevrolet Silverado C1500 en  $t=0,2$  s.

Na Figura 20 vese ao vehículo avanzar cara á parede ríxida cunha velocidade de 15500 mm/s. O primeiro contacto, que se pode apreciar na Figura 21, prodúcese coa superficie da defensa, que se vai deformando segundo vai avanzado o impacto. Máis adiante, prodúcese o contacto do capó e o motor coa parede (Figuras 24 e 25). Seguidamente, prodúcese a plastificación de certos elementos como o capó e as aletas, os cales sofren grandes deformacións, tal e como se pode observar na Figura 26 e na Figura 27.

Finalmente, na Figura 28, pódese ver o vehículo ao final da análise, en proceso de alcanzar unha posición de repouso tras o rebote.

### 3.1.5 Estado final do vehículo

Unha vez sufrido o impacto e xa en fase de rebote, o estado do vehículo é o que se amosa dende a Figura 29 ata a 31.

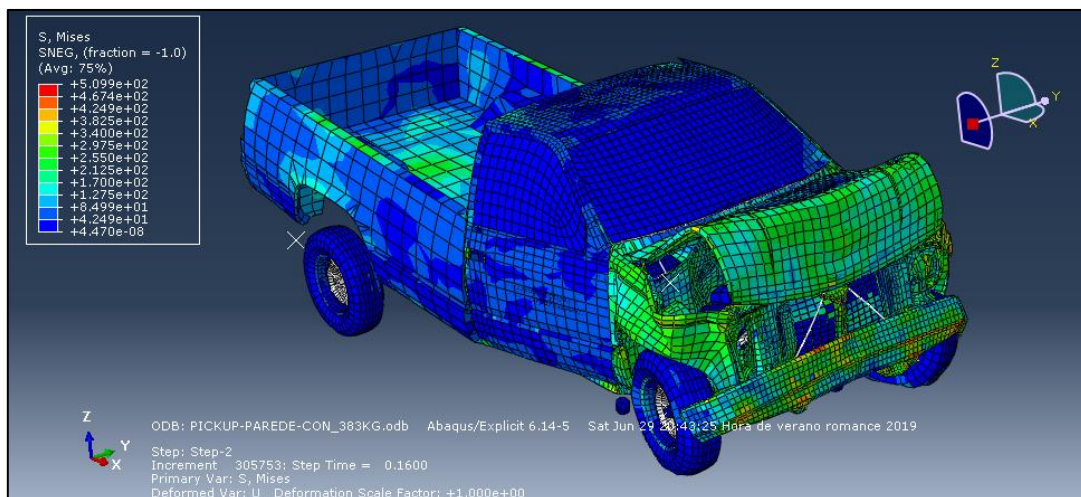
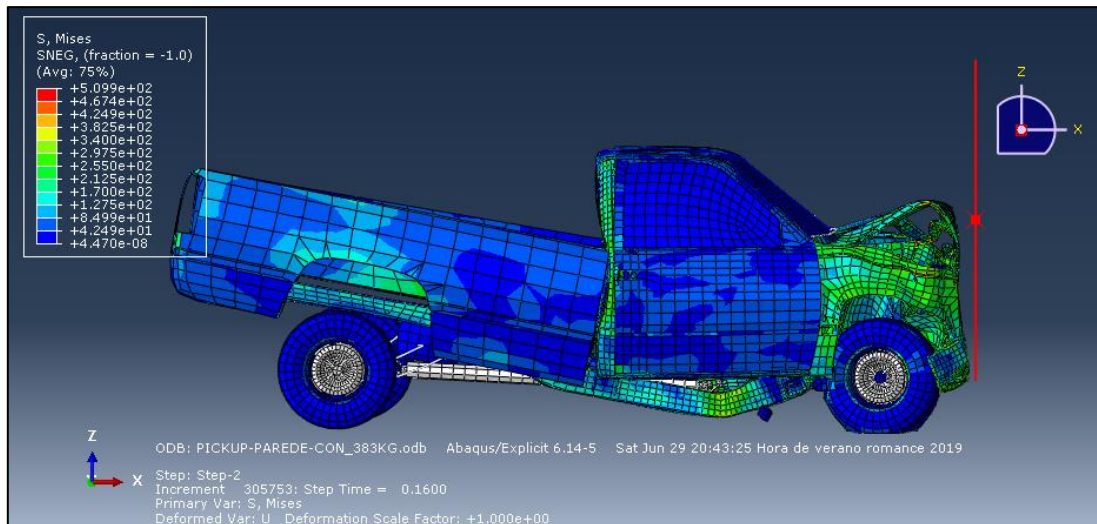
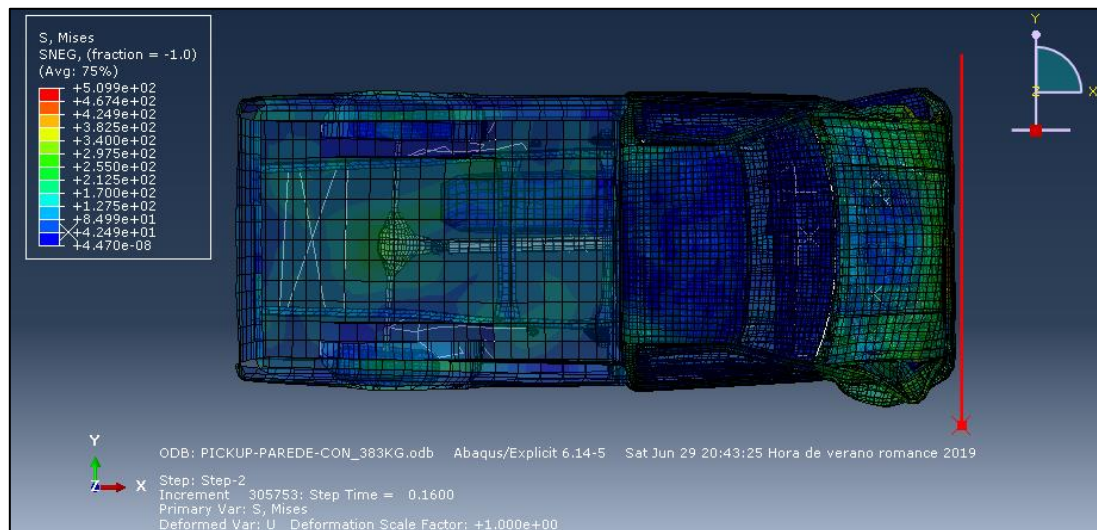


Figura 29. Estado final do Chevrolet Silverado C1500.



**Figura 30. Vista lateral do estado final do Chevrolet Silverado C1500.**



**Figura 31. Vista superior do estado final do Chevrolet Silverado C1500.**

Con estas imaxes pódese facer unha comparación a simple vista do estado final do vehículo na simulación e o estado final do vehículo no ensaio real realizado pola NHTSA. Así, obsérvase unha clara similitude entre a deformación do vehículo nas Figuras 29-31, correspondentes á simulación, coa do ensaio real, representado nas Figuras 32-34.



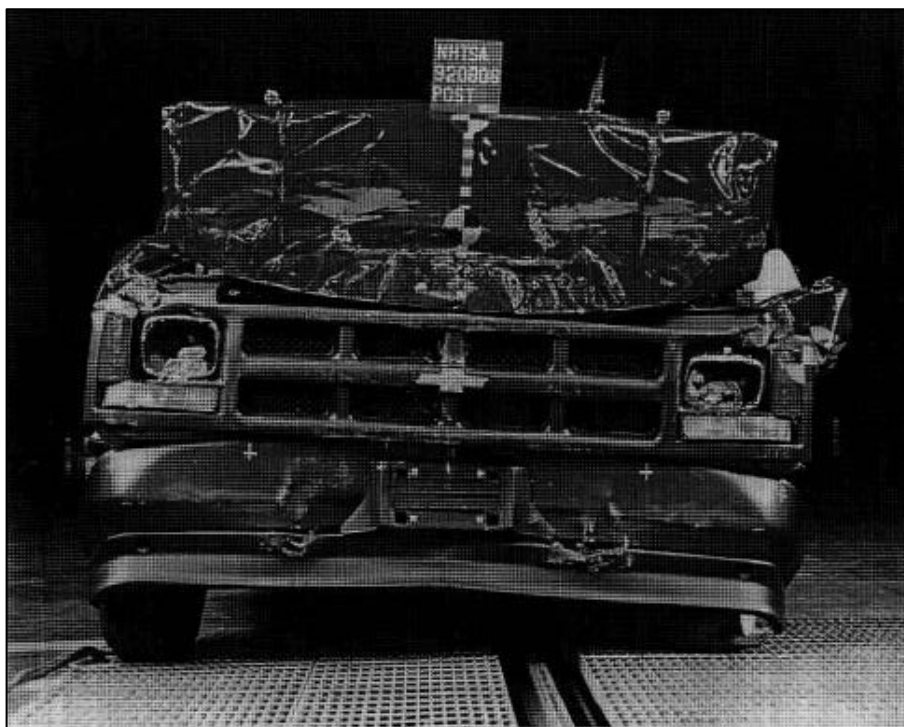


Figura 32. Vista frontal do resultado final no ensaio real.

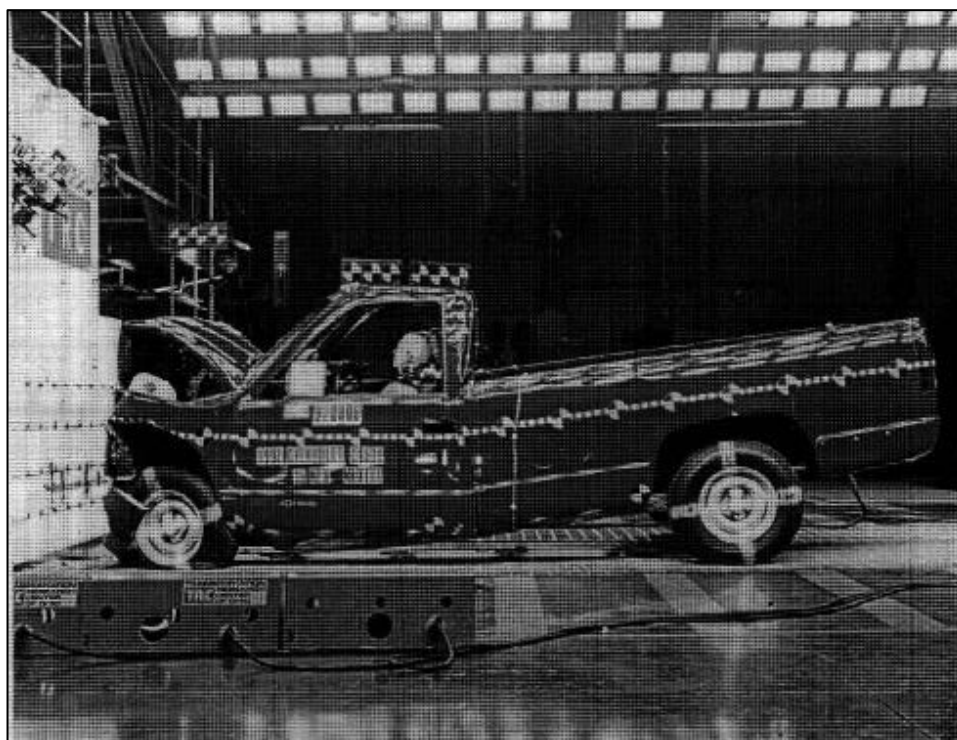
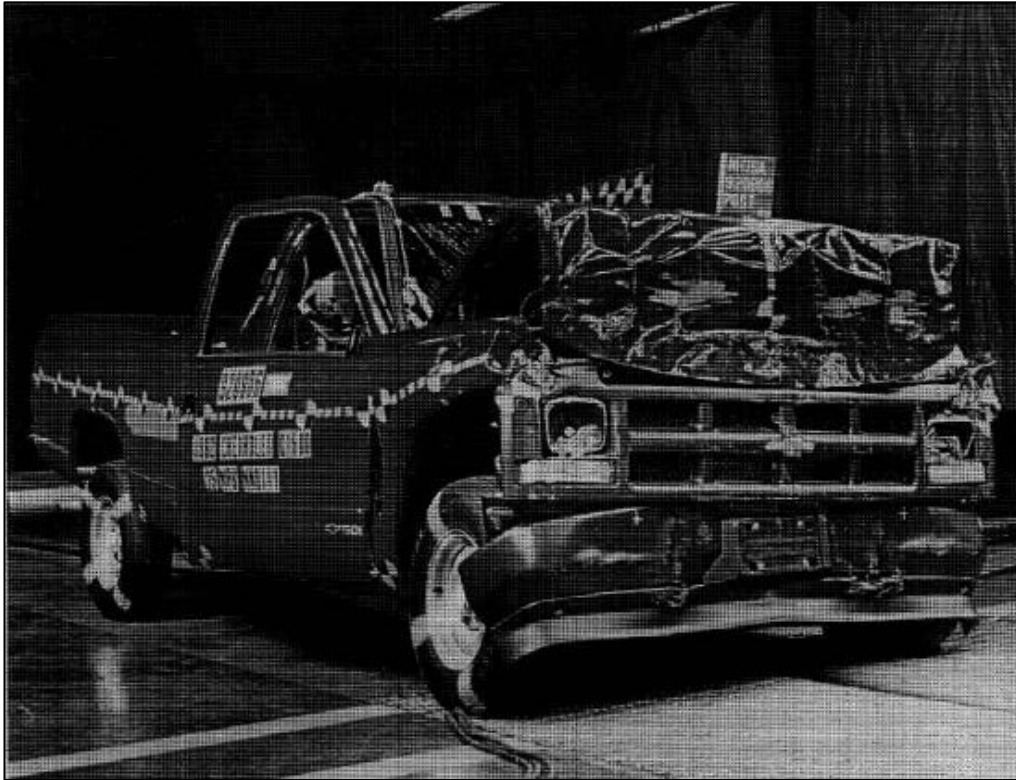


Figura 33. Vista lateral do resultado final no ensaio real.



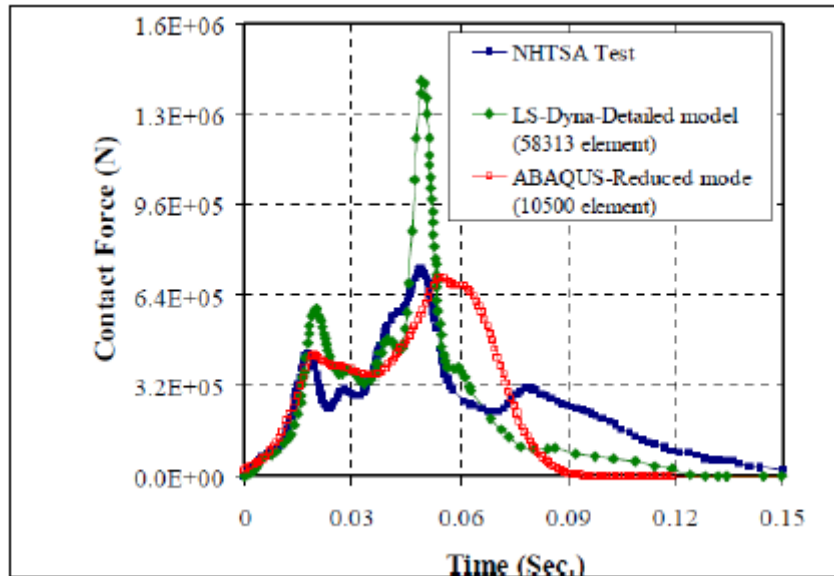
**Figura 34. Vista xeral do resultado final do ensaio real.**

Estas imaxes mostran o coche en estado de rebote, polo que non se pode apreciar totalmente a frecha que se produce na parte central da carrocería, sen embargo, na Figura 33 pódese apreciar levemente.

### *3.1.6 Análise de resultados e verificación do modelo*

Unha vez finalizada a simulación e feita unha comparación visual da deformación do vehículo na simulación e no ensaio real, resulta convinte comparar a gráfica da forza de contacto resultante na parede da simulación coa do ensaio real.

No artigo de Al-Thairy [4] validábase un modelo similar a este usando Abaqus. En dita publicación móstrase un bo axuste da súa curva da forza de contacto (vermella) respecto á obtida no ensaio real, referente ao contacto frontal entre o vehículo e a parede. Ao mesmo tempo, tamén se comparaba o resultado co do modelo de elementos finitos de gran detalle realizado pola NCAC con LS-Dyna.



Gráfica 2. Comparativa das curvas da forza de contacto en modelos previos a este estudo.

Neste estudo realízase a comparación da forza de contacto resultante na parede acadada na simulación con Abaqus, empregando un modelo máis detallado que o do artigo de Al-Thairy [4], e a acadada no ensaio real.



Gráfica 3. Gráfica da forza de contacto resultante na parede para o Chevrolet Silverado C1500 no ensaio real e na simulación.

A curva que se obtivo en Abaqus axústase perfectamente á curva do ensaio real. É máis, o seu axuste é mellor que o da curva obtida no estudo de Al-Thairy, no que se usaba un modelo reducido.

Outro aspecto importante a destacar neste estudo é que a curva obtida axústase mellor aos datos do ensaio real que a da simulación oficial da NCAC -curva verde da Gráfica 2-, posto que nesta última existe unha discrepancia importe no valor de pico da forza de contacto respecto á que denota o ensaio real.

No caso da curva deste estudo, prodúcense pequenas discrepancias que se poden considerar desprezables debido ao pequenas que son.

Ademais, hai que ter en conta que o ensaio real con este modelo de vehículo e estas características só se levou a cabo unha vez, polo que non se chegou a verificar con máis test a validez destes datos.

Con todo elo, pódese considerar que o modelo empregado neste estudo é válido xa que se axusta moi ben á curva real, chegando a ser este axuste incluso mellor que os de estudos previos e os da simulación oficial da NCAC.

## 3.2 Validación do Geo Metro

### 3.2.1 Antecedentes: ensaio real

Ao igual que no caso do Chevrolet Silverado C1500, para realizar a validación do modelo de elementos finitos do Geo Metro pártese dun ensaio real do impacto deste vehículo contra unha parede ríxida. Este ensaio foi levado a cabo pola NHTSA en 1992 co número de test 1673 [10] e os seus datos están accesibles para todo o mundo na súa web [11].



Figura 35. Geo Metro antes do ensaio real.

A validación do modelo empregado neste estudo farase seguindo os mesmos criterios que no caso do Chevrolet Silverado C1500, comparando as gráficas da forza de impacto resultante na parede da simulación en Abaqus e no ensaio real.

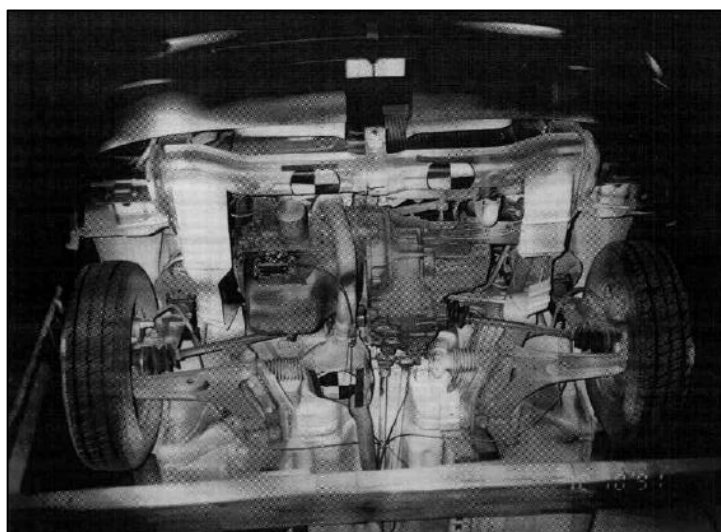
Os datos do ensaio real obtivéronse coa mesma montaxe que se empregou para o outro vehículo.



**Figura 36. Lateral do Geo Metro antes do ensaio.**



**Figura 37. Parte traseira do Geo Metro antes do ensaio.**



**Figura 38. Parte inferior do Geo Metro antes do ensaio.**

Táboa 4. Datos identificativos dos Geo Metro.

GENERAL TEST AND VEHICLE PARAMETER DATA			
Vehicle Year/Make/Model/Body Style: <u>1992 Geo Metro 2-Door Hatchback</u>			
NHTSA Test No.: <u>MN0102</u>		VIN.: <u>2C1MR246XN6709242</u>	
Body Color: <u>Bright Red</u>		Date of Manufacture: <u>9/91</u>	
Engine:	<u>3</u> Cylinders;	<u>-</u> C.I.D.;	<u>1.0</u> Liters; <u>-</u> CC
	<input checked="" type="checkbox"/> Gas;	<u>-</u> Diesel;	<u>-</u> Turbocharged
	<u>-</u> Longitudinal;		<u>-</u> Transverse
Transmission:	<u>5</u> Speed;	<input checked="" type="checkbox"/> Manual;	<u>-</u> Automatic; <input checked="" type="checkbox"/> Overdrive
Final Drive:	<input checked="" type="checkbox"/> Front Wheel;	<u>-</u> Rear Wheel;	<u>-</u> Four Wheel
Date Received:	<u>10/14/91</u>	Odometer Reading:	<u>31 miles</u>
	<u>No</u> A/C;	<u>No</u> P/S;	<input checked="" type="checkbox"/> P/B; <u>No</u> P/wdo;
	<u>No</u> Tilt Wheel	<u>No</u> P/seats;	<u>No</u> Cruise Control
Type of Occupant Restraint: <u>3 Point Passive Restraint System</u>			

Hai que destacar que a masa final do vehículo era de 921 kg, xa que levaba dous bonecos que simulaban os ocupantes, así como unha carga no maleteiro.

### 3.2.2 Modelo inicial do vehículo

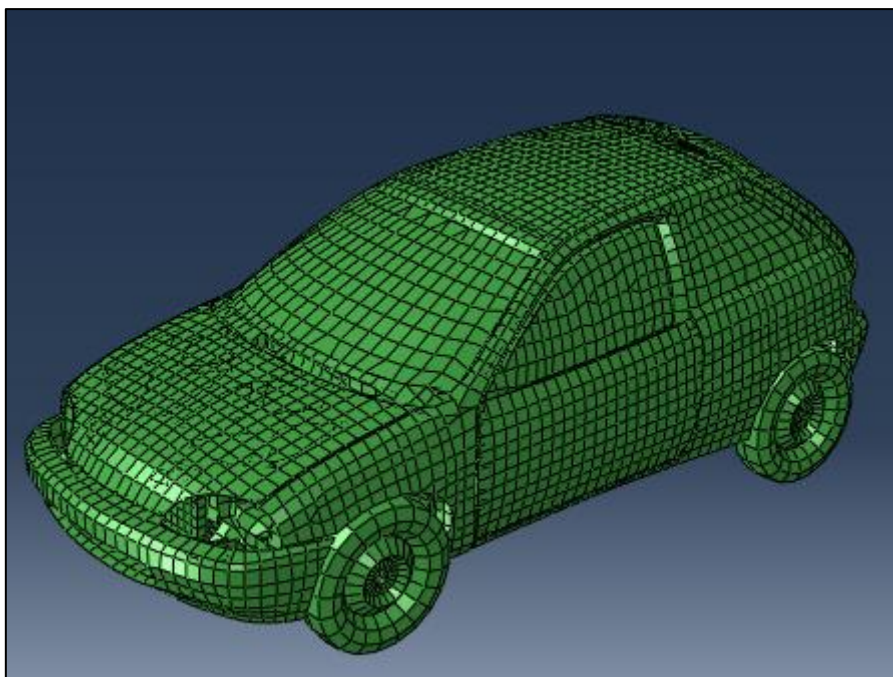


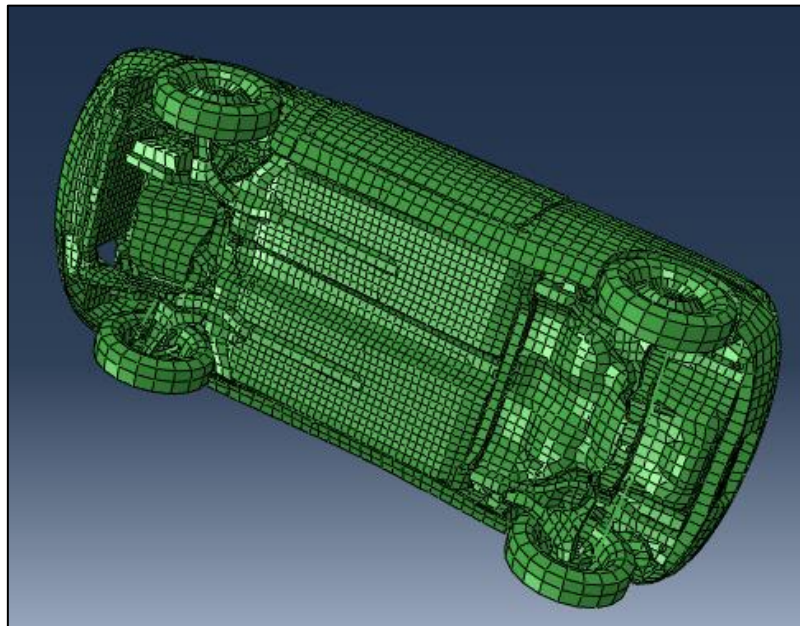
Figura 39. Modelo de elementos finitos do Geo Metro.

Ao igual que no caso anterior, este modelo trátase dunha malla orfa, é dicir, non ten ningunha xeometría CAD asociado. As características desta malla amósanse na Figura 40.

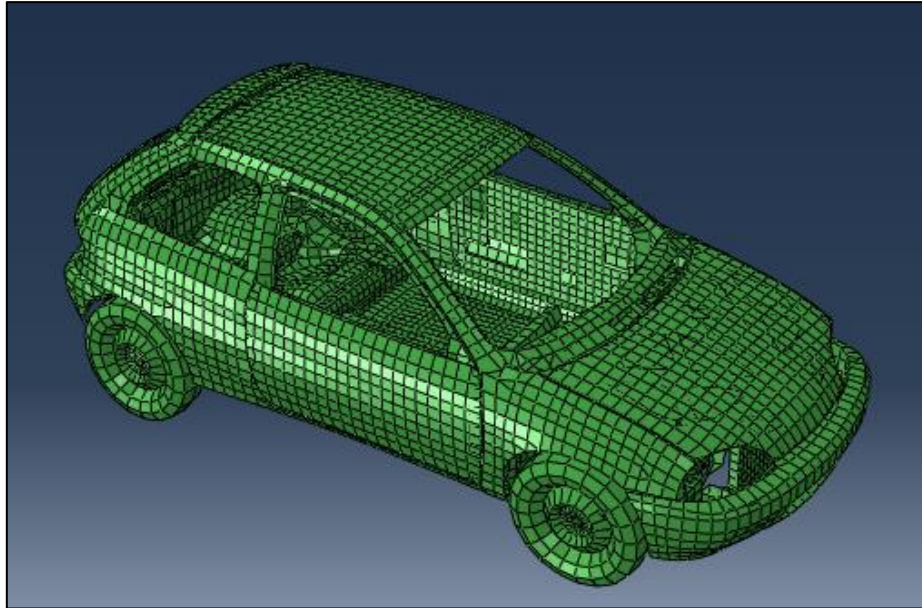
NUMBER OF ELEMENTS IS	18283
NUMBER OF NODES IS	22684
NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER	22556
NUMBER OF INTERNAL NODES GENERATED BY THE PROGRAM	128
TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL (DEGREES OF FREEDOM PLUS MAX NO. OF ANY LAGRANGE MULTIPLIER VARIABLES. INCLUDE *PRINT,SOLVE=YES TO GET THE ACTUAL NUMBER.)	122720

**Figura 40. Datos da malla do Geo Metro.**

É importante destacar que este modelo é moito máis simple que o anterior, posto que non dispón dos asentos nin da tapicería interior. Por este motivo, ademais de por ser un vehículo máis pequeno, o número de elementos é moito menor que o do modelo do Chevrolet Silverado C1500.



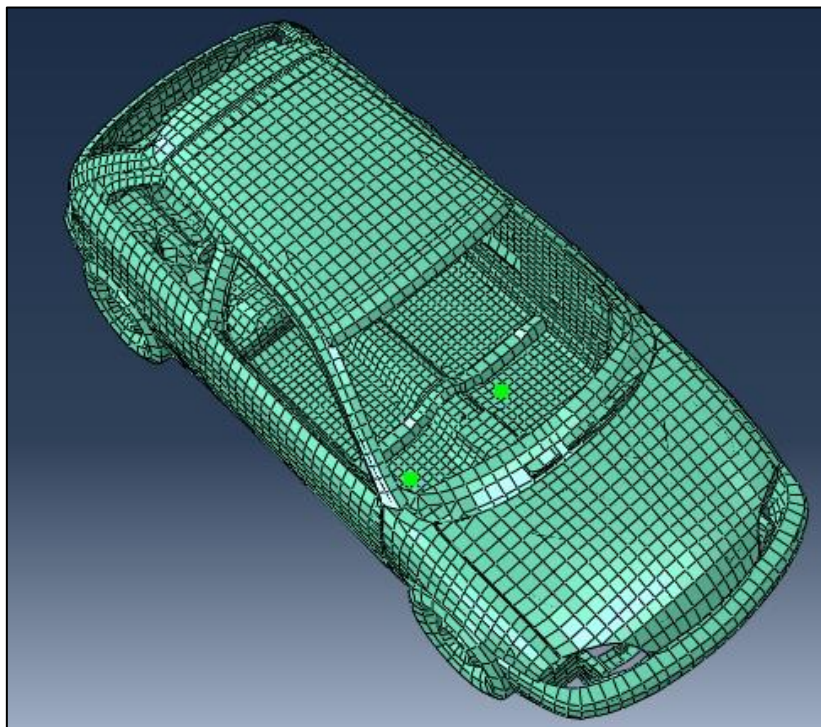
**Figura 41. Vista inferior do modelo do Geo Metro.**



**Figura 42. Vista do interior do modelo do Geo Metro.**

Debido á utilización de bonecos que simulan os pasaxeiros, dunha carga no maleteiro e da redución de elementos que sofre este modelo é necesario incorporar tres puntos de masa para compensar estas situacións e poder igualar o peso do ensaio real.

Por un lado, engádense dous puntos de masa na parte dianteira, de 80 kg cada un deles, para simular a presenza de dous ocupantes. Por outra parte, emprégase outro punto de masa -130 kg- na parte traseira do vehículo, co obxectivo de simular a carga do maleteiro e compensar a redución de masa que sofre este modelo ao non dispoñer de asentos nin de tapicería interior.



**Figura 43. Puntos de masa da parte dianteira do Geo Metro.**



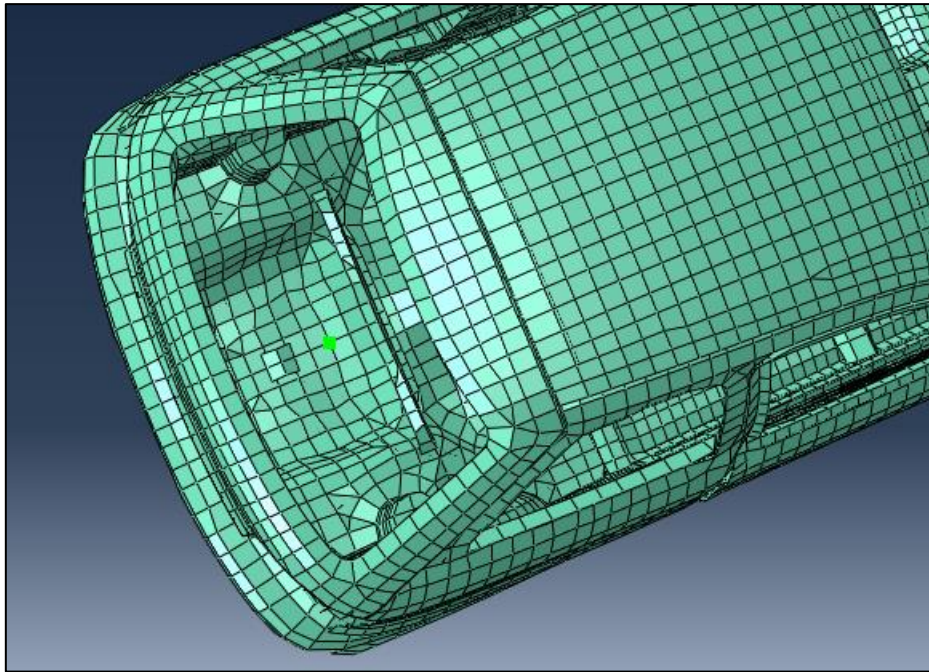


Figura 44. Punto de masa da parte traseira do Geo Metro.

### 3.2.3 Simulación do impacto frontal

A simulación do modelo faise a partires dunha ensamblaxe que, ademais do modelo do vehículo, debe conter dúas superficies analíticas que representen o chan e a parede. Desta forma, obtense a ensamblaxe que se mostra na Figura 45.

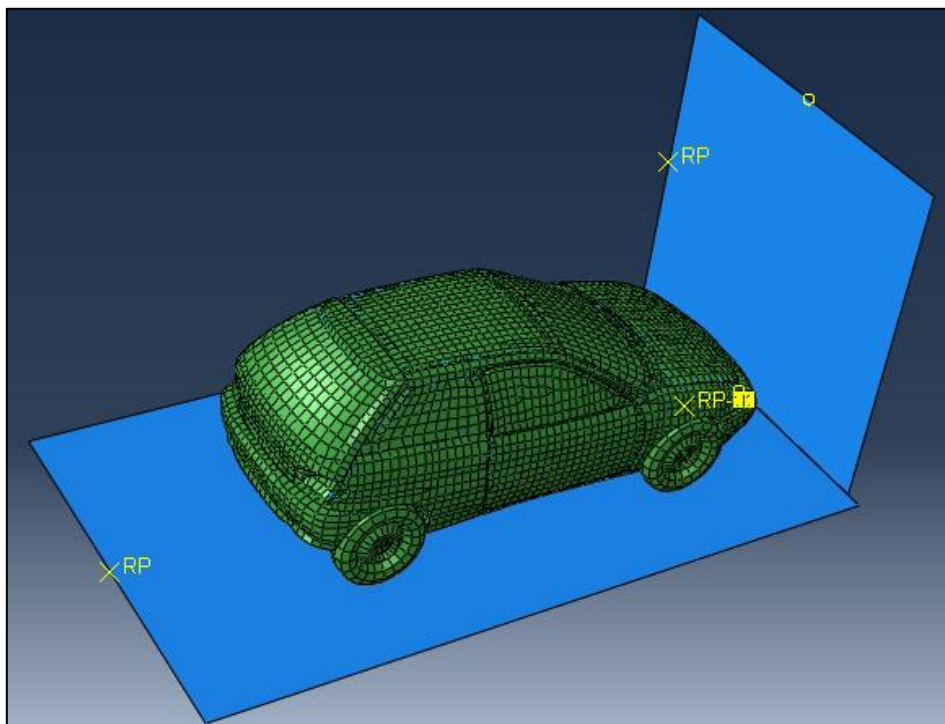
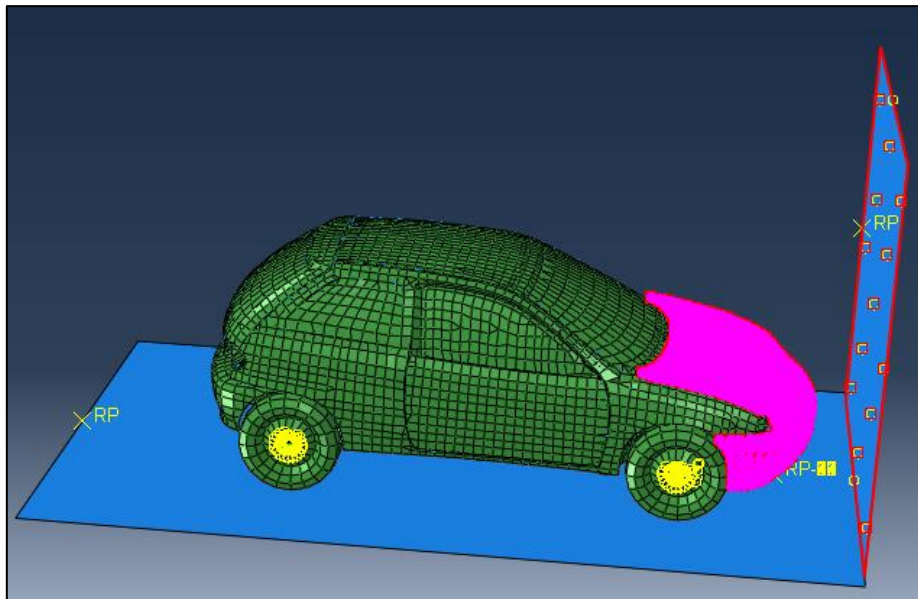


Figura 45. Ensamblaxe do Geo Metro.

En canto ás condicións de contacto, hai que dicir que son as mesmas que para o caso do Chevrolet Silverado C1500. Simplemente destacar que na Figura 46 móstranse as superficies seleccionadas no contacto de tipo "Surface to surface".



**Figura 46. Superficies do contacto "Surface to surface" do Geo Metro.**

Así mesmo, as condicións de contorno, a velocidade do vehículo e a duracións dos steps tamén é a mesma que no caso anterior.

Na Táboa 5 amósanse as características do ordenador no que se realizou a simulación e a duración da mesma.

**Táboa 5. Características do ordenador e tempo de simulación do Geo Metro.**

Modelo	HP Pavilion Notebook
Sistema operativo	Windows 10 Home 64 bits
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-6500 CPU @ 2.50GHz 2.59GHz
RAM	8,00 GB (7,89 GB utilizable)
Tarxeta gráfica	NVIDIA GeForce 940MX
Versión de Abaqus/CAE	6.14-5
Tempo de simulación	1 hora e 6 minutos.

Como era de esperar, o feito de empregar un modelo sen os asentos e sen a tapicería interior e que, polo tanto, ten un considerable número de elementos menor que o modelo completo, reduce notablemente o tempo de simulación.

### 3.2.4 Secuencia do impacto

Dende a Figura 47 ata a Figura 55 móstrase a secuencia do impacto do Geo Metro contra a parede ríxida, coas tensións de Von Misses representadas sobre os elementos.

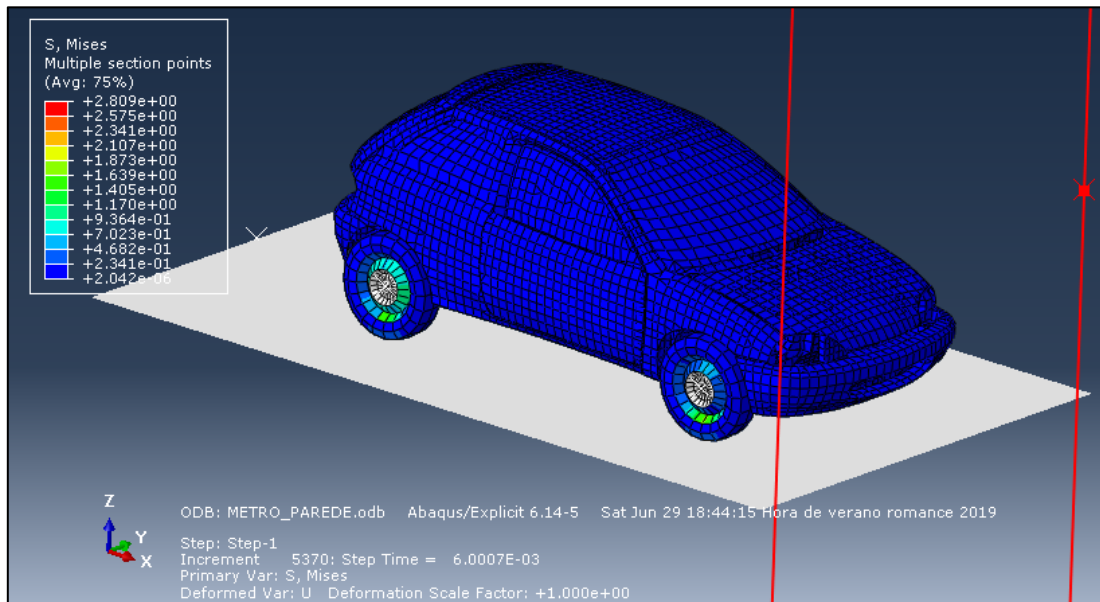


Figura 47. Secuencia de impacto do Geo Metro en  $t=0,06$  s.

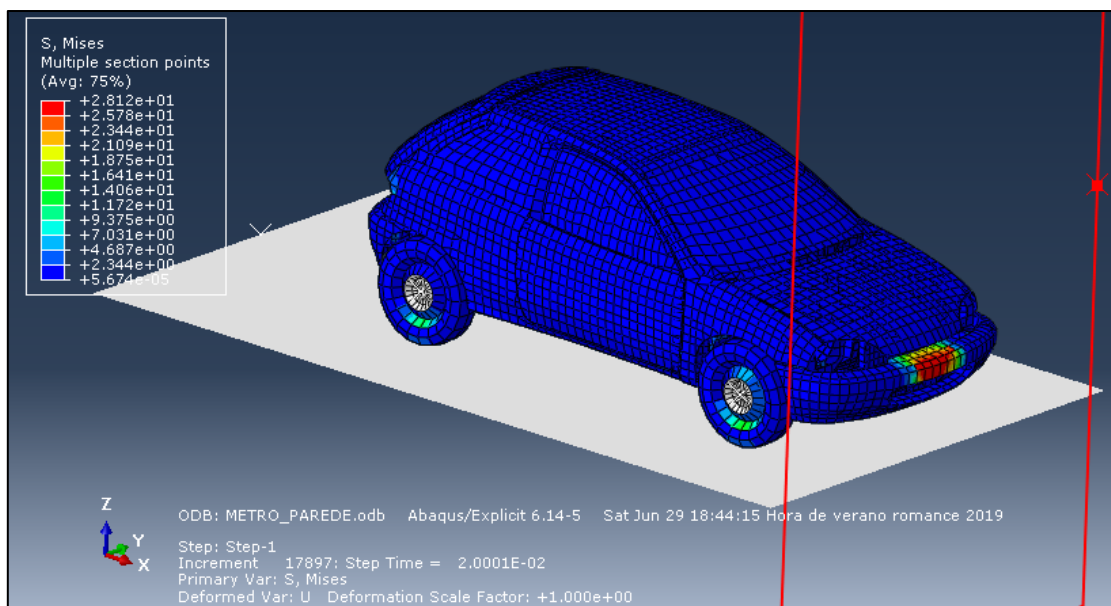


Figura 48. Secuencia de impacto do Geo Metro en  $t=0,02$  s.

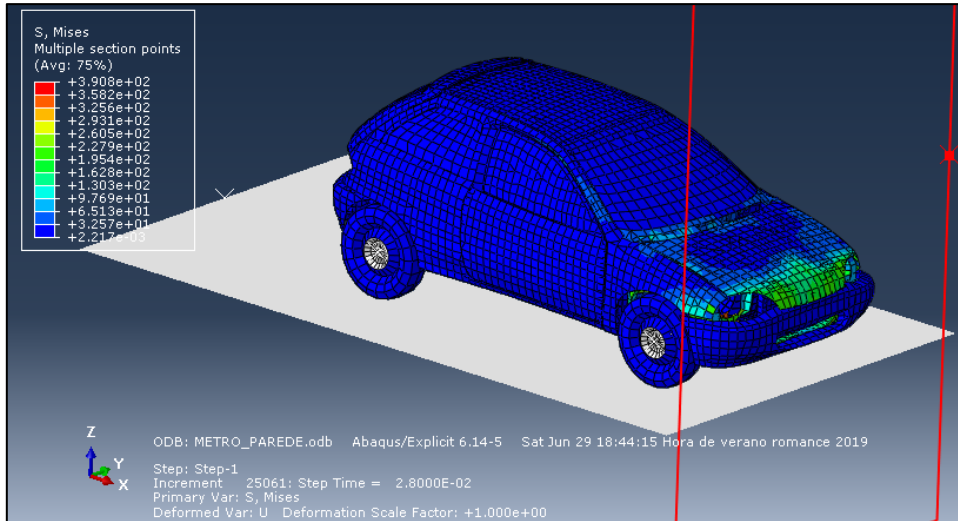


Figura 49. Secuencia de impacto do Geo Metro en t=0,028 s.

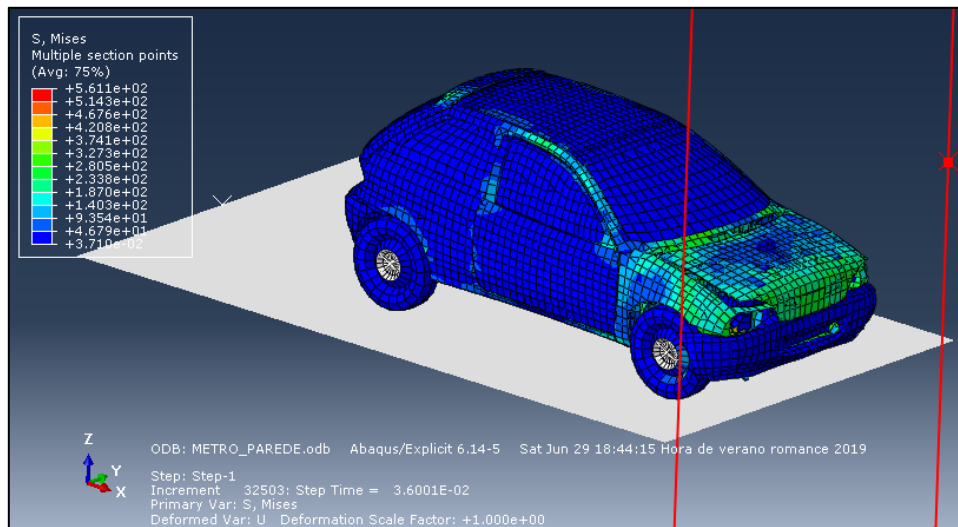


Figura 50. Secuencia de impacto do Geo Metro en t=0,036 s.

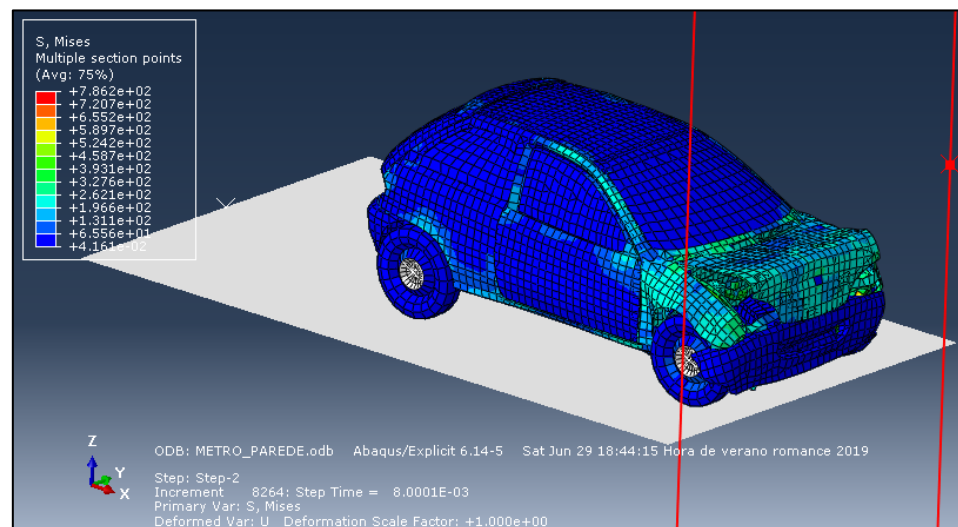


Figura 51. Secuencia de impacto do Geo Metro en t=0,048 s.

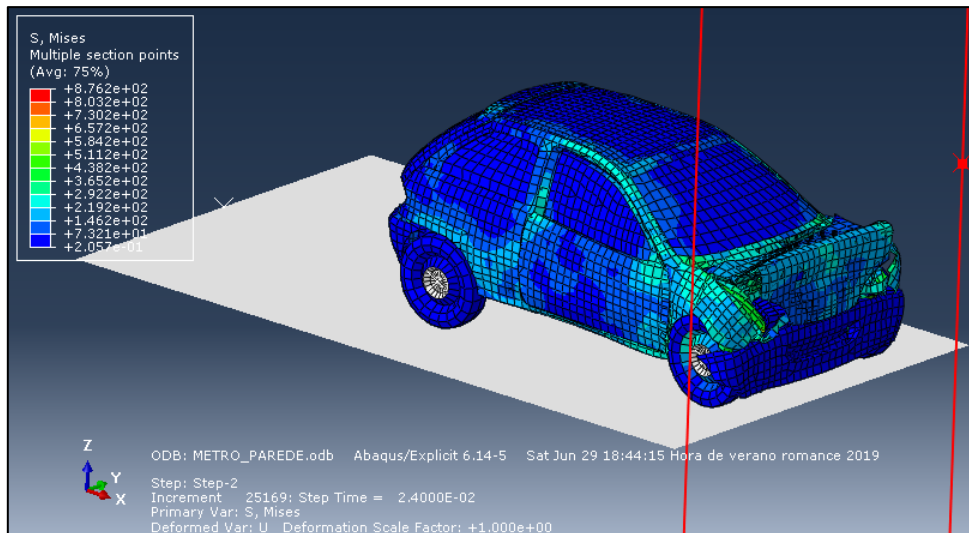


Figura 52. Secuencia de impacto do Geo Metro en t=0,064 s.

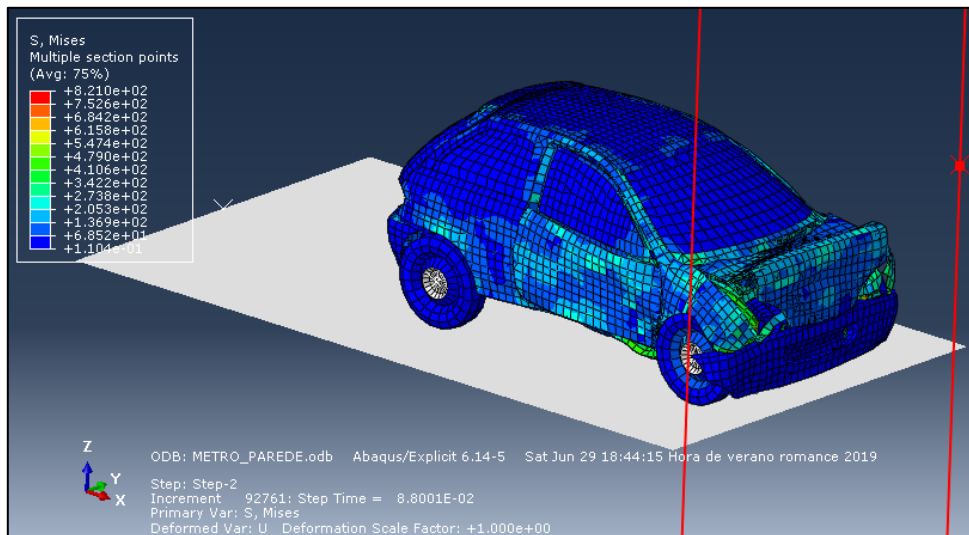


Figura 53. Secuencia de impacto do Geo Metro en t=0,088 s.

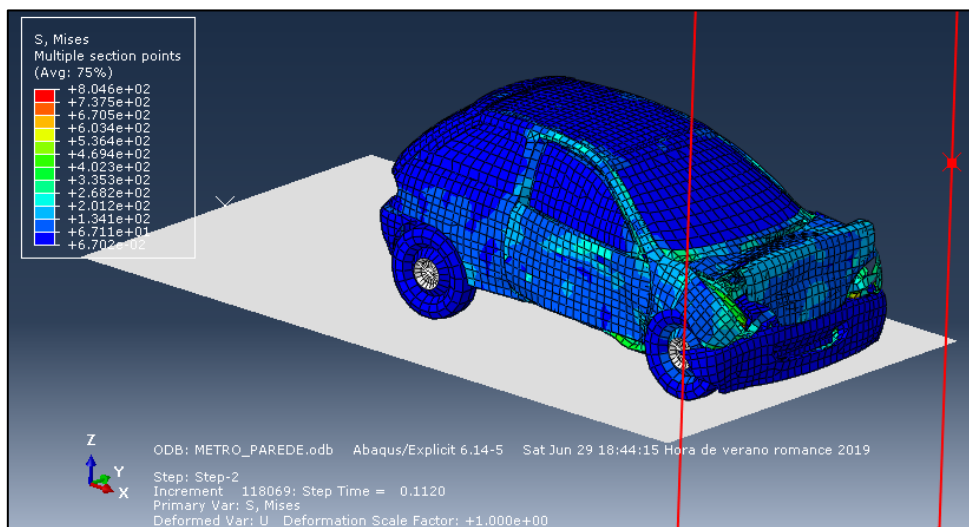


Figura 54. Secuencia de impacto do Geo Metro en t=0,152 s.

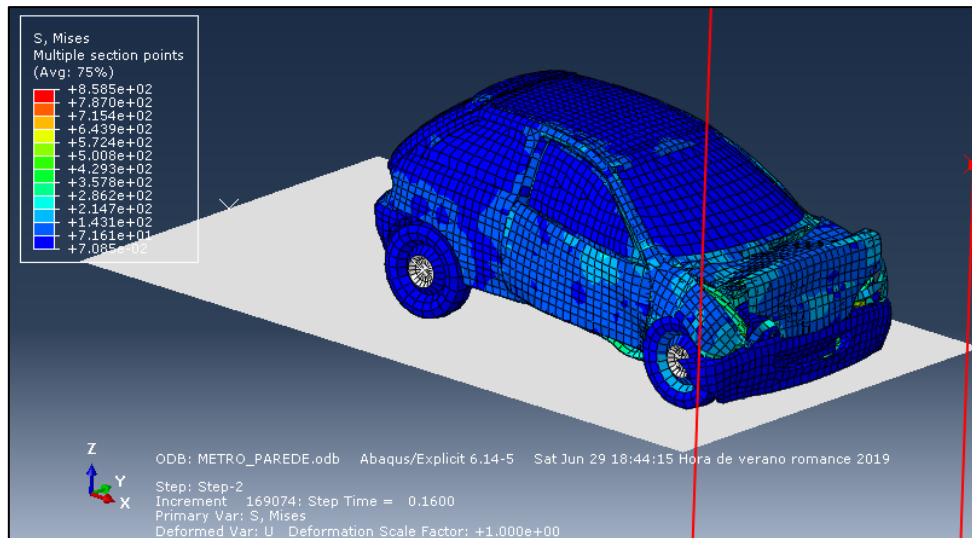


Figura 55. Secuencia de impacto do Geo Metro en  $t=0,2$  s.

Na Figura 47 vese ao coche avanzar cara a parede ríxida cunha velocidade de 15500 mm/s. O primeiro contacto prodúcese coa defensa e co capó (Figura 48), que se van deformando progresivamente, tal e como se pode apreciar na Figura 49 e na Figura 50. Posteriormente, nas seguintes Figuras hai certos elementos en plastificación, como o capó, o cal sofre unha gran deformación, xunto coa defensa e as aletas.

Finalmente, na Figura 55, vese o vehículo ao final da análise, en proceso de alcanzar unha posición de repouso tras o rebote.

### 3.2.5 Estado final do vehículo

Unha vez sufrido o impacto e xa en fase de rebote, o estado do vehículo é o que se mostra dende a Figura 56 ata a Figura 59.

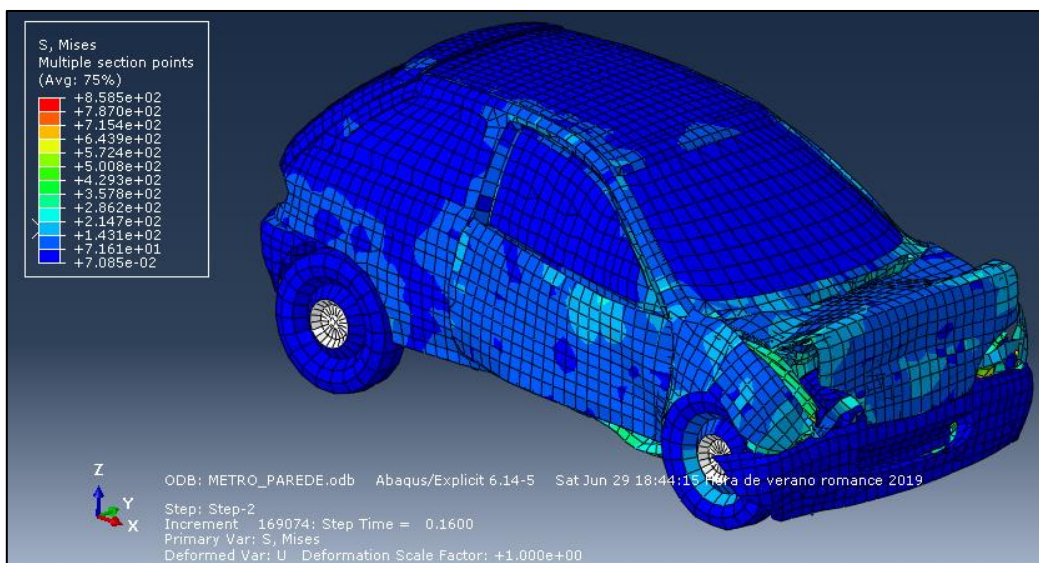


Figura 56. Estado final do Geo Metro.

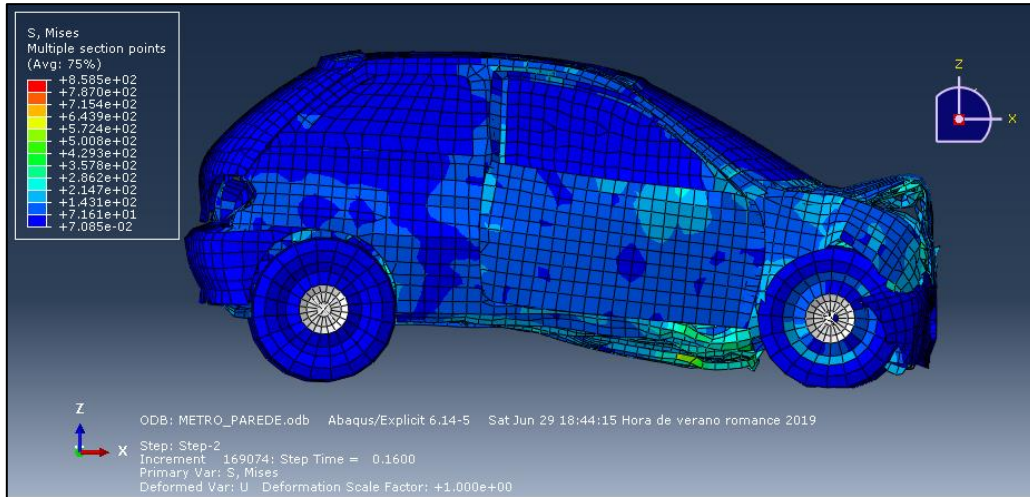


Figura 57. Vista lateral do estado final do Geo Metro.

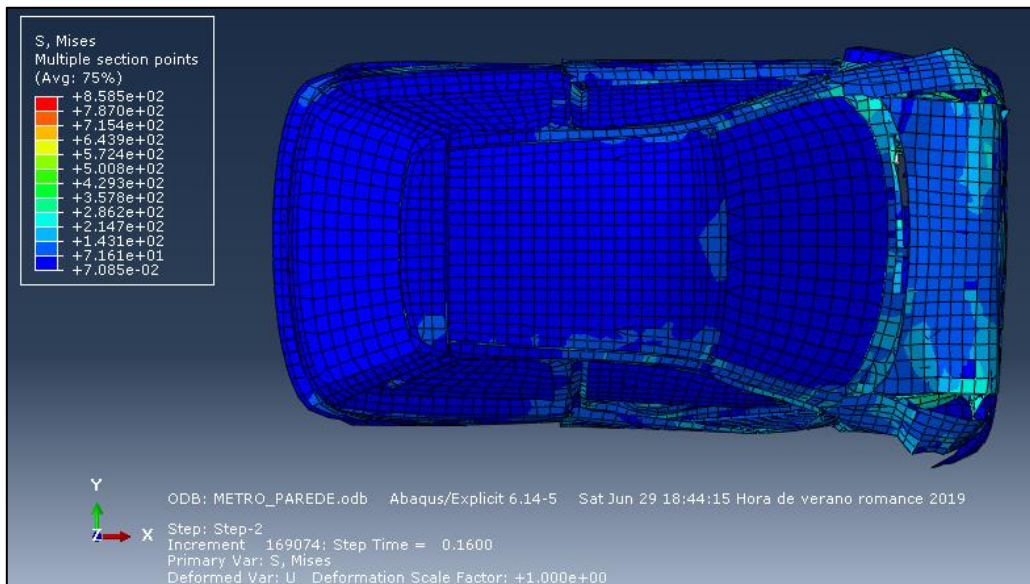


Figura 58. Vista superior do estado final do Geo Metro.

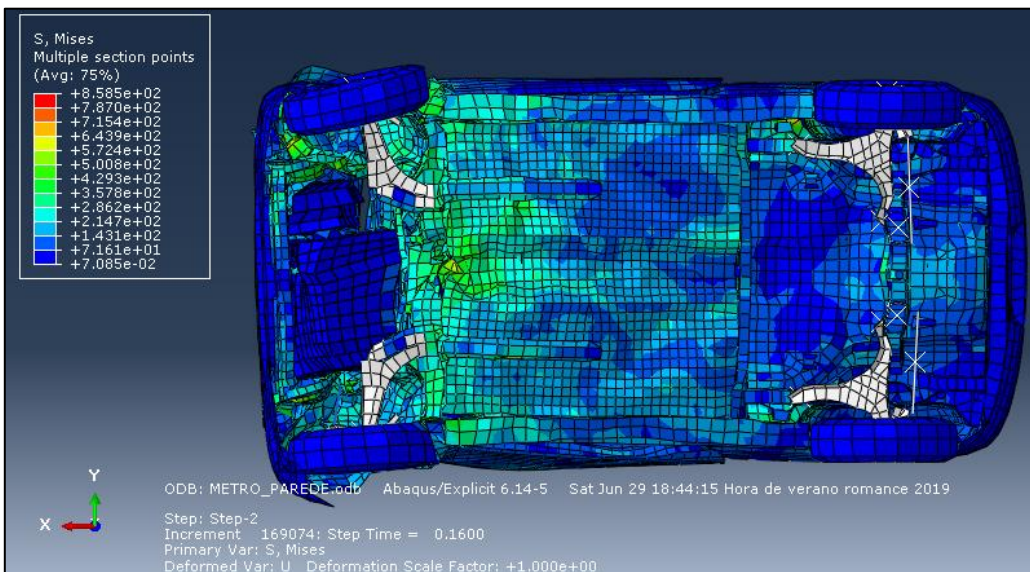
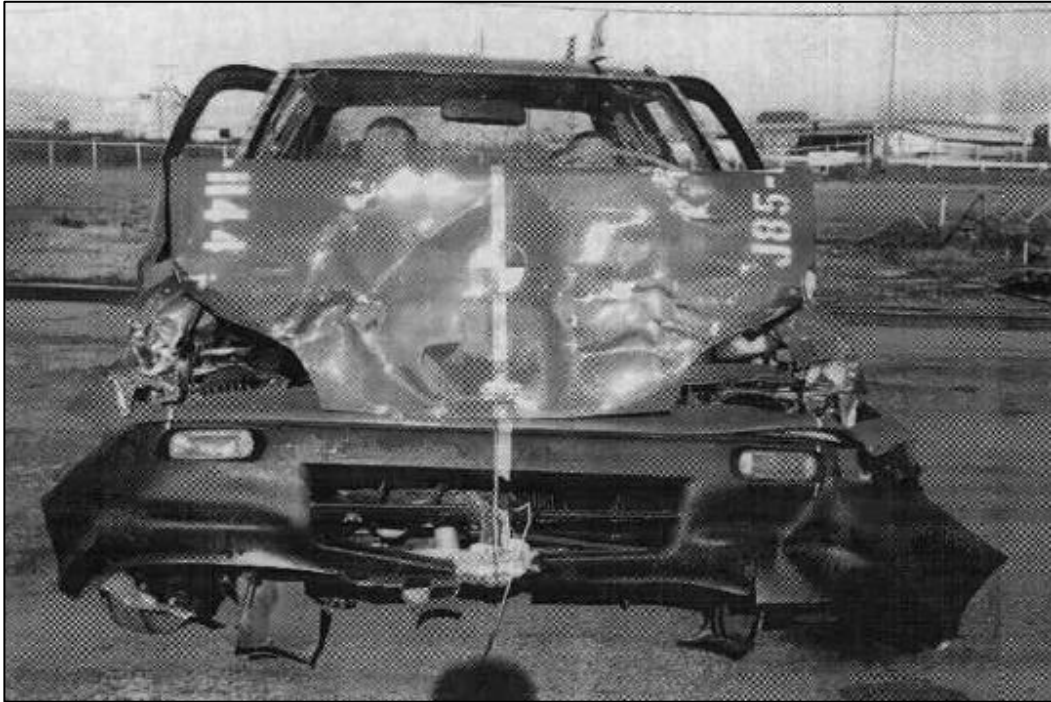
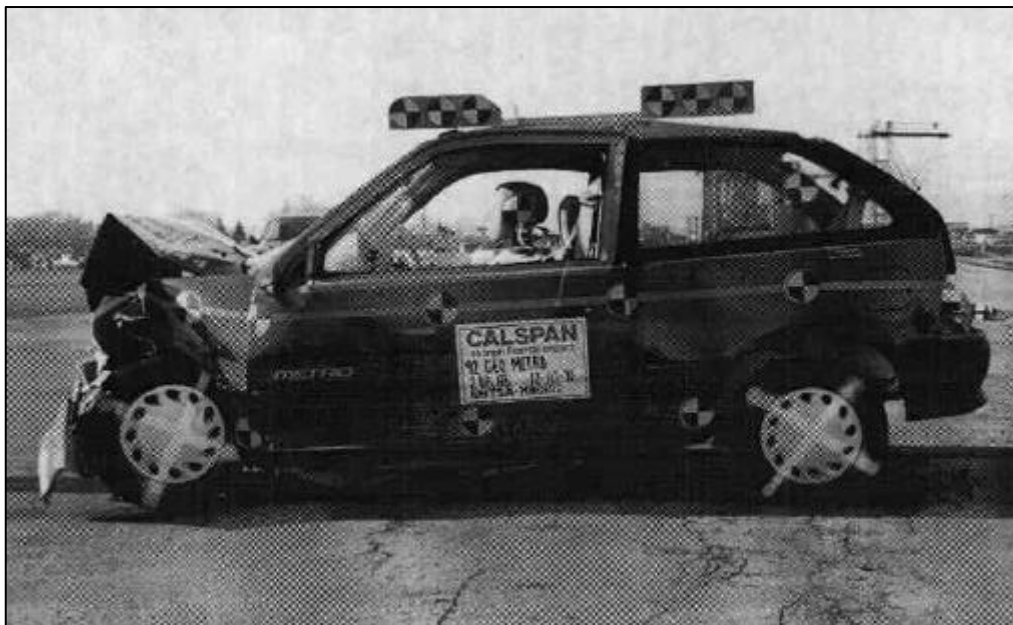


Figura 59. Vista inferior do estado final do Geo Metro

Ao igual que no caso do Chevrolet Silverado C1500, a simple vista semella que a deformación do Geo Metro na simulación é moi similar á sufrida no ensaio real.

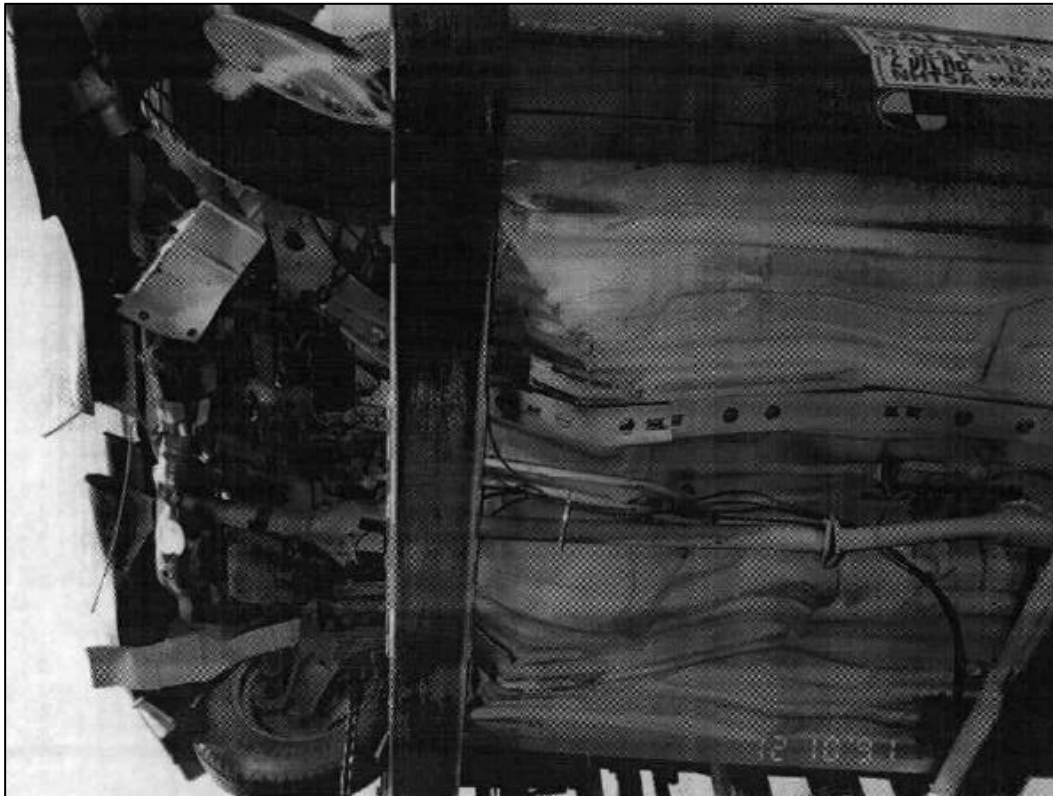


**Figura 60. Vista frontal do Geo Metro despois do ensaio real.**



**Figura 61. Vista lateral Geo Metro despois do ensaio real.**





**Figura 62. Vista inferior do Geo Metro despois do ensaio real.**



**Figura 63. Vista xeral do Geo Metro despois do ensaio real.**

### 3.2.6 Análise de resultados e verificación do modelo

Seguindo o procedemento levado a cabo para a validación do modelo do Chevrolet Silverado C1500, compárase a forza de contacto resultante na parede do ensaio real coa obtida na simulación en Abaqus. Desta forma, obtense a seguinte gráfica:



**Gráfica 4. Gráfica da forza de contacto resultante na parede para o Geo Metro no ensaio real e na simulación en Abaqus.**

A curva que se obtén coa simulación en Abaqus axústase de maneira adecuada á curva do ensaio real cunhas pequenas discrepancias, as cales se poden deber a varios factores. Sen embargo, parece claro que o feito de que o modelo non dispoña dos asentos e da tapicería interior merma un pouco os resultados finais.

Así mesmo, ao igual que no caso do outro vehículo, hai que ter en conta que só se realizou un único ensaio real co Geo Metro, polo que sería interesante comparar estes datos do ensaio real con máis probas de características semellantes.

A pesar desas pequenas discrepancias no modelo do Geo Metro, pódese considerar que ámbolos dous modelos son adecuados para cumprir o obxectivo deste proxecto, que é comprobar a validez da normativa actual española e europea en cargas de impacto en estruturas.

## 4 ANTECEDENTES

A referencia bibliográfica básica de onde se obtén a información e os datos necesarios para o desenvolvemento deste TFM é o texto “Tridimensional modelization of the impact of a vehicle against a metallic parking column at a low speed” [12]. En este artigo explícase como as normativas en determinados aspectos promoven ou favorecen a inseguridade no caso de accións de impacto de vehículos contra estruturas. Ademais, este artigo está baseado na tese doutoral “Estudio del comportamiento de pilares de edificación frente a cargas de impacto” [13].

Ao longo deste estudo doutoral realizáronse ensaios reais e simulacións de impactos con diferentes modelos de coches contra columnas de formigón e de metal. No desenvolvemento desta tese utilizouse un sofisticado sistema de cámaras para obter uns resultados fiables dos desprazamentos obtidos, ademais dunha serie de sensores como serían acelerómetros, galgas extensiométricas, etc.



Figura 64. Ensaio real [13].



Figura 65. Ensaio real II [13].

## 5 NORMATIVA

As normativas empregadas neste estudo son o Código Técnico da Edificación (CTE) e o Eurocódigo. Estas normativas, para o caso de impacto de vehículos contra a estrutura dun edificio, propoñen a utilización de forzas estáticas equivalentes que provoquen os mesmos efectos que as cargas de impacto.

No Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la Edificación do CTE recóllense as accións a ter en conta no caso de impacto de vehículos contra elementos estruturais. No punto 4.3.2 desta normativa especificase que “os valores de cálculo das forzas estáticas equivalentes debidas ao impacto de vehículos de ata 30 kN de peso, son de 50 kN na dirección paralela á vía e de 25 kN na dirección perpendicular, non actuando simultaneamente”.

Esta forza equivalente de impacto “*considerarase actuando nun plano horizontal e aplicarase sobre unha superficie rectangular de 0,25m de altura e unha anchura de 1,5, ou a anchura do elemento si é menor, e a unha altura de 0,6m por encima do nivel de rodadura, no caso de elementos verticais, ou a altura do elemento, si é menos de 1,8m horizontais*”.

Sen embargo, o Eurocódigo presenta tres formas de calcular estas cargas estáticas equivalentes.

A primeira delas, establecida no apartado 1.7 do Eurocódigo 1, para impactos en estruturas de aparcadoiros deseñados unicamente para coches (non para camións) e a unha velocidade de 5,5 m/s (20km/h), establece unha carga estática equivalente idéntica ao do CTE

Por outra parte, no Eurocódigo 1, na parte 1.1, que trata sobre accións xerais, inclúe o Anexo B, o cal é soamente informativo. Este anexo describe os cálculos necesarios para obter a compoñente horizontal da forza requirida para soportar o impacto dun vehículo, no caso particular de barreiras en aparcadoiros. Este cálculo está baseado na conservación da enerxía nun sistema antes e despois do impacto, de forma que se pode describir como:

$$E = F \cdot \delta = 0,5 \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Onde:

- E correspóndese coa enerxía total do sistema.
- F é a máxima forza alcanzada durante o impacto.
- $\delta$  representa o desprazamento total que se produce durante o impacto.
- m é a masa do vehículo
- v é a súa velocidade inicial.

Desta maneira, a forza pódese calcular mediante a seguinte expresión:

$$F = 0,5 \cdot m \cdot \frac{v^2}{(\delta_c + \delta_b)} \quad (2)$$

Onde  $\delta_c$  é a deformación experimentada polo vehículo e  $\delta_b$  é a deformación da estrutura.

Ademais, o código da valores para os parámetros involucrados nesta expresión, así, para un aparcadoiro deseñado para vehículos cunha masa inferior a 2500 kg e

considerando o impacto contra unha barreira deformable, propón unha masa de 1500 kg, unha velocidade de 4,5 m/s (16,2 km/h) e un  $\delta_c$  de 100 mm; con estes valores, a forza é de 150 kN. Nun aparacadoiro deseñado para vehículos pesados, o código establece que hai que empregar a masa real do vehículo. Desta maneira, para un impacto contra un barreira ríxida e un vehículo de 3000 kg de masa e a unha velocidade de 5,5 m/s (20 km/h) a forza resultante é de 308 kN. Este valor é moi diferente ao establecido no apartado 1.7 (50kN).

Finalmente, no Anexo C da Parte 1.7 do Eurocódigo 1 propórzanse criterios para o estudo avanzado de impactos. Nesta norma, os impactos clasifícanse en impactos duros e brandos, cando a enerxía é disipada principalmente polo obxecto impactante e cando a estrutura se deforma para absorber a enerxía do impacto, respectivamente. No caso de impactos duros, como é o caso dun vehículo contra a estrutura dun edificio, o Eurocódigo 1 propón a seguinte expresión para determinar a máxima forza de interacción:

$$F = v_r \cdot \sqrt{k \cdot m} \quad (3)$$

Onde:

- F é a máxima forza alcanzada durante o impacto.
- m correspóndese coa masa do vehículo.
- $v_r$  é a velocidade do vehículo.
- k é a rixidez do vehículo.

Esta expresión parte do concepto de conservación da enerxía, pero neste caso, incorpora o parámetro k, e a determinación do seu valor é difícil de acadar debido a que depende do tipo de vehículo. Sen embargo, a propia normativa propón un valor promedio de 30 kN/m.

Finalmente, as normativas que se comparan neste traballo son Código Técnico da Edificación, a Parte 1.7 do Eurocódigo 1 e o seu Anexo C.

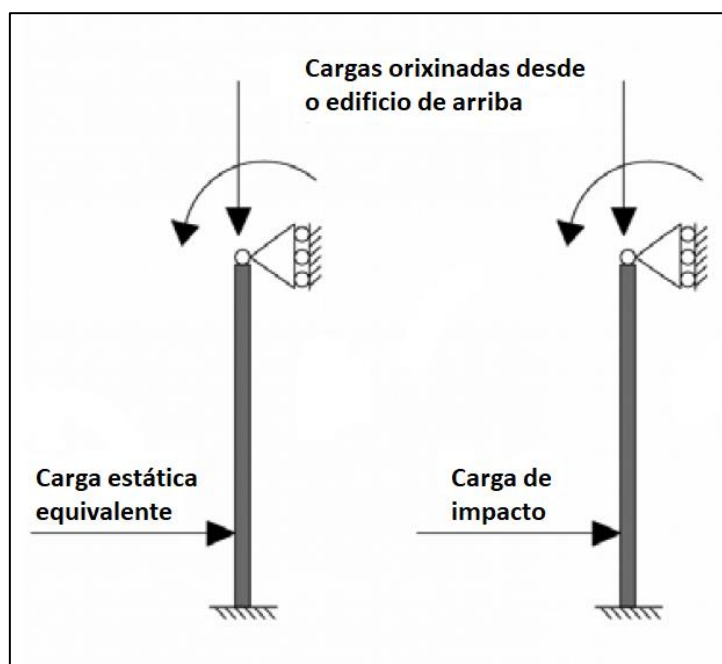


Figura 66. Carga estática equivalente e carga de impacto.

Con todo isto, obtense unha táboa cos valores das forzas estáticas equivalentes que se deberían empregar seguindo a normativa.

**Táboa 6. Valores da forza estática equivalente que aporta a normativa.**

	Eurocódigo		CTE
	<i>Anexo C</i>	<i>Apartado 1.7</i>	<i>Apartado 4.3.2</i>
<b>Modelo</b>	Forza (kN)	Forza (kN)	Forza (kN)
<b>Chevrolet Silverado C1500</b>	129,10	50	50
<b>Geo Metro</b>	85,58	50	50

**Táboa 7. Datos empregados para o cálculo da forza estática equivalente.**

Velocidade (m/s)	5,56
k (N/m)	300000
Masa Chevrolet Silverado (kg)	1800
Masa Geo Metro (kg)	791

Nestas táboas obsérvase que as forzas estáticas equivalentes suxeridas polas normativas son bastante dispares, o cal motiva a realización deste estudo para comprobar a súa validez en vehículos de diferente tipoloxía.

## 6 MODELOS EMPREGADOS

Para a realización deste estudo empréganse os modelos validados anteriormente. Sen embargo, para facer unha comparación dos resultados do Chevrolet Silverado C1500 cos resultados obtidos no estudo de referencia [12] faise necesario variar os puntos de masa que se estableceron no proceso de validación.

Polo tanto, nestas simulacións só se engaden dous puntos de masa de 80 kg na parte dos asentos dianteiros, co obxectivo de simular a presenza do condutor e do copiloto.

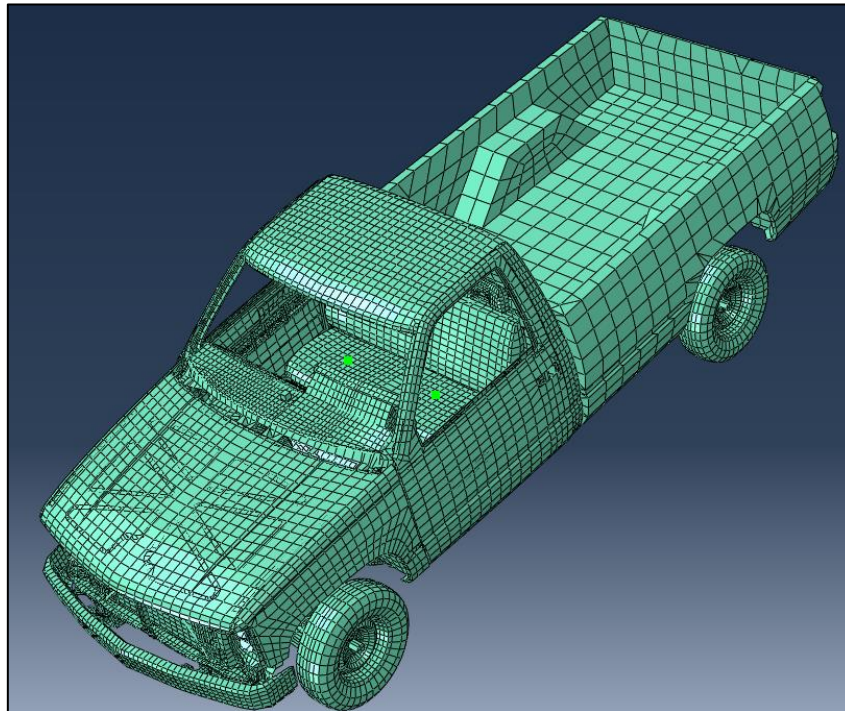


Figura 67. Puntos de masa no Chevrolet Silverado C1500.

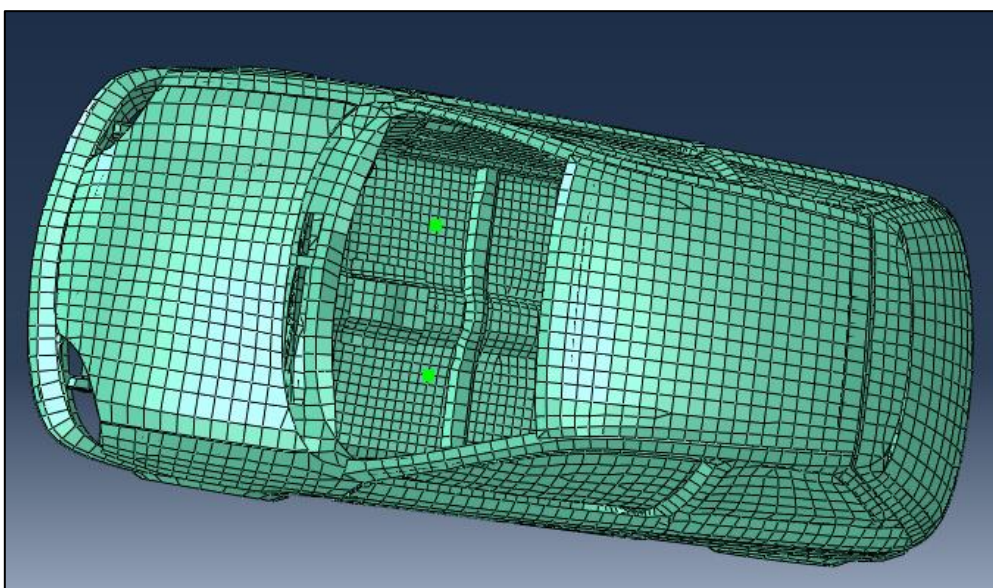


Figura 68. Puntos de masa no Geo Metro.

## 7 PARTES DAS ENSAMBLAXES

Neste ensaio utilízase un perfil metálico HEB-450 para poder comparar os resultados obtidos cos do artigo [12] xa mencionado, posto que nel emprégase o mesmo modelo de pickup. Deste xeito, pódense comparar os resultados obtidos para un dos casos deste estudo cos do artigo xa mencionado.

A esta columna aplícanse as mesmas cargas e dimensións que en dito artigo, de forma que a lonxitude da mesma será de 2,5m. O aceiro empregado para caracterizar as propiedades deste pilar é o S-275, xa que tamén é o que se emprega no artigo.

Ademais, cabe precisar que para empregar esta columna na simulación é necesario crear un arquivo CAD ao que se lle asocia unha malla. Para elo, hai que debuxar un esbozo da sección e logo extruíla para formar o pilar.

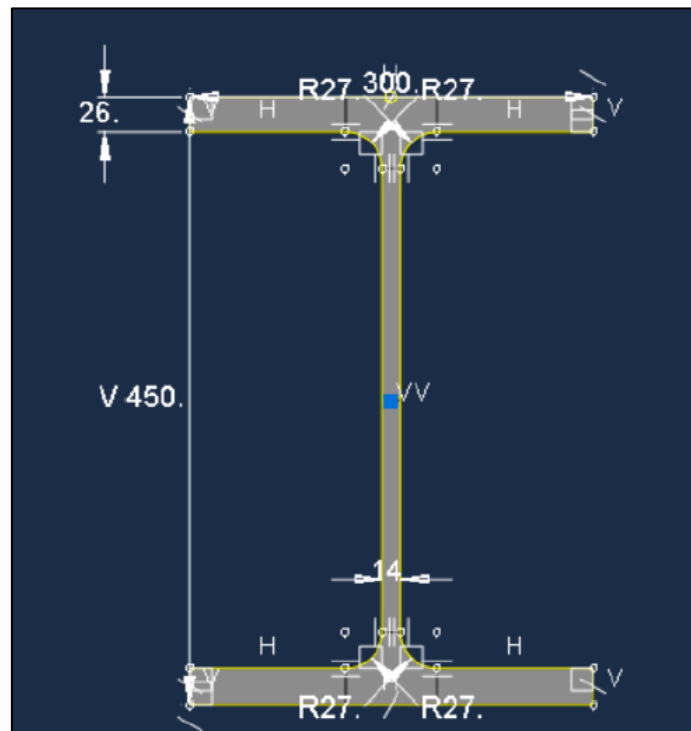
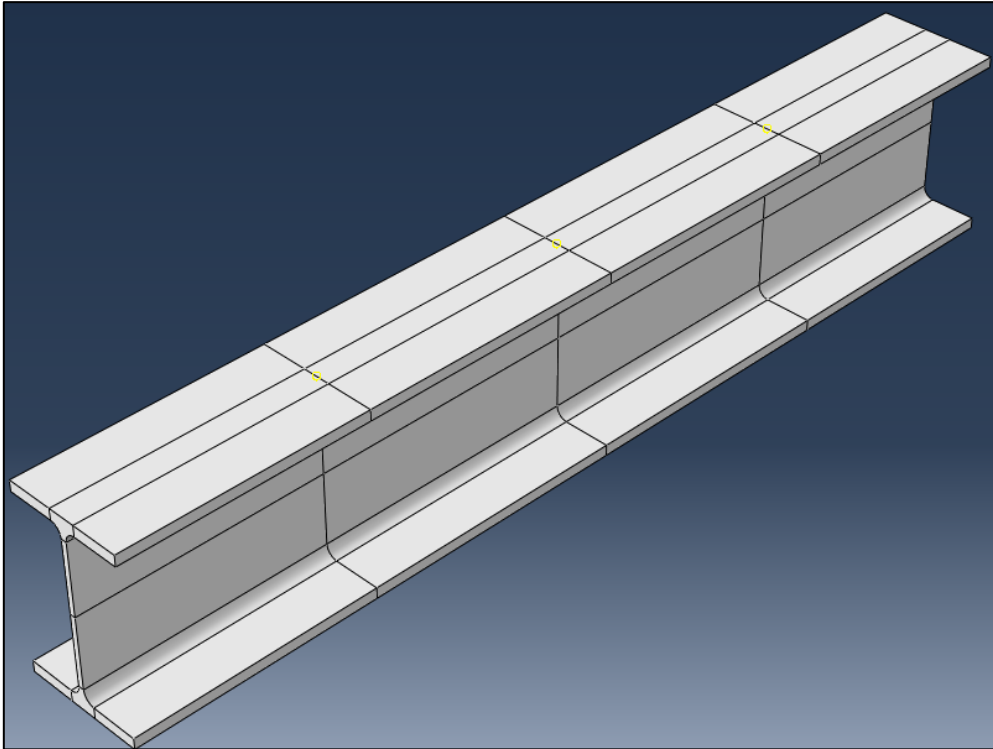


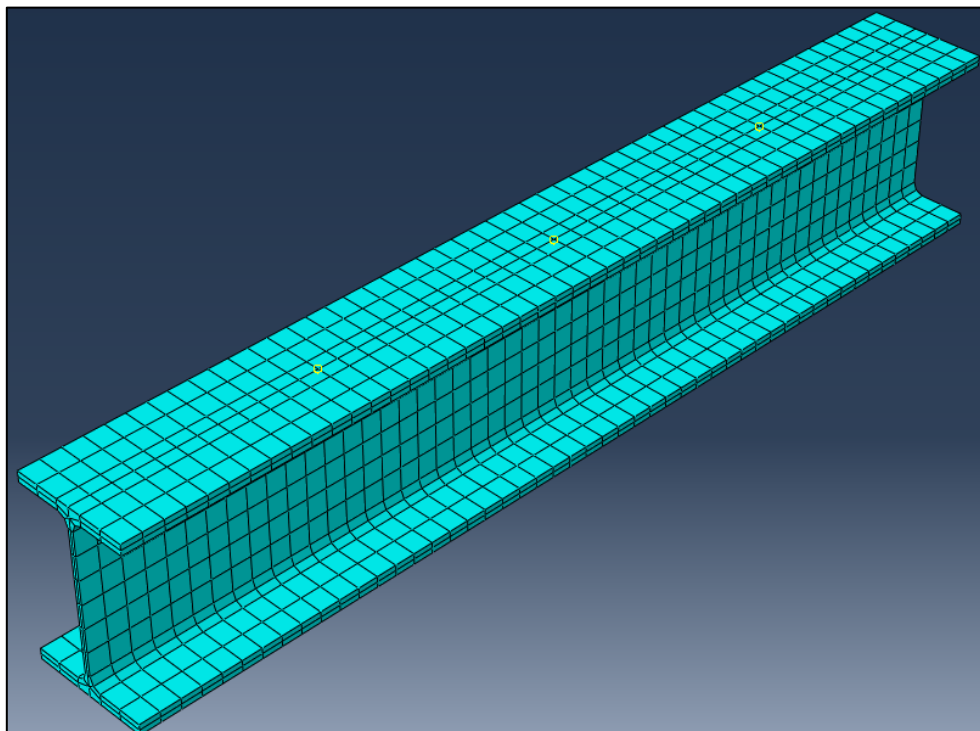
Figura 69. Esbozo da sección do pilar.





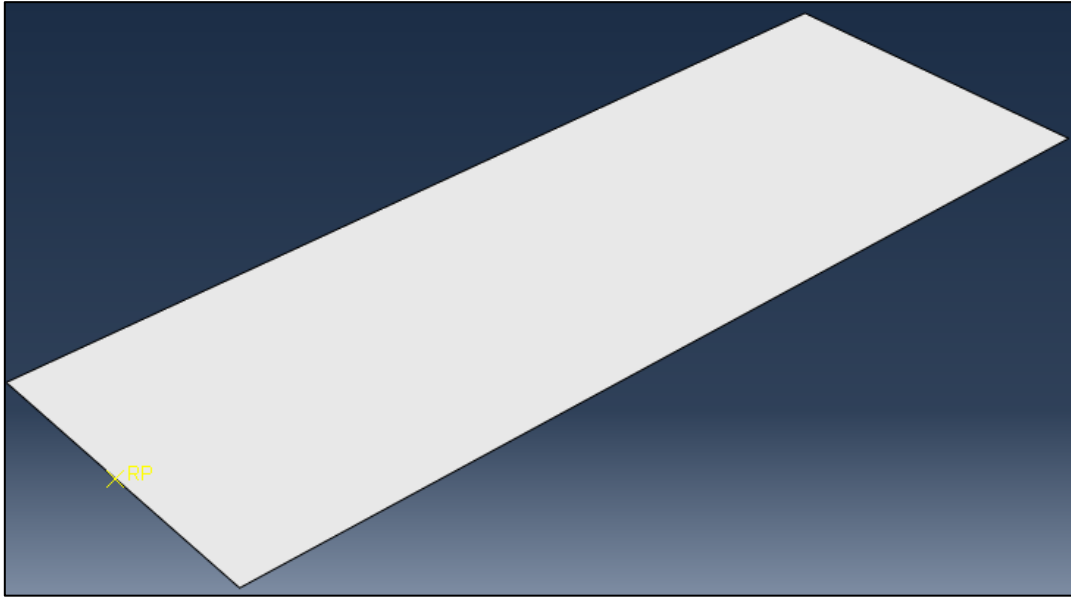
**Figura 70. Pilar HEB-450.**

Unha vez debuxada o columna, o seguinte paso consiste en crear unha malla



**Figura 71. Pilar HEB-450 mallado.**

Ademais da columna, tamén será preciso modelar un plano que represente o chan. Neste caso, o que se fai é crear unha peza de tipo “3D Analytical Rigid” para logo extruíla.



**Figura 72. Chan.**

A esta representación do chan hai que asignarlle unha superficie para poder levar a cabo a simulación.

Finalmente, no caso das simulacións dinámicas, tamén é necesario engadir o modelo do vehículo.

## 8 ENSAMBLAXE E RESTRICIÓN

Ao realizarse dous tipos de simulacións, unha dinámica e outra estática, é preciso xerar dous tipos de ensamblaxe diferentes para cada vehículo. No caso da simulación dinámica, a ensamblaxe deberá conter o vehículo, o pilar e o plano que representa o chan. Sen embargo, no caso da simulación estática, simplemente son necesarios o pilar e o plano que representa o chan.

### 8.1 Ensamblaxes dinámicas

No caso da simulación dinámica, o primeiro paso consiste na creación da ensamblaxe cos compoñentes mencionados anteriormente para este tipo de simulación.

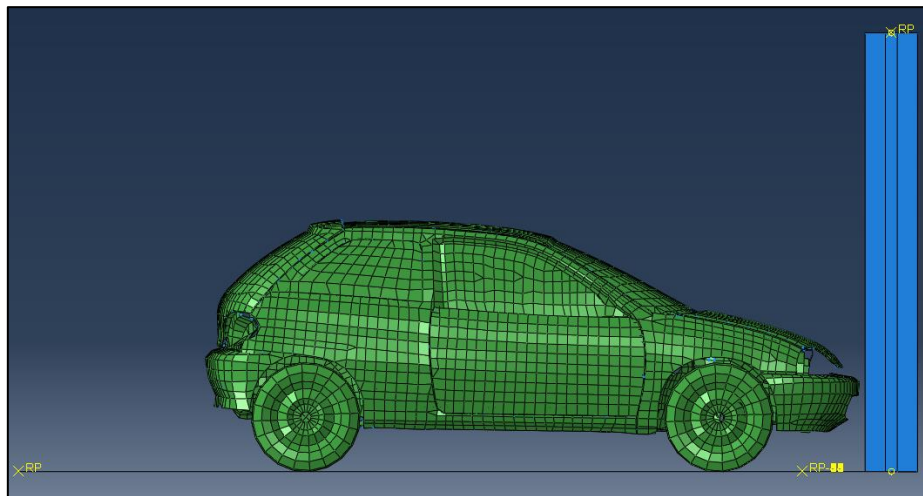


Figura 73. Vista lateral da ensamblaxe do Geo Metro.

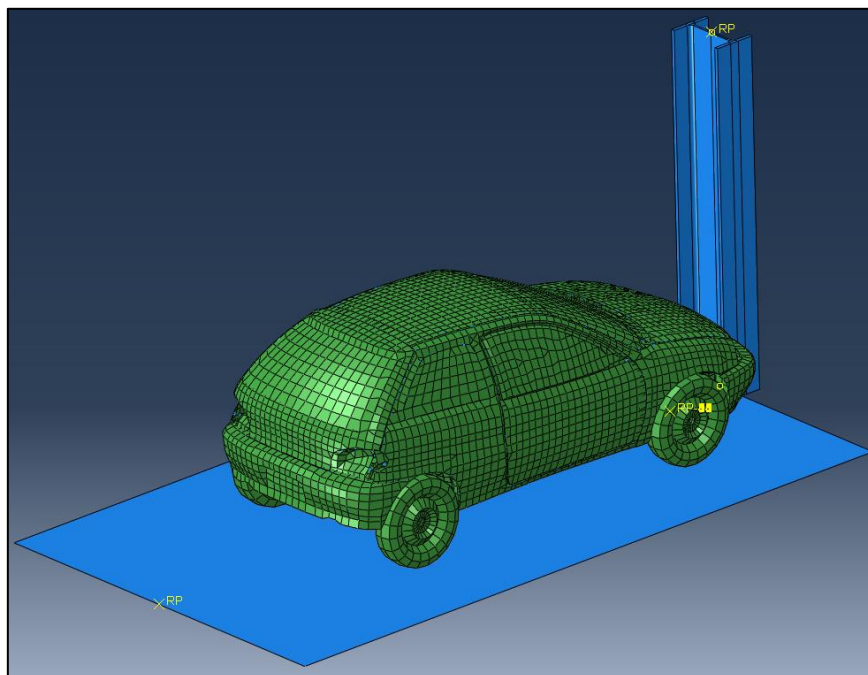
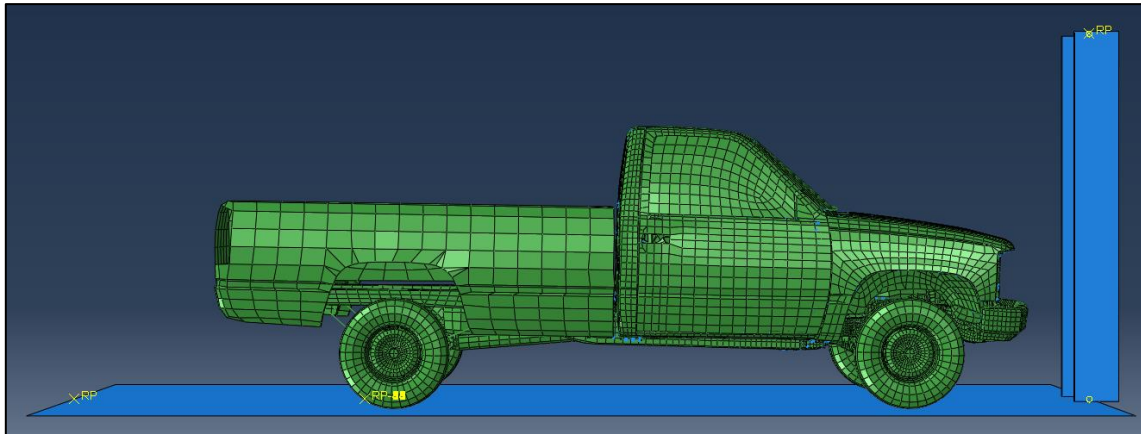
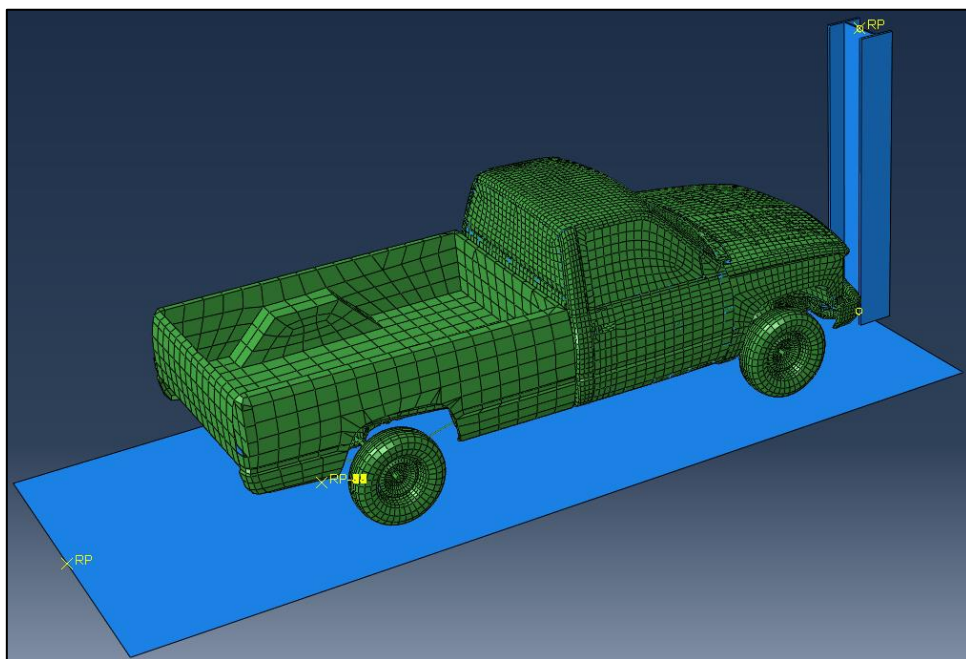


Figura 74. Ensamblaxe do Geo Metro.



**Figura 75. Vista lateral da ensamblaxe do Chevrolet Silverado C1500.**



**Figura 76. Ensamblaxe do Chevrolet Silverado C1500.**

Seguidamente procédese a definir o contacto entre os compoñentes. Primeiro defínense as propiedades do contacto, que neste caso serán un contacto normal de tipo “Hard Contact” e un contacto tanxencial con coeficiente de fricción 0,3.

A continuación, xa definidas as propiedades do contacto, créanse as interaccións correspondentes entre elementos. Xeralmente é suficiente definir unha interacción de tipo “General contact”. Neste caso non é necesario definir o contacto “Surface to surface”, xa que agora só se utilizan os resultados do desprazamento do pilar. Ademais, tamén se necesitan definir a gravidade e as cargas ás que está sometido o pilar.

Finalmente, hai que engadir a velocidade do vehículo, que en ámbalas dúas simulacións é de 20 km/h (5555 m/s), e que se introduce no apartado Predifined Field durante toda a simulación.

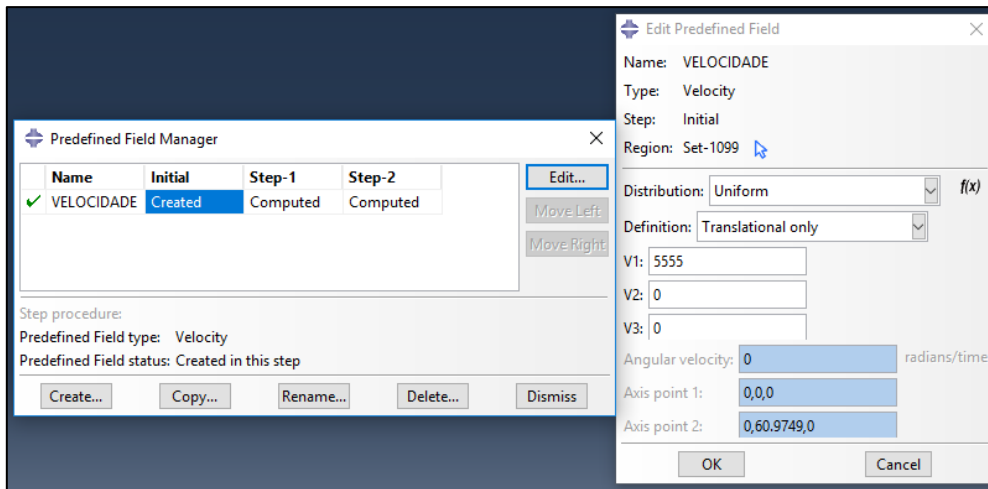


Figura 77. Velocidade do vehículo (I).

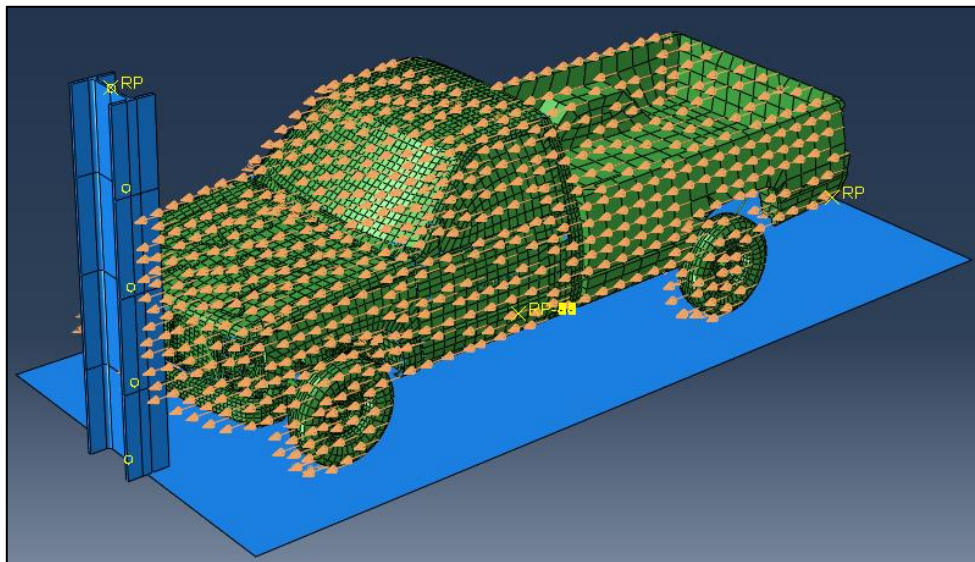


Figura 78. Velocidade do vehículo (II).

## 8.2 Ensamblaxes estáticas

En canto ás ensamblaxes estáticas, hai que ter en conta que están formadas simplemente polo pilar e a superficie que representa o chan. Neste caso, ao pilar aplícaselle unha carga sobre unha superficie determinada (especificada no CTE), que representa a carga estática equivalente.

Ademais, en ámbolos dous casos hai que aplicar aos pilares as condicións de contorno indicadas no artigo de referencia [12]. Estas condicións consisten nun empotramento na base da columna para simular a unión co chan, unha carga axial de 3436 N en sentido negativo do eixe Z no punto central da parte superior do pilar e un momento de 4.58 N·mm aplicado nese mesmo punto e no sentido contrario ao movemento do vehículo.

Estas cargas da parte superior representan as cargas transmitidas polo edificio ao pilar, posto que se está emulando a columna dun aparcadoiro no interior dun edificio de 4 plantas e un soto.

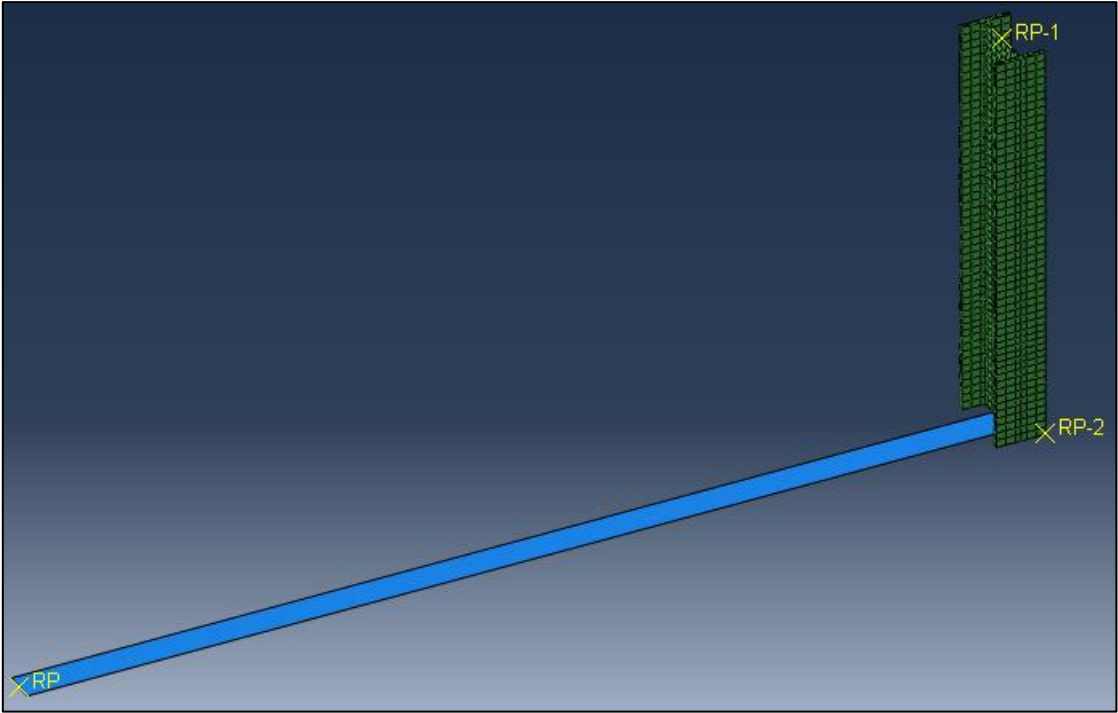


Figura 79. Ensamblaxe para as simulacións estáticas.

## 9 SIMULACIÓNS DO CHERVROLET SILVERADO C1500

En primeiro lugar realízanse as simulacións do Chevrolet Silverado, posto que é o mesmo modelo de coche que o empregado no artigo de referencia [12]. Deste maneira, ademais de poder comprobar o cumprimento da normativa, tamén se poderá realizar unha validación do modelo.

### 9.1 Simulación dinámica do Chevrolet Silverado C1500

Este é o primeiro caso de impacto, no que a pickup ten unha masa de 1800 kg, dos cales 1640 kg correspóndense coa masa do modelo do vehículo e os outros 160 kg cos puntos de masa que representan os ocupantes. Este impacto prodúcese contra o perfil HEB-450 no seu eixe débil, a unha velocidade de 20 km/h.

Neste caso, debido á introdución dos puntos de masa, a masa do vehículo é a mesma que no artigo [12].

#### 9.1.1 Secuencia de impacto

A continuación, móstrase a secuencia de impacto do Chevrolet Silverado C1500 con o pilar, onde a cor dos elementos representa a tensión de Von Mises

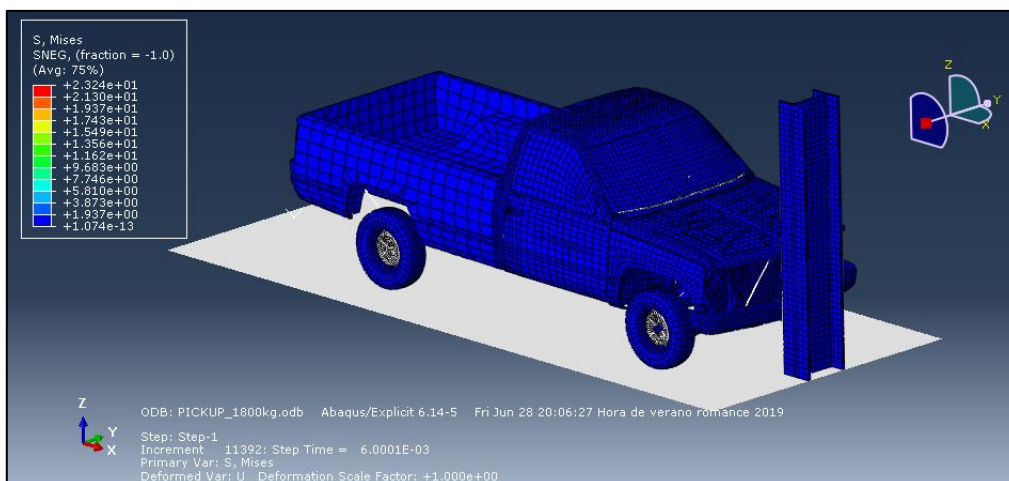


Figura 80. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en  $t=0,006$  s.

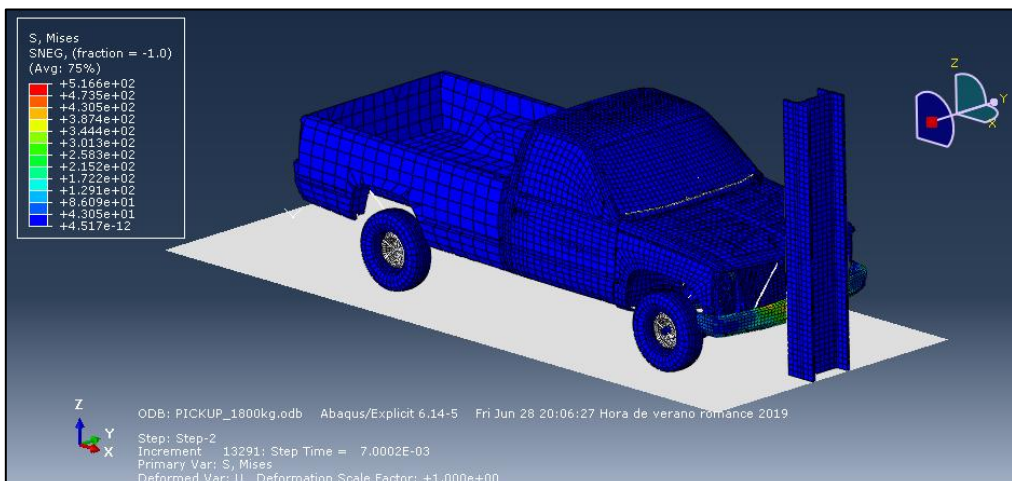


Figura 81. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en  $t=0,017$  s.

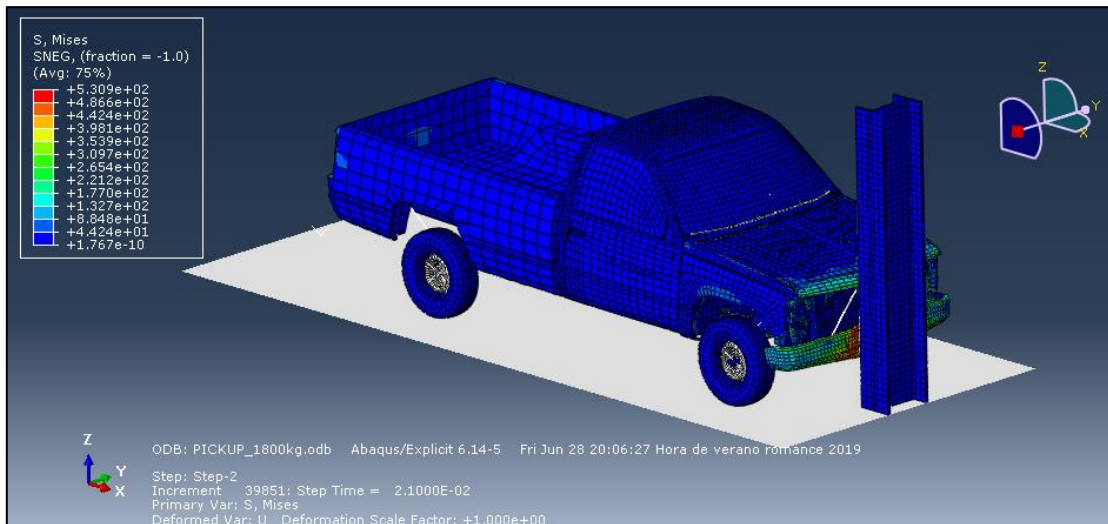


Figura 82. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en t=0,03 s.

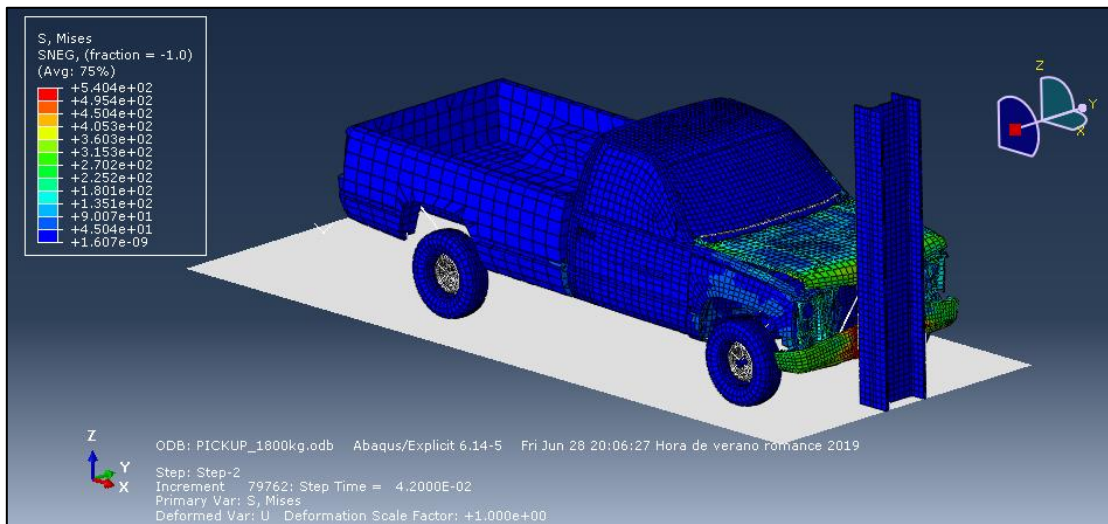


Figura 83. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en t=0,052 s.

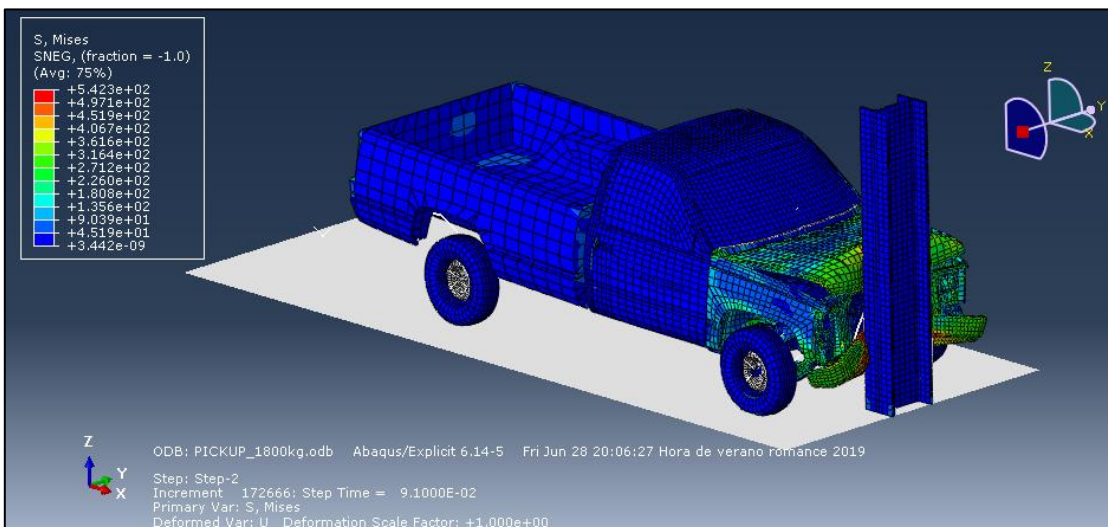


Figura 84. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en t=0,101 s.



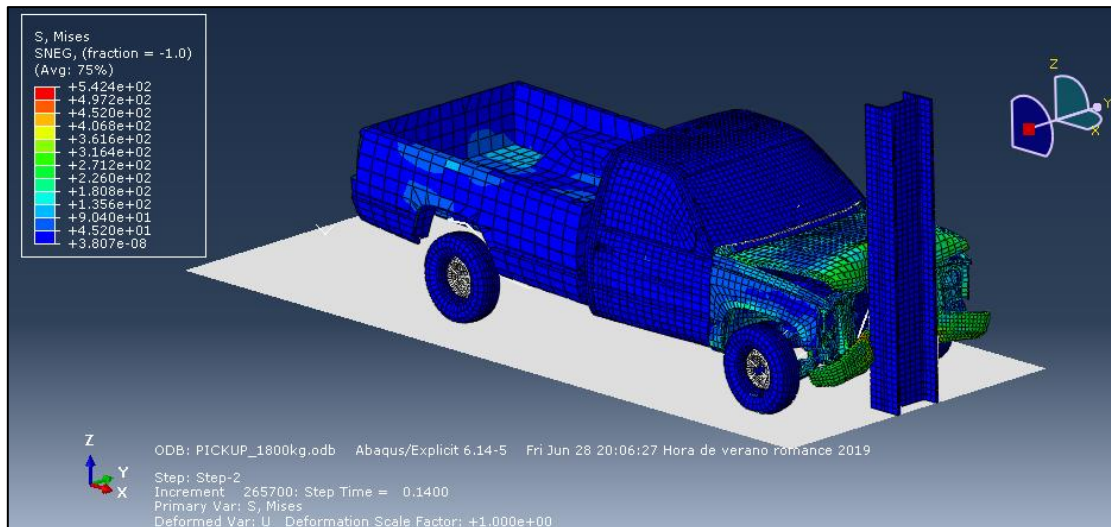
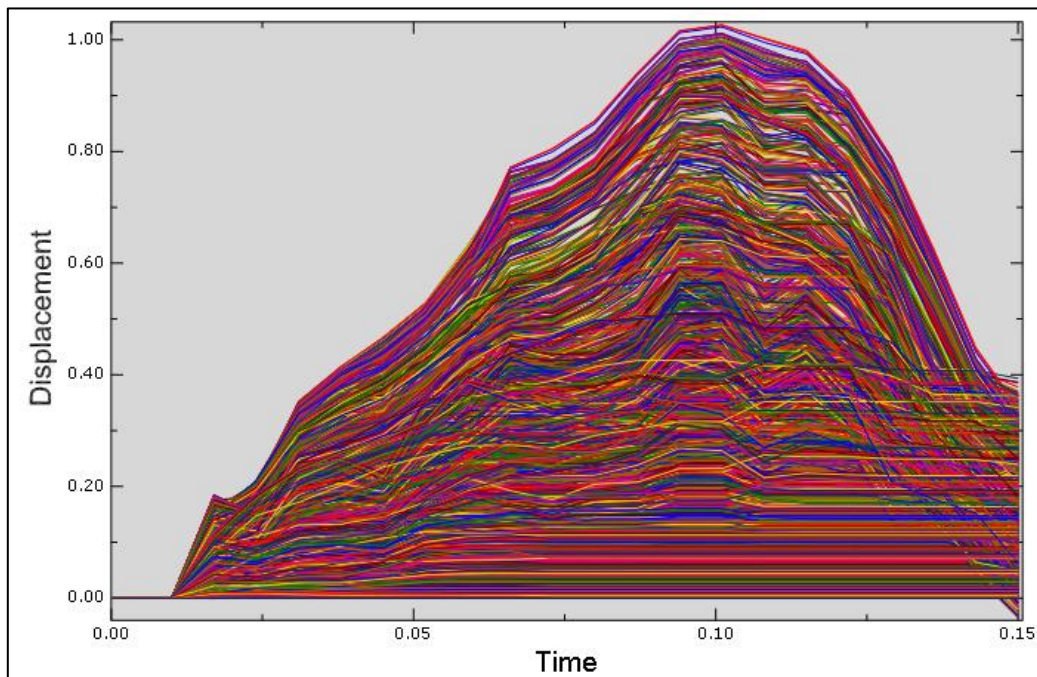


Figura 85. Secuencia de impacto da pickup contra o pilar en  $t=0.15$  s.

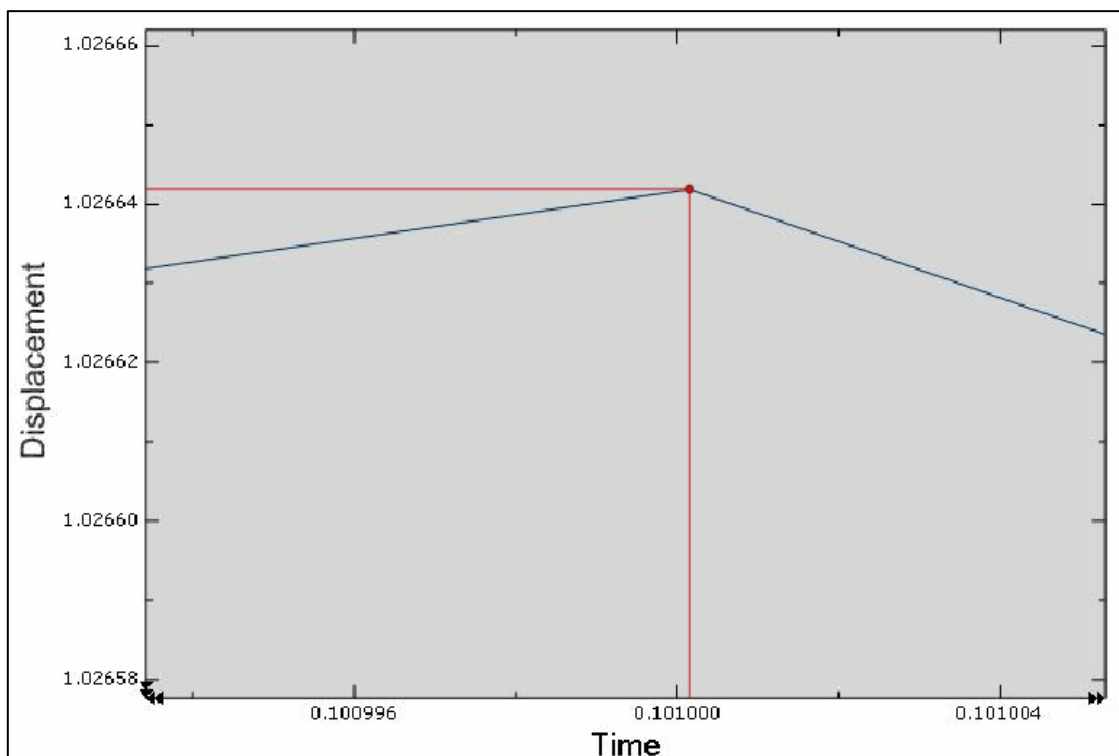
Na Figura 80 apreciase a pickup desprazándose á velocidade de 20 km/h antes do impacto contra o pilar. Nas Figuras 81 e 82 pódense ver o contacto da defensa e do capó co pilar, respectivamente. A partir dun certo momento vese a gran deformación que sofren algúns elementos e que incluso chegan a plastificar, tal e como se pode apreciar na Figura 84.

### 9.1.2 Resultados da simulación

Nesta simulación dinámica do impacto da pickup obtense que o desprazamento máximo do pilar na dirección do eixe X é de 1,026 mm. Este desprazamento obtense aos 0,101 s do inicio da simulación.



Gráfica 5. Desprazamento de todos os nodos do pilar.



**Gráfica 6. Ampliación da Gráfica 5 no punto de máximo desprazamento.**

Cabe destacar que no artigo de referencia [12] este desprazamento máximo é de 1.3 mm e que se acadaba aos 0,137 s do inicio da simulación.

A diferenza dos resultados obtidos neste estudo cos do artigo de referencia pódense deber a varios motivos. Sen embargo, parece claro que o principal motivo da mínima diferenza que existe entre os dous desprazamentos máximos é o modelo de elementos finitos empregado, xa que para este traballo usouse un modelo máis completo e máis detallado que para o artigo de referencia. Por outro lado, a diferenza do instante no que se produce ese pico de máximo desprazamento débese á posición inicial do vehículo con respecto ao pilar.

O tempo empregado para a realización desta simulación foi de 3 horas exactas, polo que pode observarse a gran complexidade e o moi ben detallado que está o modelo empregado.

Na seguinte táboa amósanse as características do ordenador no que se levou a cabo a simulación.

**Táboa 8. Resume das características do ordenador empregado na simulación do Chevrolet Silverado C1500.**

Modelo	HP Pavilion Notebook
Sistema operativo	Windows 10 Home 64 bits
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-6500 CPU @ 2.50GHz 2.59GHz
RAM	8,00 GB (7,89 GB utilizable)
Tarxeta gráfica	NVIDIA GeForce 940MX
Versión de Abaqus/CAE	6.14-5
Tempo de simulación	3 horas

## 9.2 Simulación estática do Chevrolet Silverado C1500

Unha vez finalizada a simulación dinámica do impacto, o seguinte paso é a realización dunha simulación estática na que se de o mesmo desprazamento máximo do pilar, pero aplicando unha carga estática equivalente, tal e como está establecido no CTE [1]. Segundo dita norma “a forza equivalente de impacto considerarase actuando nun plano horizontal e aplicarase sobre unha superficie rectangular de 0,25 m de altura e unha anchura de 1,5 m, ou a anchura do elemento si esta é menor, e a unha altura de 0,6 m por encima do nivel de rodadura, no caso de elementos verticais, ou a altura do elemento, si é menor de 1,8 m horizontais”.

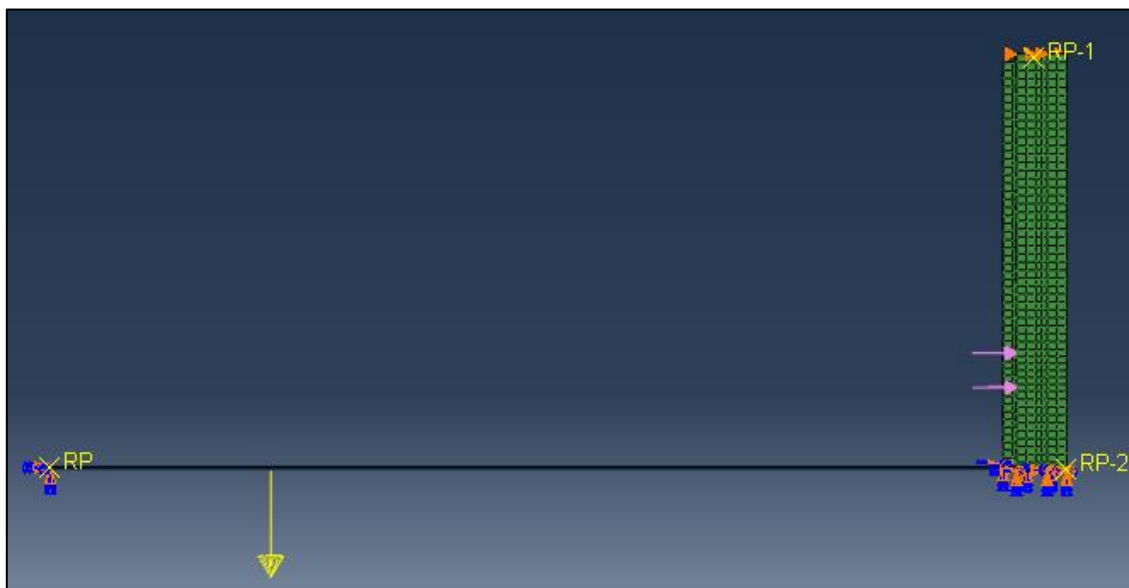
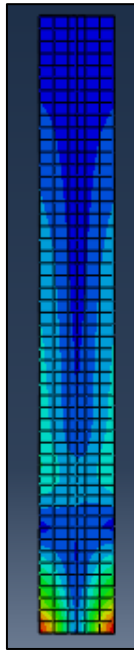
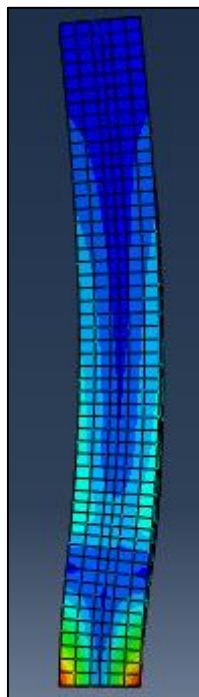


Figura 86. Modelo empregado para a realización da simulación estática.

Na Figura 86 anterior pode verse como se tivo que definir a forza estática equivalente sobre a superficie acotada do pilar.



**Figura 87. Vista lateral da simulación finalizada.**



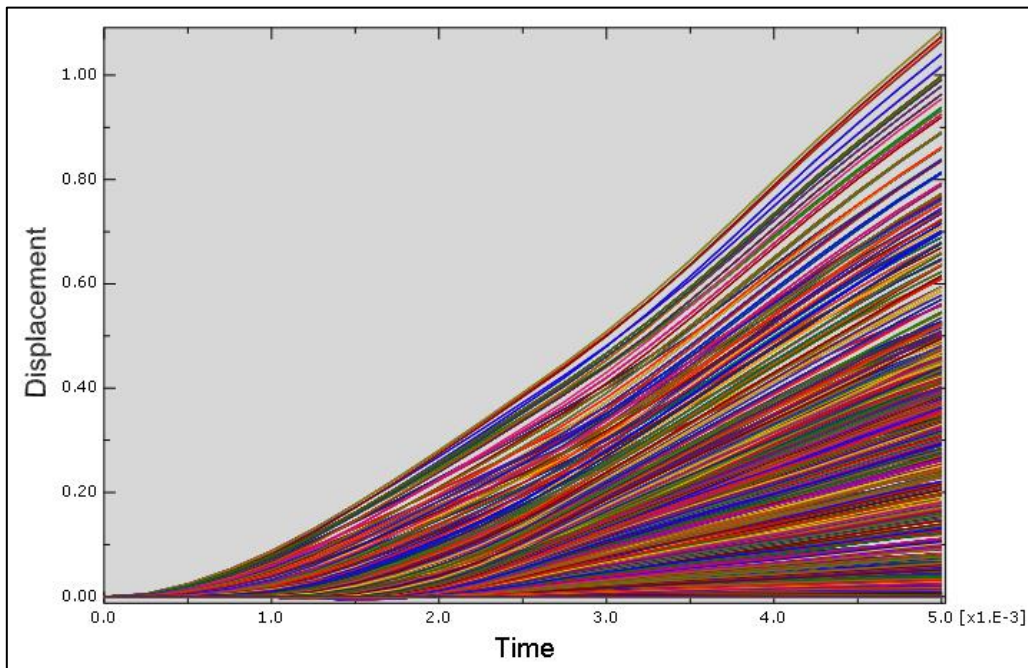
**Figura 88. Vista lateral da simulación finalizada cun factor de escala de 200.**

Nas Figuras 87 e 88 apréciase que as tensión máis grandes que sofre o pilar concéntranse principalmente na unión co chan debido á pouca distancia que hai dende a zona de impacto a esa superficie.

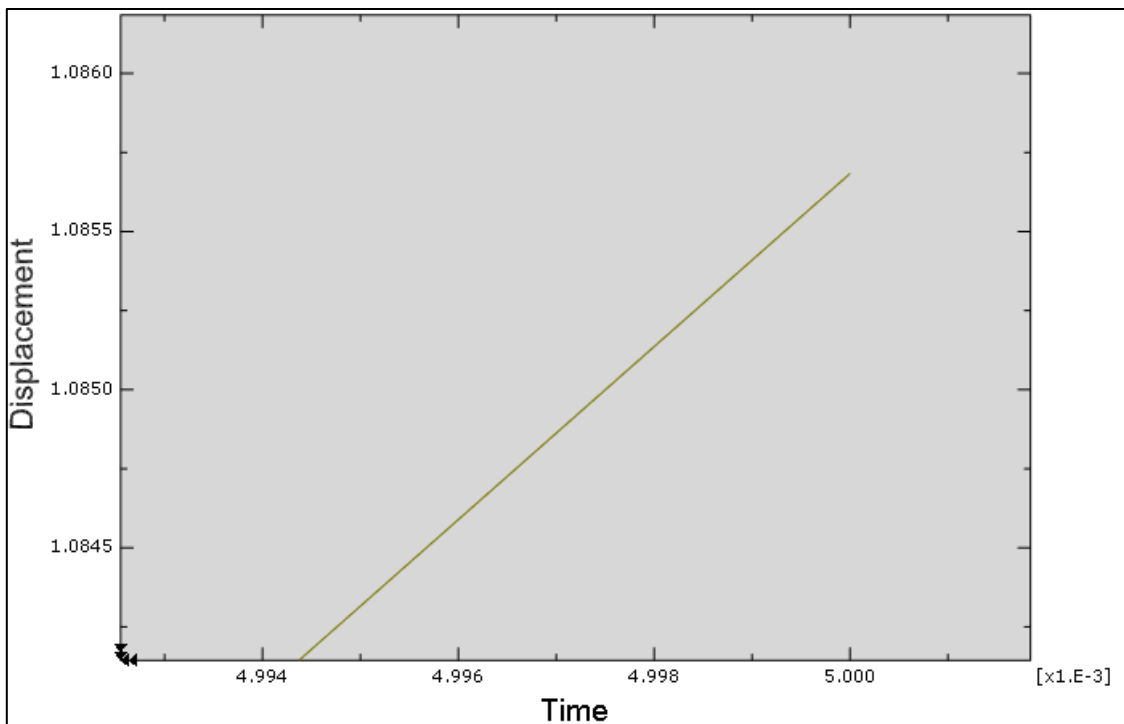
A carga estática aplícase nunha área concreta do pilar ata que o desprazamento máximo da columna no caso estático fora igual ao do caso dinámico.

O procedemento seguido para a obtención da carga equivalente máxima consiste en simular a aplicación dunha carga moi elevada na rexión especificada pola normativa. A

partires dos resultados obtidos desta simulación pódese calcular a carga estática equivalente mediante unha sinxela regra de tres, posto que a deformación que sofre o pilar é lineal con respecto ao tempo, xa que en ningún instante se supera o límite de proporcionalidade do material. Polo tanto, aplicando unha carga inicial de 130.000 N obtense a seguinte gráfica de desprazamentos de todos os nodos do pilar:



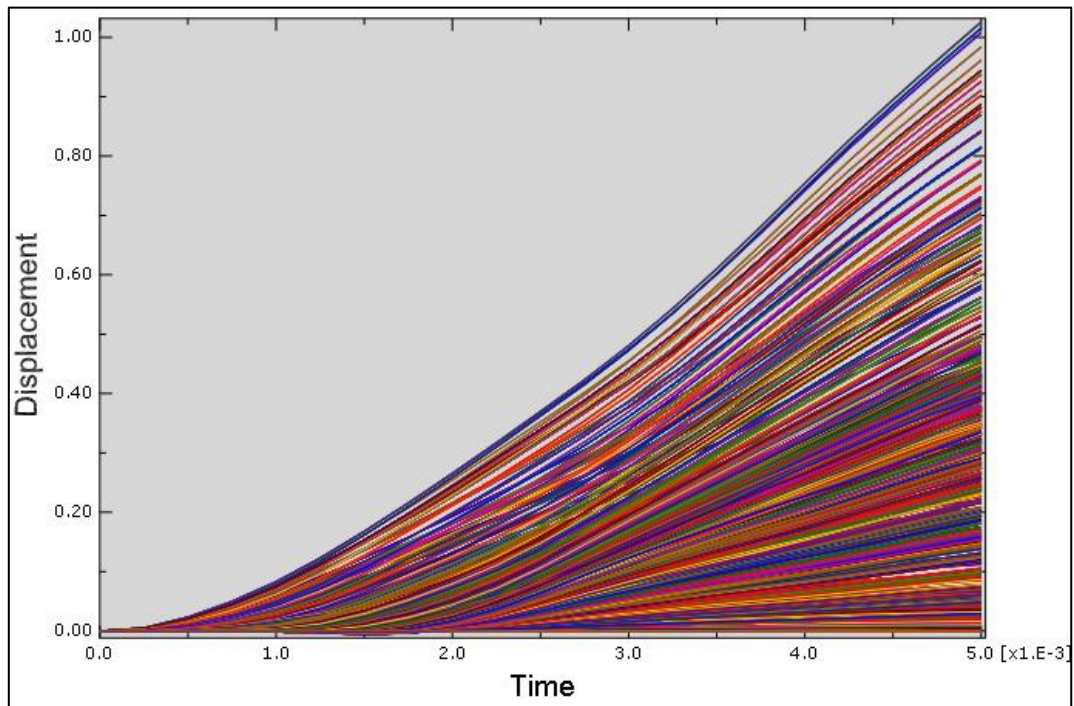
**Gráfica 7. Desprazamento de todos os nodos do pilar aplicando unha carga de 130 kN na simulación estática.**



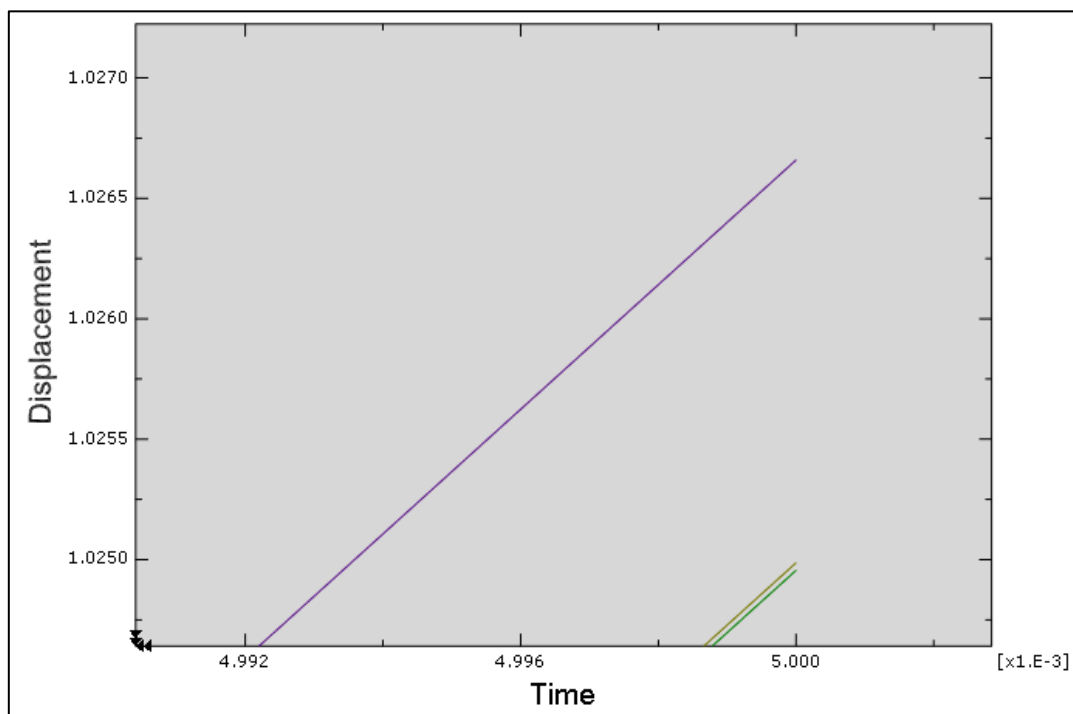
**Gráfica 8. Ampliación da gráfica de desprazamentos no seu punto máximo**

Tal e como se observa nas Gráficas 7 e 8, o desprazamento máximo obtido ao aplicar unha carga de 130 kN é de 1,085 mm, polo tanto, realizando unha simple regra de tres obtense que a forza estática equivalente ao impacto do vehículo é de 122.930 N.

A validez deste resultado compróbase realizando outra simulación estática, neste caso xa coa carga de 122.930 N.



Gráfica 9. Desplazamento de todos os nodos do pilar ao aplicar a carga estática equivalente.



Gráfica 10. Desplazamento de 1,026 mm acadado coa forza estática equivalente.

Nas Gráficas 9 e 10, pódese observar que, efectivamente, a forza estática calculada provoca o mesmo desprazamento máximo no pilar que o impacto do vehículo.

Con todos estes datos obtidos, para rematar a comparación co artigo [12], realízase unha táboa na que se amosan os resultados deste estudo e os de dito artigo:

**Táboa 9. Comparativa de resultados co artigo de referencia.**

TFM		Artigo [12]		Error	
Desp. máx. (mm)	F. estática (kN)	Desp. máx (mm)	F. estática (kN)	Desp. máx.	F. estática
1,026	122,93	1,3	105	21%	14%

## 10 SIMULACIÓNS DO GEO METRO

No caso do Geo Metro repítase o procedemento seguido co Chevrolet Silverado C1500. En primeiro lugar, realizase unha simulación dinámica do impacto do turismo contra un pilar HEB-450 dun aparcadoiro e, posteriormente, a partires dos resultados obtidos realizase unha simulación estática para obter a forza estática equivalente que provoca o mesmo desprazamento máximo no pilar que o impacto do vehículo. Deste xeito, pódese comparar o resultado obtido nas simulacións co establecido na normativa.

### 10.1 Simulación dinámica do Geo Metro

Este trátase do segundo caso de impacto contra o pilar, no que o turismo ten unha masa final de 791 kg, froito da suma da masa do modelo do vehículo, 631 kg, e os puntos de masa engadidos para simular os ocupantes e que son de 80 kg cada un deles.

#### 10.1.1 Secuencia de impacto

A continuación, dende a Figura 89 ata a Figura 94 móstrase a secuencia de impacto do Geo Metro contra o pilar, onde, unha vez máis, a cor dos elementos representa a tensión de Von Mises.

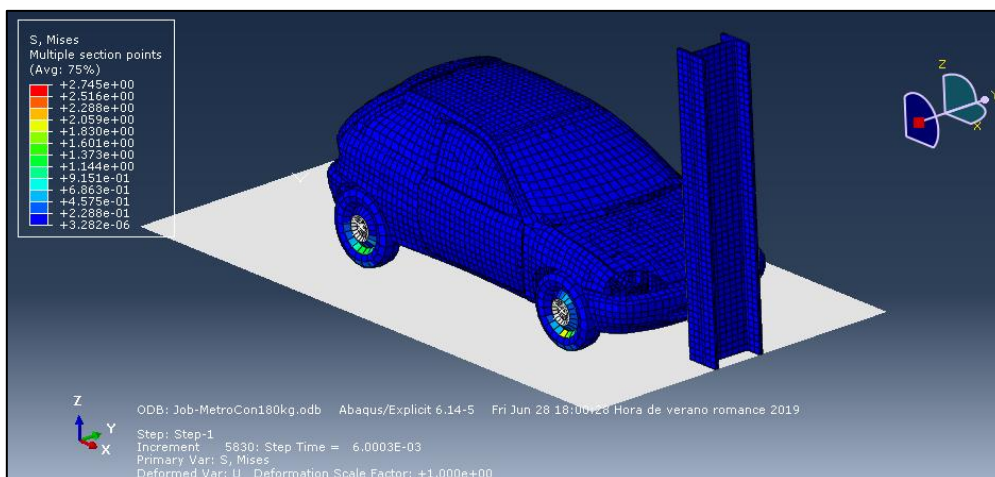


Figura 89. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en  $t=0,006$  s.

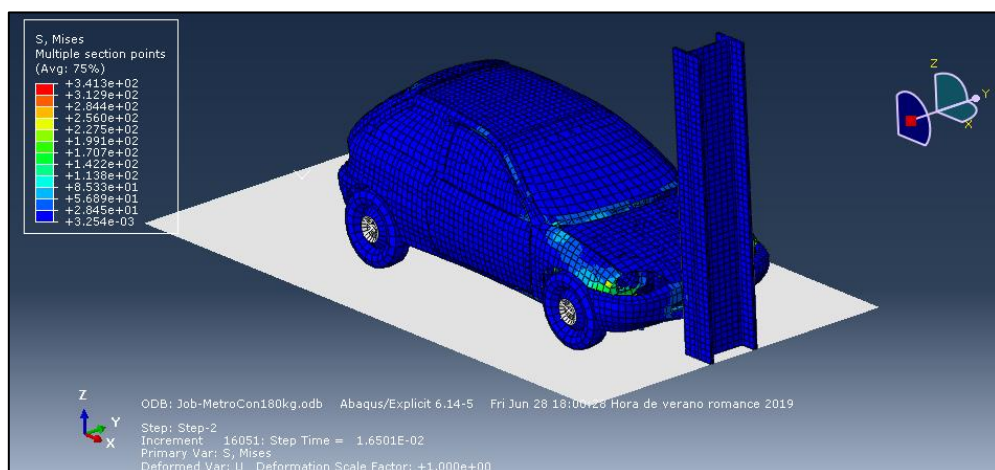


Figura 90. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en  $t=0,026$  s.



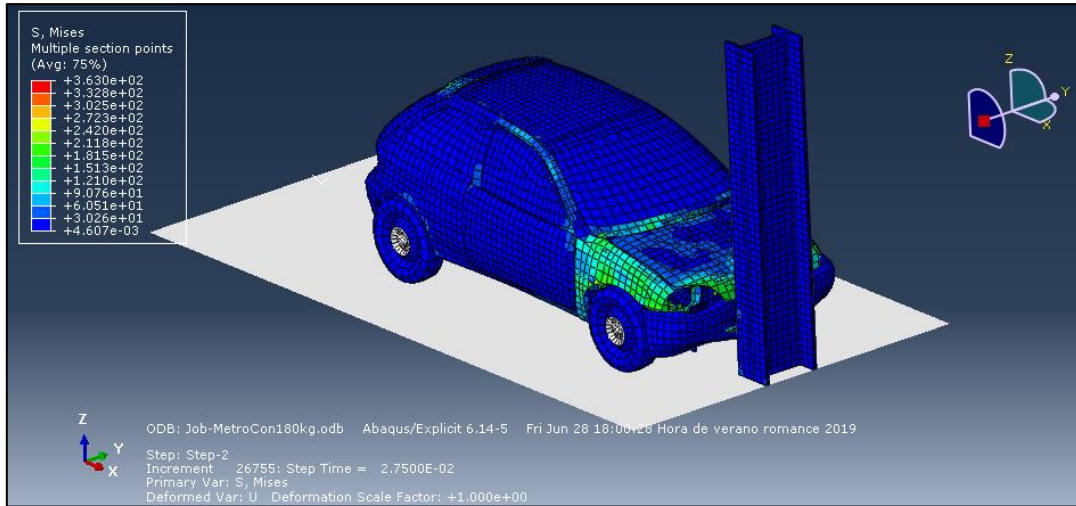


Figura 91. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en  $t=0,037$  s.

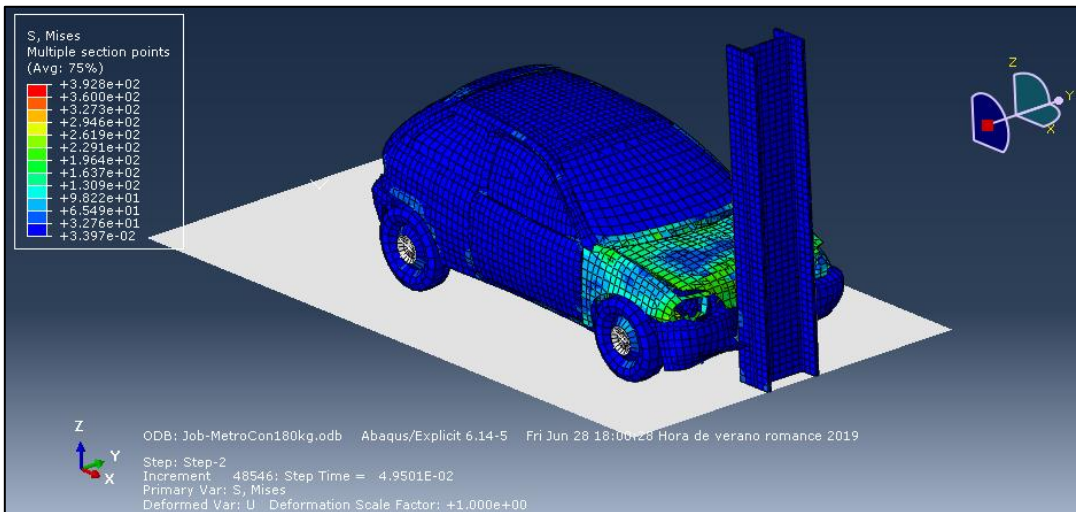


Figura 92. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en  $t=0,056$  s.

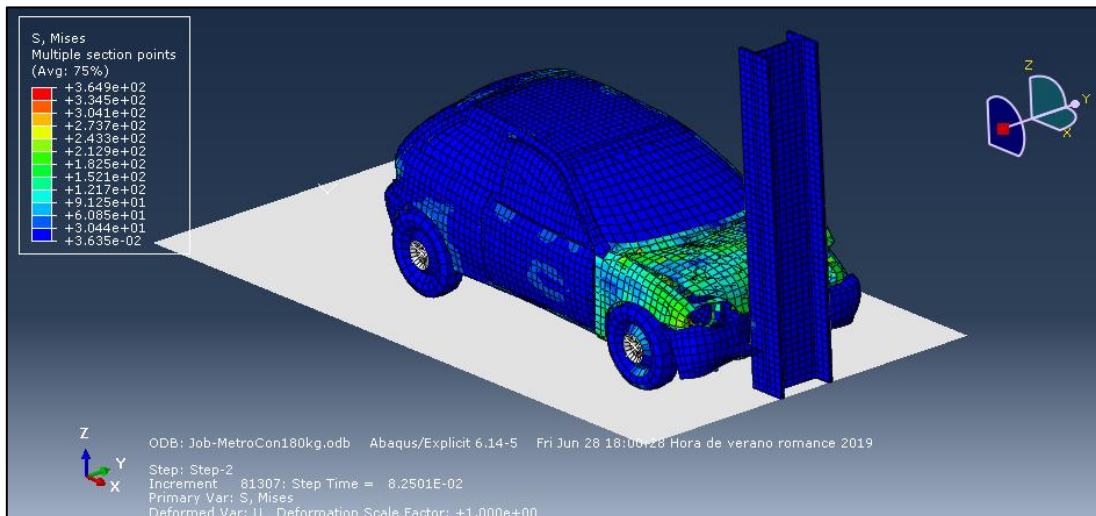


Figura 93. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en  $t=0,092$  s.

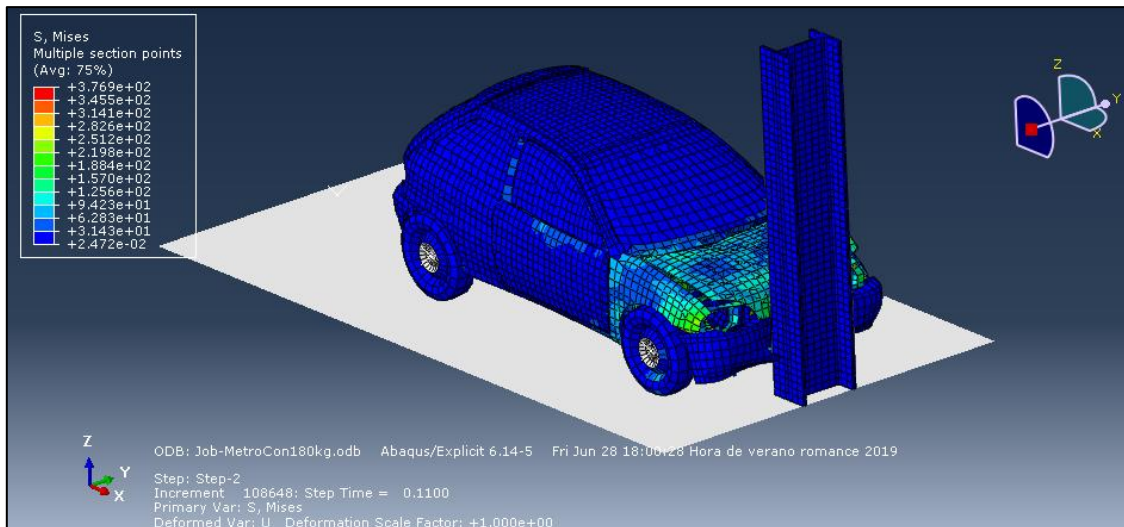
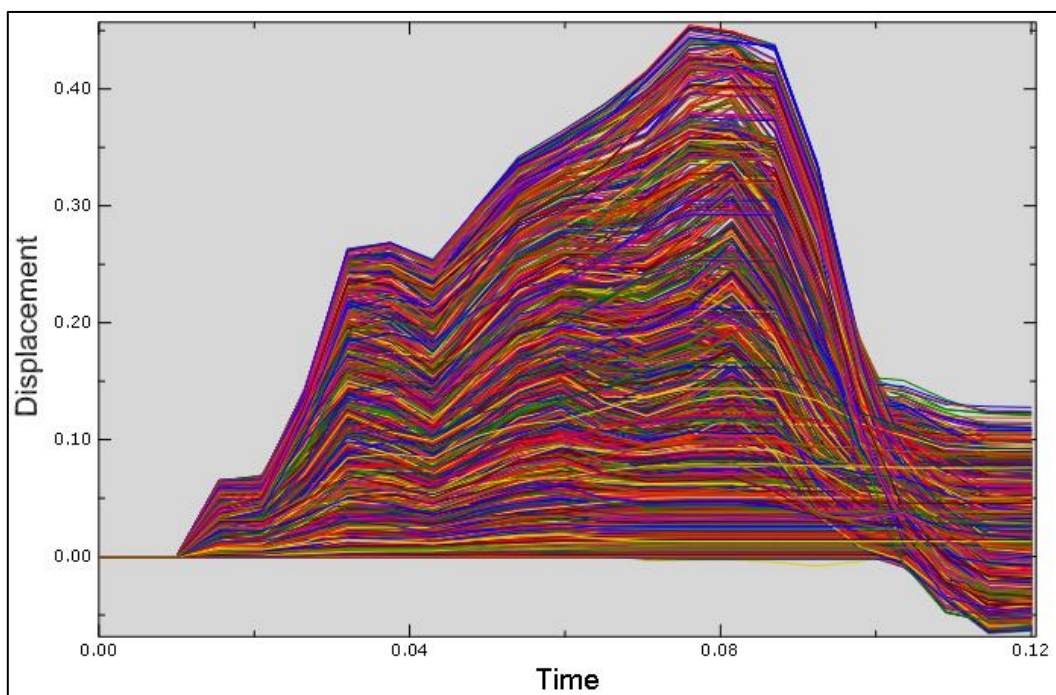


Figura 94. Secuencia de impacto do turismo contra o pilar en  $t=0,12$  s.

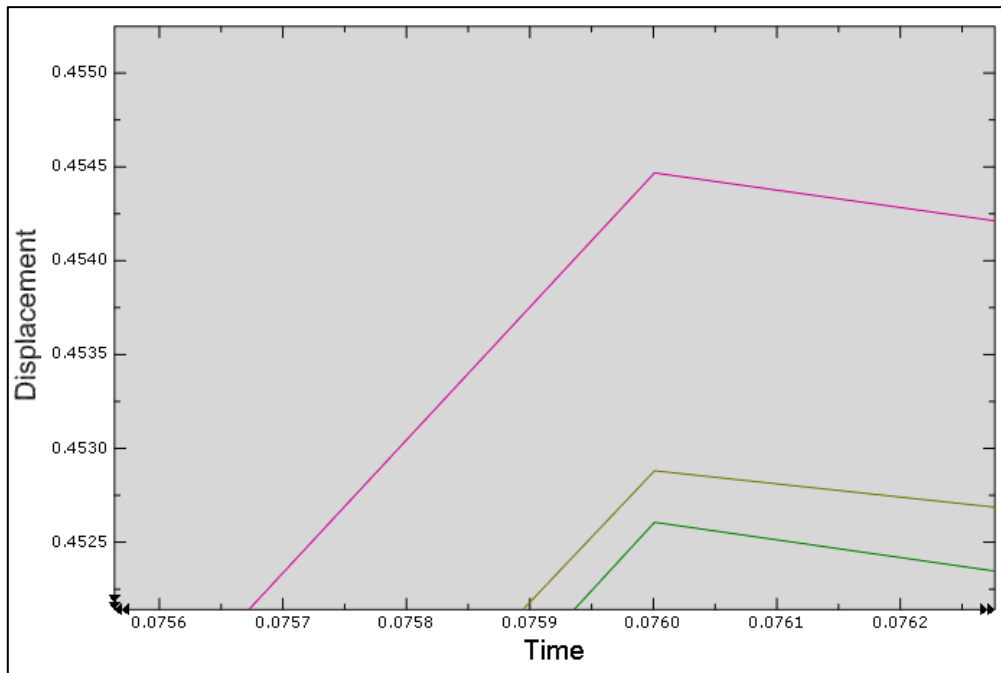
Inicialmente o vehículo desprázase cunha velocidade de 20 km/h cara o pilar, tal e como se ve na Figura 89. A primeira parte en entrar en contacto co pilar é a defensa, seguida do capó, tal e como se pode apreciar nas Figuras 90 e 91, respectivamente. Ademais, ao igual que no caso da pickup, hai un momento do impacto a partir do cal algúns compoñentes empezan a plastificar debido a súa gran deformación, tal e como se observa na Figura 93. Finalmente, na Figura 94, apreciase o efecto do rebote tras o impacto.

### 10.1.2 Resultados da simulación

O desprazamento máximo do pilar obtido durante esta simulación é 0,454 mm, o cal se utilizará na simulación estática para obter a forza estática equivalente que proporciona ese mesmo desprazamento máximo no pilar.



Gráfica 11. Desprazamento de todos os nodos do pilar na simulación dinámica.



**Gráfica 12. Ampliación da gráfica de desprazamentos no seu punto máximo.**

Así mesmo, cabe destacar que o tempo empregado para realizar esta simulación é de 24 minutos e 46 segundos, polo que pode observarse a gran diferenza de complexidade e detalle que hai entre este modelo e do Chevrolet Silverado C1500

Na seguinte táboa amósanse os datos do ordenador empregado para realizar esta simulación e a duración da mesma.

**Táboa 10. Resume das características do ordenador empregado na simulación do Geo Metro.**

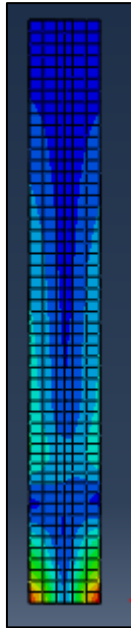
Modelo	HP Pavilion Notebook
Sistema operativo	Windows 10 Home 64 bits
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-6500 CPU @ 2.50GHz 2.59GHz
RAM	8,00 GB (7,89 GB utilizable)
Tarxeta gráfica	NVIDIA GeForce 940MX
Versión de Abaqus/CAE	6.14-5
Tempo de simulación	24 minutos e 46 segundos

## 10.2 Simulación estática do Geo Metro

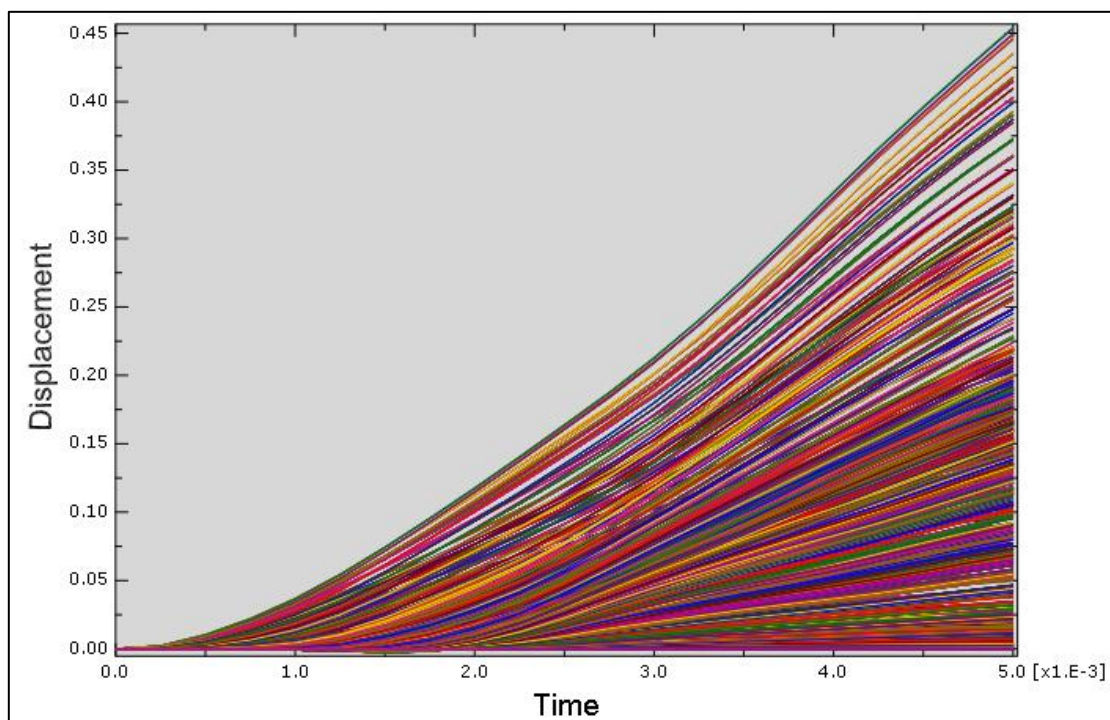
Unha vez finalizada a simulación dinámica do impacto do Geo Metro contra o pilar e obtido o desprazamento máximo deste último, o seguinte paso consiste en calcular a forza estática equivalente que sería necesario aplicar para obter ese mesmo desprazamento máximo. Para elo, empréganse os resultados obtidos para a simulación estática do Chevrolet Silverado C1500 aplicando a carga de 130.000 N, xa que, tal e como se comentou con anterioridade, en ningún caso se supera o límite de proporcionalidade do material e polo tanto a súa deformación é lineal durante toda a simulación.

Con todo isto, e aplicando unha regra tres, obtense que a carga estática equivalente para o caso do Geo Metro é de 54.396 N.

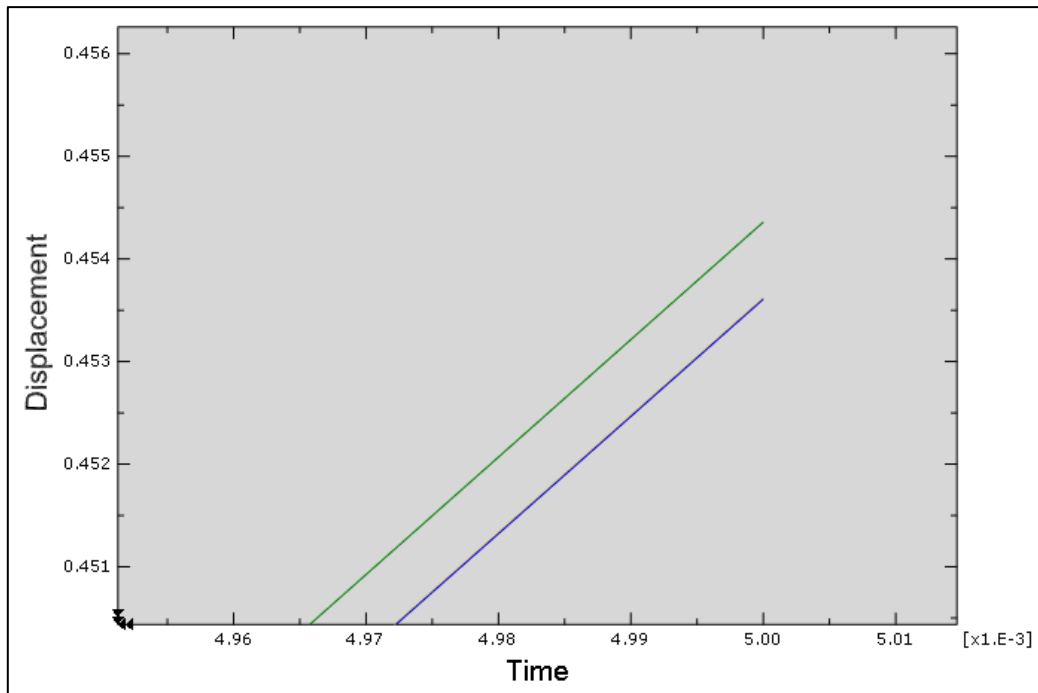
A comprobación deste resultado faise cunha nova simulación estática onde a carga aplicado sobre o pilar son estes 54.396 N, de maneira que se obteñen os seguintes resultados:



**Gráfica 13. Resultado final da simulación estática do Geo Metro.**



**Gráfica 14. Desprazamentos dos nodos do pilar durante a simulación estática do Geo Metro.**



Observando as Gráficas 14 e 15 vese que, efectivamente, a forza de 54.396 N produce un desprazamento máximo de 0,454 mm, mesmo resultado que a simulación dinámica.

## 11 RESULTADOS

Co obxectivo de analizar os resultados obtidos ao longo de todo este estudo, realízase a seguinte táboa onde se fai unha comparativa dos resultados conseguidos para ámbolos dous vehículos e os datos de forza estática equivalente ofrecidos pola normativa.

**Táboa 11. Comparación dos resultados obtidos co CTE.**

Modelo	TFM		CTE	% diferenza de forzas
	Disp. (mm)	Forza (kN)	Forza (kN)	
Chevrolet Silverado C1500	1,026	122,93	50	59,33%
Geo Metro	0,454	54,396	50	8,08%

**Táboa 12. Comparación dos resultados obtidos co Anexo C do Eurocódigo 1.**

Modelo	TFM		Anexo C do Eurocódigo 1	% diferenza de forzas
	Disp. (mm)	Forza (kN)	Forza (kN)	
Chevrolet Silverado C1500	1,026	122,93	129,1	-5,02%
Geo Metro	0,454	54,396	85,58	-57,33%

Como era de esperar, danse uns resultados de desprazamento máximo do pilar maiores no impacto do Chevrolet Silverado C1500, polo que tamén se obtén unha maior forza estática equivalente. Estes resultados débense á diferenza de masas que hai entre ámbolos dous vehículos, posto que o Geo Metro ten un 56% menos de masa que a pickup. Este feito demostra que a tipoloxía do vehículo ten unha gran influencia nas cargas de impacto en estruturas.

Nestas táboas tamén se pode ver a diferenza existente entre as forzas estáticas equivalentes propostas polas normativas [1] e [2] e os resultados obtidos nas simulacións deste estudo. Na táboa 7 compáranse os resultados deste estudo co CTE e o apartado 1.7 do Eurocódigo 1, que son os mesmos, mentres que na táboa 8 a comparación realízase cos valores da forza estática equivalente calculados seguindo as indicacións do Anexo C do apartado 1.7 do Eurocódigo 1.

Como se pode observar na primeira das táboas, a forza estática equivalente acadada mediante as simulacións e superior en ámbolos dous vehículos á forza proposta polo CTE e o apartado 1.7 do Eurocódigo 1, chegando a ser un 59,33% superior no caso da pickup e un 8,08% no caso do turismo.

En canto á comparativa co Anexo C do Eurocódigo 1 obsérvase que as forzas estáticas equivalentes nos dous vehículos son menores que o calculado segundo a fórmula establecida nesta normativa. Así, obtense que para o caso do Chevrolet Silverado C1500 unha forza estática un 5,02% menor que a establecida pola normativa, mentres que no caso do Geo Metro este porcentaxe de diferenza aumenta ata o 57,33%.

Estes resultados amosan claramente que a forza estática equivalente establecida no CTE está do lado da inseguridade para ámbolos dous tipos de vehículos, mentres que o Anexo C do apartado 1.7 do Eurocódigo 1 adopta por unha posición máis conservadora e ofrece unha ecuación que da uns resultados aceptables dentro da seguridade.

Tamén se debe precisar que en ningunha das normativas se fai referencia á velocidade do vehículo, é dicir, que en ningunha se especifica para que velocidade do vehículo están

consideradas as forzas que mencionas, agás no Anexo C do apartado 1.7 do Eurocódigo 1. A velocidade para este tipo de impactos é un parámetro moi importante que establecer, xa que a súa variación implica unha variación cadrática na enerxía cinética do vehículo, o que faría que cambiaran as forzas estáticas equivalentes moi rapidamente.

Así mesmo, hai que destacar que o feito de obter uns valores de forza máis elevados que os que indican as normativas, exceptuando o Anexo C do apartado 1.7 do Eurocódigo 1, fai que sexa interesante e adecuado unha modificación da normativa actual. Desta maneira, sería interesante que o CTE estableza uns valores da forza equivalente do lado da seguridade, tal e como sucede no caso do Anexo C do Eurocódigo 1.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABALLO FIN DE MESTRADO  
CURSO 2018/19**

---

*ESTUDO DA INFLUENCIA DA TIPOLOXÍA DO  
VEHÍCULO NAS CARGAS DE IMPACTO EN  
ESTRUTURAS*

---

**Mestrado en Enxeñaría Industrial**

**Documento**

**CONCLUSIÓNS**



## 1 CONCLUSIÓN

Grazas aos resultados obtidos con estes modelos de elementos finitos utilizados neste estudo, quedaron patentes unha serie de conclusións referentes á normativa vixente para cargas de impacto en estruturas.

En primeiro lugar, cabe dicir que a velocidade é un parámetro chave que hai que definir claramente, xa que a variación desta implica unha variación cadrática na enerxía cinética do vehículo, o que pode provocar cambios bruscos na forza estática equivalente. Así mesmo, é necesario recalcar que tanto no CTE como no Eurocódigo 1, agás no Anexo C, non establecen para que velocidades do vehículo definen as forzas estáticas equivalentes que aportan.

En segundo lugar, é preciso indicar que á vista dos resultados, tanto o CTE como o apartado 1.7 do Eurocódigo 1 amosan uns valores de forzas estáticas do lado da inseguridade, tal e como se pode observar nas Táboas 11 e 12 da memoria. Deste xeito, no caso do impacto do Chevrolet Silverado C1500 a porcentaxe de inseguridade supera o 50%. En cambio, o Anexo C da parte 1.7 do Eurocódigo 1 favorece a seguridade, tal e como se amosas nesas mesmas táboas. Este feito débese a que soamente o Anexo C da parte 1.7 do Eurocódigo 1 contempla a velocidade do vehículo no cálculo da forza estática.

Ademais, cabe precisar que na maioría dos casos nos que se producen accións como as que se analizaron neste traballo os pilares son moi resistentes e practicamente non lles afecta este tipo de accións. Isto é debido a que normalmente trátase de edificios grandes que as propias necesidades estruturais do edificio xa implican dimensionar os pilares de tal maneira que van poder resistir o tipo de impactos aquí analizados. Non obstante, hai que ter en conta que non todas as edificacións son tan grandes como as que se consideran neste estudo. Polo tanto, é necesario revisar as normativas actuais, xa que si os impactos se produciran nun aparcadoiro onde a estrutura non estivera pensada para soportar un gran edificio é posible que chegara a haber consecuencias estruturais.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABALLO FIN DE MESTRADO  
CURSO 2018/19**

---

*ESTUDO DA INFLUENCIA DA TIPOLOXÍA DO  
VEHÍCULO NAS CARGAS DE IMPACTO EN  
ESTRUTURAS*

---

**Mestrado en Enxeñaría Industrial**

**Documento**

**REFERENCIA**

## REFERENCIAS

- 1] *Código técnico de la edificación (CTE). Documento básico: Seguridad Estructural - Acciones en la edificación.*, España, 2009.
- 2] *Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions.*, Unión Europea, 2010.
- 3] «National Highway Traffic Safety Administration,» [En línea]. Available: <https://www.nhtsa.gov/>.
- 4] H. Al-Thairy, «Behaviour and desing of steel columns subjected to vehicle impact,» University of Manchester, Manchester, 2012.
- 5] D. Pérez Illescas, «Simulación de un choque frotal de un vehículo contra diferentes tipos de barrera.,» Universidad Carlos III, Madrid, 2009.
- 6] D. B. Nieto, «Estudio del impacto de un vehículo sobre señales de tráfico mediante LS-Dyna.,» Universidad Carlos III, Madrid, 2010.
- 7] J. Sánchez Aguilera, «Simulación de un choque lateral con dummy sin cinturón mediante LS-Dyna,» Universidad Carlos III, Madrid, 2011.
- 8] [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20150415013506/http://www.ncac.gwu.edu:80/vml/models.html>.
- 9] D. Ogmaia y S. Elias Tasel, «Simulation of vehicle crash into bridge».
- 10] [En línea]. Available: <https://www-nrd.nhtsa.dot.gov/database/VSR/veh/VehicleCatalogTN.aspx>.
- 11] NHTSA, «National Highway Traffic Saffety Administration,» [En línea]. Available: <https://www.nhtsa.gov/vehicle/1994/GEO/METRO>.
- 12] B. Ferrer, S. Ivorra, E. Segovia y R. Irlles, «Tridimensional modelization of the impact of a vehicle against a metallic parking column at a low speed,» Universidad de Alicante, Alicante, 2010.
- 13] M. B. Ferrer Crespo, «Estudio del comportamiento de pilares de edificación frente a cargas de impacto,» Universiad de Alicante, Alicante, 2011.
- 14] «National Crash Analysis Center,» [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20140126023840/http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>.
- 15] «Abaqus Analysis User's Guide,» Dassault Systèmes, [En línea]. Available: <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/usb/default.htm>.
- 16] AENOR, «Norma UNE 157001,» España, 2014.
- 17] U. d. Vigo, «Diseño, simulación FEM y optimización de una estructura de asiento en aluminio para vehículos,» Vigo, 2016.

NHTSA, «Crash Simulation Vehicle Models,» NHTSA, [En línea]. Available:  
18] <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>.