

DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA PARA EL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA RESPUESTA DE DOS VÉRTEBRAS LUMBARES SOMETIDAS A CARGA COMBINADA.

JORGE ELIECER RANGEL VERA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD INGENIERÍA MECATRÓNICA

BUCARAMAGA

2016

DISEÑO METODOLÓGICO

1. Recopilación bibliográfica
2. Obtención del modelo CAD
3. Análisis por elementos finitos
4. Validación de los resultados
5. Desarrollo de la interfaz grafica
6. Difusión de resultados

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una interfaz gráfica que permita analizar por el método de elementos finitos un par de vértebras lumbares sometidas a condiciones de carga combinada.



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

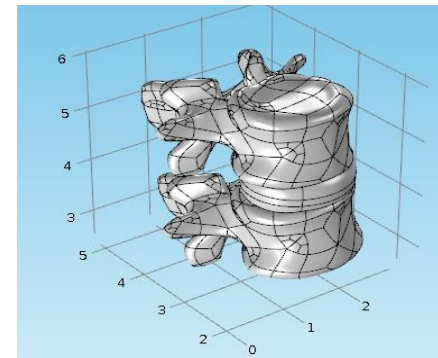
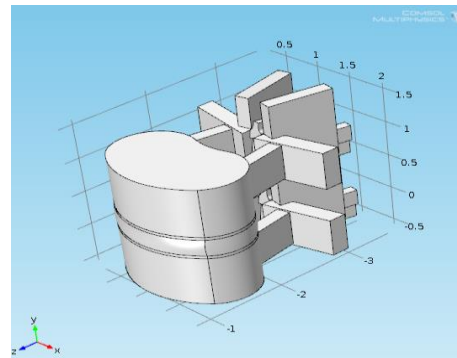
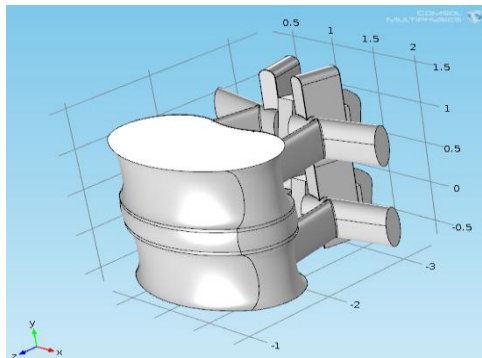
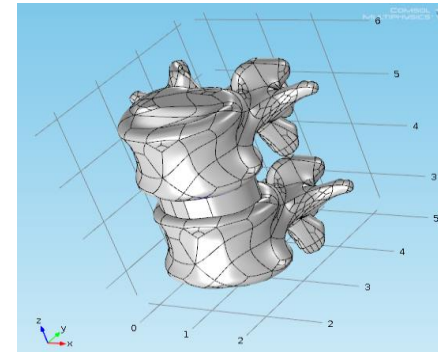
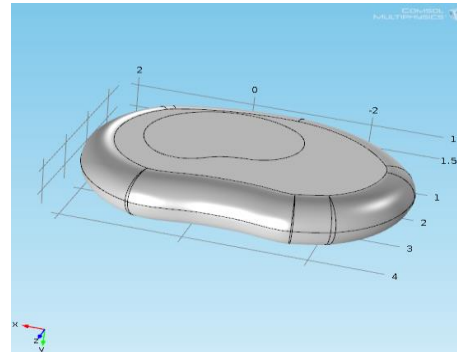
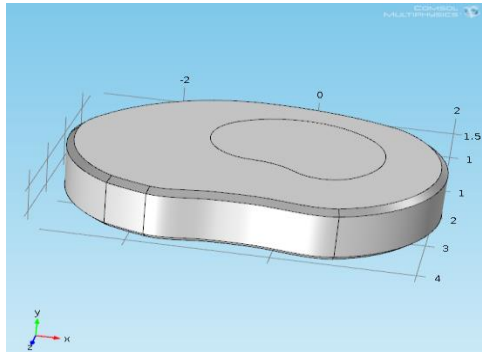
Desarrollar un modelo CAD de las dos vértebras lumbares utilizando el software de diseño SOLIDWORKS.

Simular el comportamiento de las vértebras sometidas a diferentes cargas utilizando el software de diseño asistido por computador COMSOL.

Diseñar una interfaz gráfica portable que permita desarrollar diferentes tipos de análisis por elementos finitos a las vértebras.

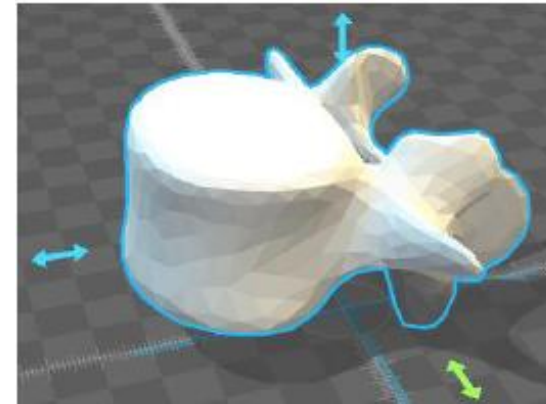
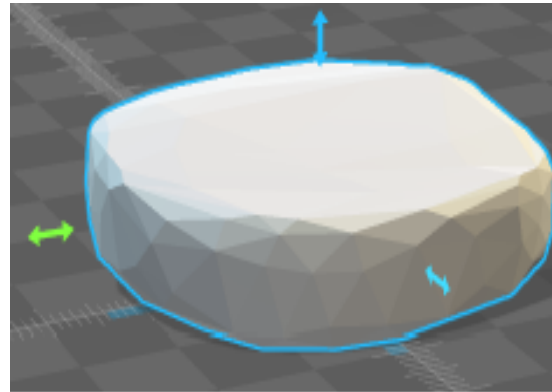
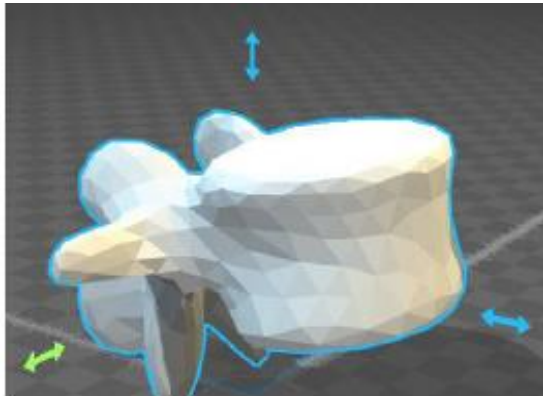


MODELO CAD SOLIDWORKS



Modelos CAD SolidWorks

MODELO POR TOMOGRAFÍA



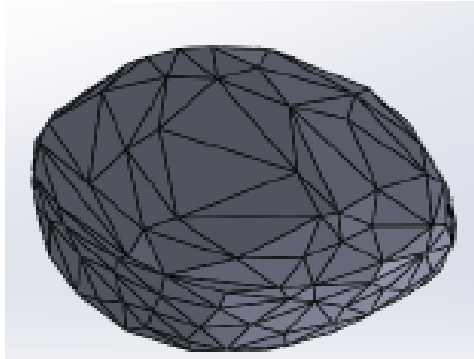
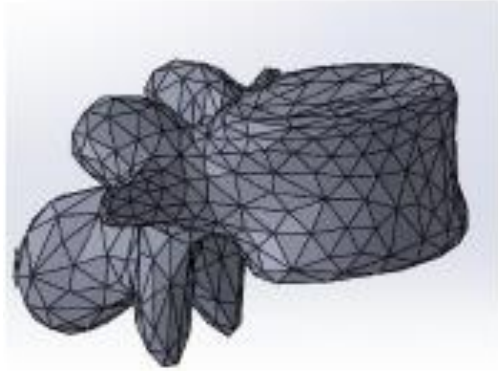
Modelos CAD: a) Vértebra L3, b) Disco intervertebral, c) Vértebra L4

MESHCONV

```
Command Prompt
C:\Users\jjang_000\Desktop\model>meshconv D.OBJ -c stl
-- meshconv 3D mesh converter, version 1.17, build #1730, timestamp 2015/05/21
11:20:00
-- written by Patrick Min. 1997 - 2015
Timer [main timer] started
will convert to [stl]
MeshFileIdentifier::*create_mesh_file(D.OBJ)
ObjMeshFile::load(D.OBJ)
455 lines read
Read 296 faces, 150 vertices.
Mesh::remove_zero_area_faces
checked 296 faces, removed 0 faces
Mesh::fix_duplicates
Timer [find duplicates] started
150 done, found 0 duplicates
Timer [find duplicates] stopped at 0.003 seconds
MeshFileIdentifier::*create_mesh_file(D.stl)
StlMeshFile::save(D.stl)
filename [D]
STL File type: BINARY
StlMeshFile::save_binary
Mesh::triangulate, initial number of faces: 296
will add 0 faces
will remove 0 out of 296 faces
Mesh::purge_removed_faces
Timer [purge] started
Timer [purge] stopped at 0 seconds
final number of faces: 296 (initial was 296)
```

Meshconv conversión formato .obj a .stl

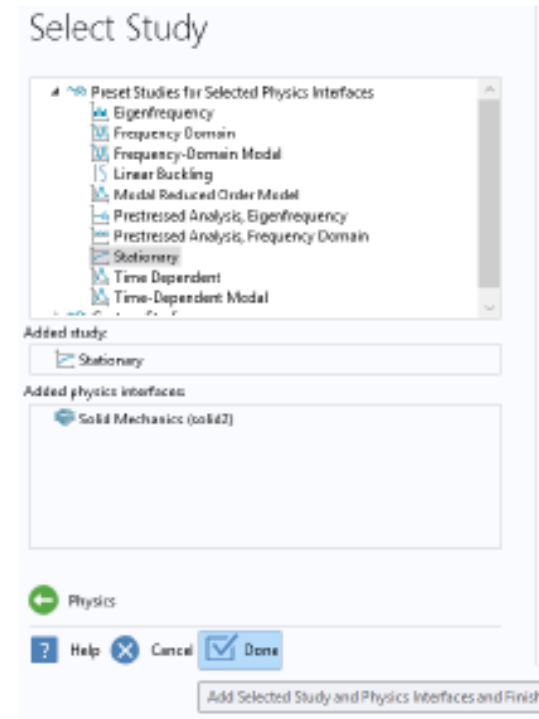
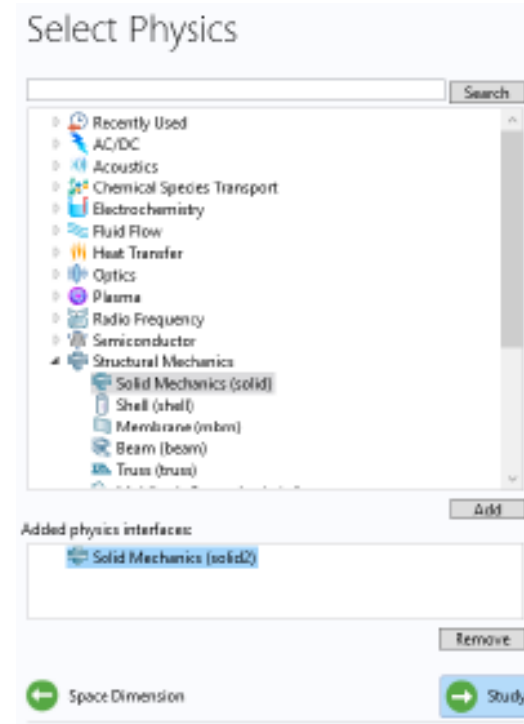
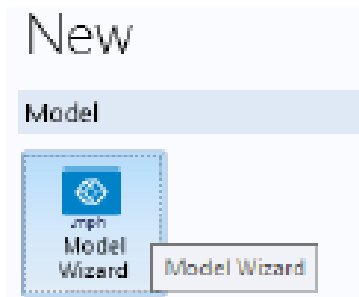
CAD A SOLIDWORKS



Modelos CAD en SolidWorks: a) Vértebra L3, b) Disco intervertebral, c) vértebra L4

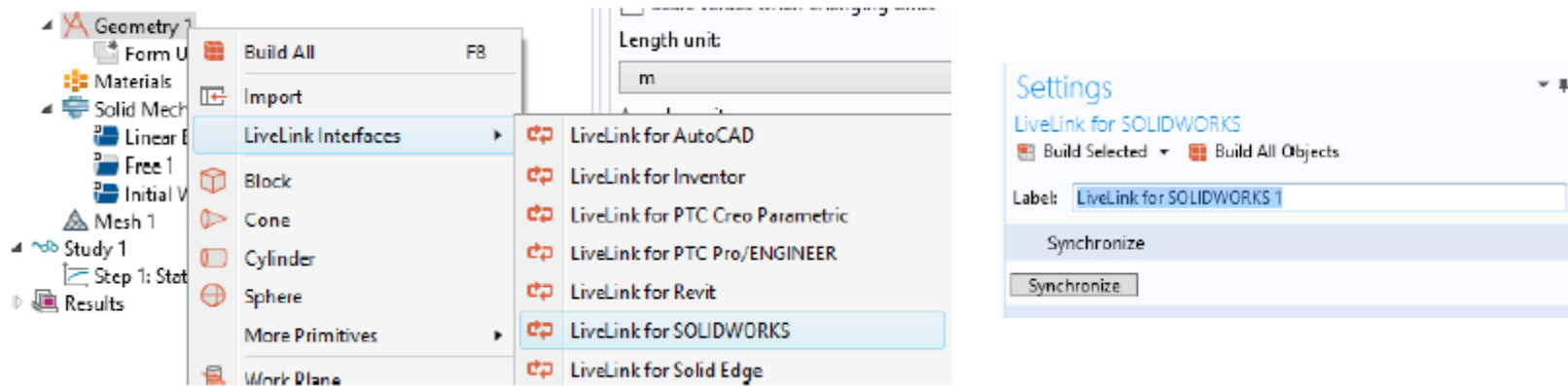


IMPORTACIÓN A COMSOL



Nuevo Modelo Comsol : a)Model Wizard, b)Select Physics , c)Select Study

LiveLink for SOLIDWORKS



Importación desde SolidWorks a Comsol: a)LiveLink , b)Synchronize

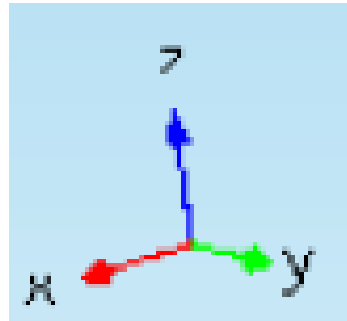
DEFINICIÓN DE PARÁMETROS




| | | |
|--------------|-----------------|------------------------|
| Peso1 | 50*0.6[kg] | 30 kg |
| Gravedad | 9.8[m/s^2] | 9.8 m/s ² |
| MYoung_V... | 12000000000[Pa] | 1.2000E10 Pa |
| Densidad_... | 1908[kg/m^3] | 1908 kg/m ³ |
| MPoisson_... | 0.25 | 0.25 |
| MYoung_... | 450000000[Pa] | 4.5000E8 Pa |
| Densidad_... | 1045[kg/m^3] | 1045 kg/m ³ |
| MPoisson_... | 0.45 | 0.45 |
| Peso2 | 5[kg] | 5 kg |

| | | |
|----|----------------|---|
| F | Peso2*Gravedad | N |
| F2 | Peso1*Gravedad | N |

Definición de parámetros: a)Propiedades , b)Ecuaciones de fuerza

SISTEMAS DE COORDENADAS

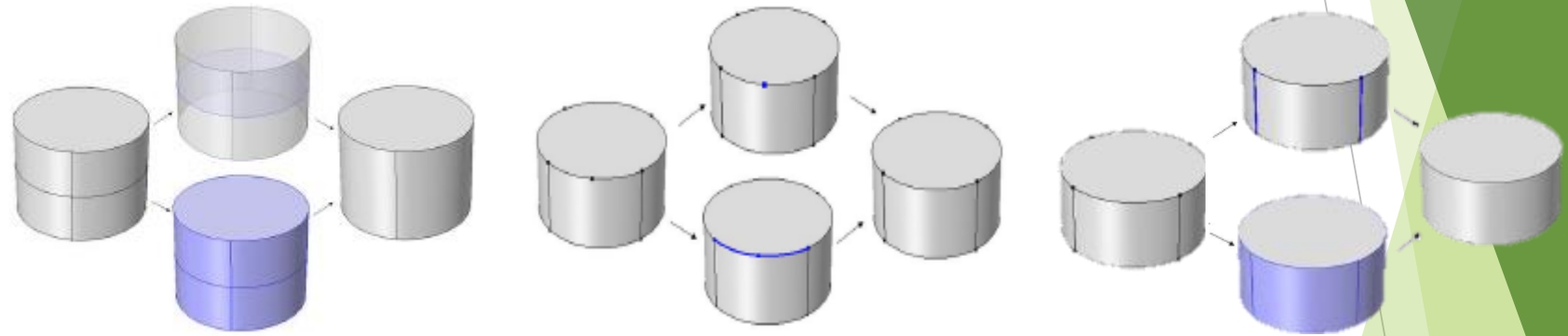


-  Cylindrical System z (sys2)
-  Cylindrical System y (sys3)
-  Cylindrical System x (sys4)

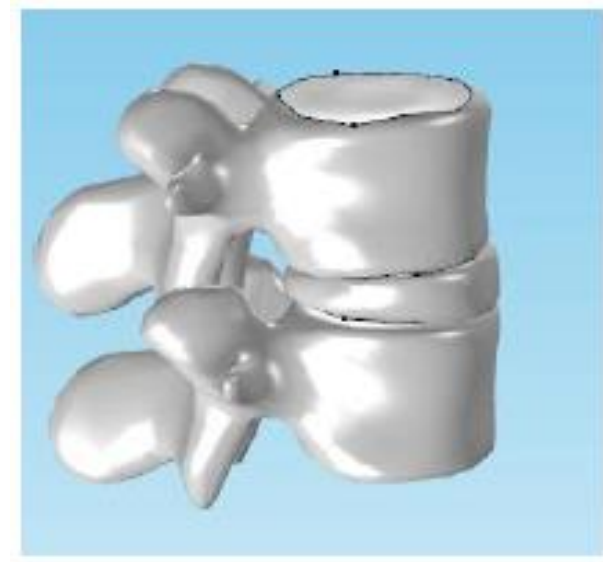
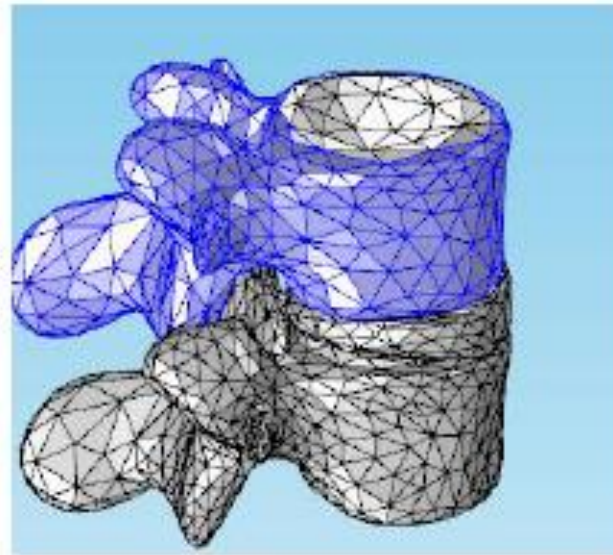
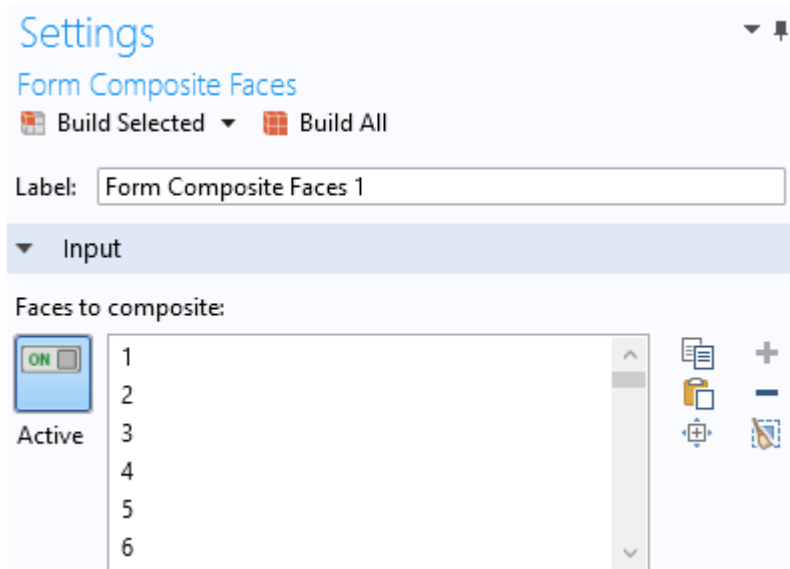
Sistemas de coordenadas: a) Sistema global default , b) Coordenadas cilíndricas

OPERACIONES VIRTUALES

- LiveLink for SOLIDWORKS 1 {cad1}
- Form Union {fin}
- Form Composite Domains 3 {cmd3}
- Form Composite Domains 4 {cmd4}
- Form Composite Faces 1 {cmf1}
- Form Composite Edges 1 {cme1}
- Form Composite Faces 2 {cmf2}
- Form Composite Edges 2 {cme2}
- Form Composite Faces 3 {cmf3}
- Form Composite Edges 4 {cme4}
- Form Composite Edges 5 {cme5}
- Form Composite Faces 4 {cmf4}
- Form Composite Edges 3 {cme3}
- Form Composite Faces 5 {cmf5}
- Form Composite Edges 6 {cme6}



Operaciones virtuales: a) Total de operaciones , b) Composite Domains , c) Composite Edges , d) Composite Faces



Operaciones virtuales: a) Settings, b) CAD antes, c) CAD después

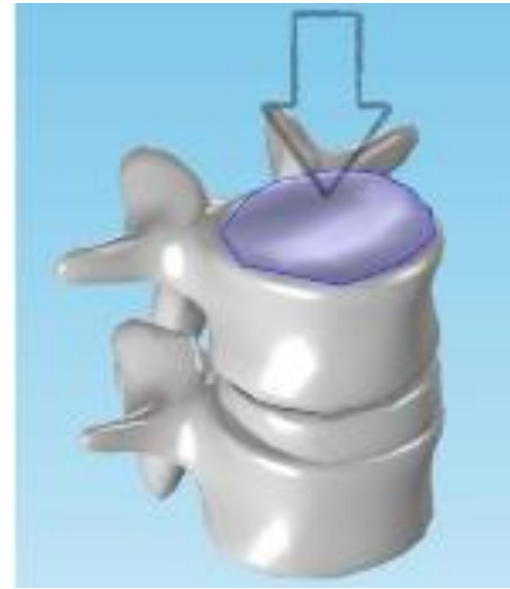
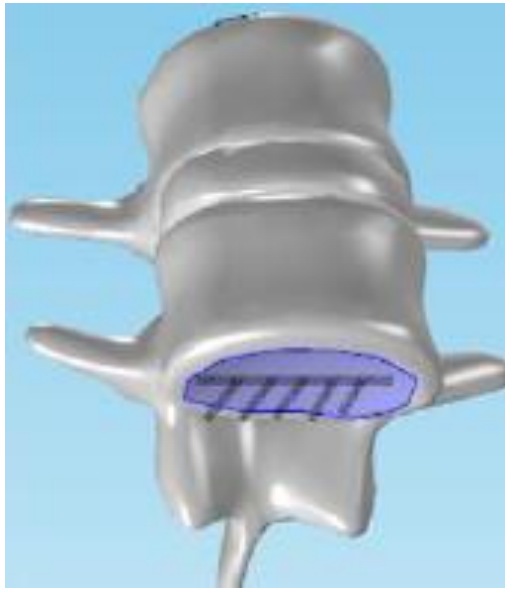
MATERIALES

| Property | Name | Value | Unit | Property group |
|-------------------|------|-------------|-------------------|----------------|
| ✓ Density | rho | 1908 | kg/m ³ | Basic |
| ✓ Young's modulus | E | 12000000... | Pa | Basic |
| ✓ Poisson's ratio | nu | 0.25 | 1 | Basic |

| Property | Name | Value | Unit | Property group |
|-------------------|------|------------|-------------------|----------------|
| ✓ Density | rho | 1045 | kg/m ³ | Basic |
| ✓ Young's modulus | E | 4500000000 | Pa | Basic |
| ✓ Poisson's ratio | nu | 0.45 | 1 | Basic |

*Propiedades de los materiales: a) Propiedades de las vértebras,
b) Propiedades del disco*

CONDICIONES DE FRONTERA



Condiciones de frontera: a) Sección fija, b) Carga corporal, c) Aplicación de cargas

Sistema no lineal elástico

$$F = \sigma_x A = \sigma_x A_0 (1 + \eta)^2$$

$$\sigma = J^{-1} F S F^T$$

$$J = \det(F)$$

Specify:

Poisson's ratio

Poisson's ratio:

ν

From material

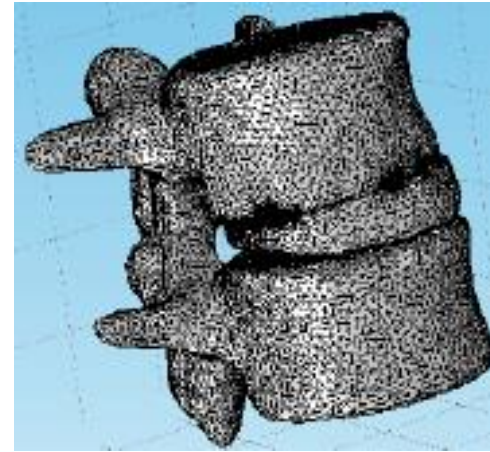
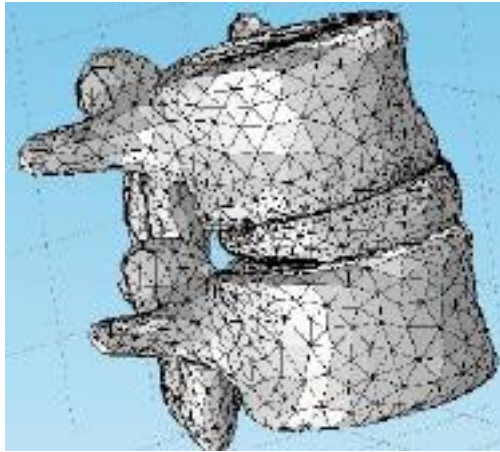
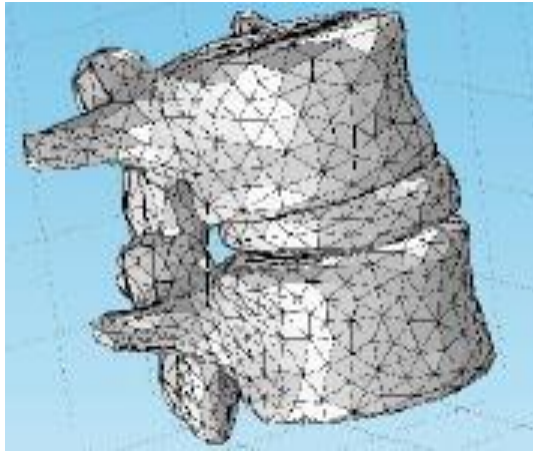
Density:

ρ

From material

Ecuaciones consecutivas: a) Fuerza aplicada , b) Esfuerzo de kirchoff, c) Gradiente de deformación, d) Especificación de propiedades

MALLADO DEL COMPONENTE



Sensibilización de la malla: a) Malla gruesa, b) Malla normal, c) Malla fina

SENSIBILIZACIÓN DE LA MALLA

```
Number of vertex elements: 8  
Number of edge elements: 116  
Number of boundary elements: 4802  
Number of elements: 10801  
Free meshing time: 2.89s  
Minimum element quality: 0.0004621
```

```
Solution time: 8 s  
Physical memory: 2 GB  
Virtual memory: 2.08 GB
```

```
Number of vertex elements: 8  
Number of edge elements: 155  
Number of boundary elements: 6453  
Number of elements: 18212  
Free meshing time: 3.02s  
Minimum element quality: 0.0001377
```

```
Solution time: 16 s  
Physical memory: 2.14 GB  
Virtual memory: 2.31 GB
```

```
Number of vertex elements: 8  
Number of edge elements: 196  
Number of boundary elements: 8622  
Number of elements: 28929  
Free meshing time: 3.87s  
Minimum element quality: 0.005893
```

```
Solution time: 30 s  
Physical memory: 2.46 GB  
Virtual memory: 2.67 GB
```

Sensibilización de la malla: a) Malla gruesa, b) Malla normal, c) Malla fina

VALIDACIÓN BAJO COMPRESION

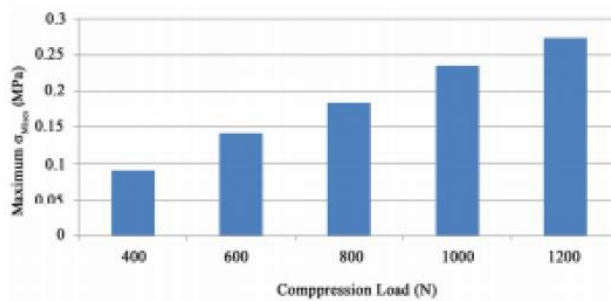


| Mechanical properties | Young Modulus (MPa) | Poisson ratio |
|---|---------------------|-------------------------|
| <u>Bony regions:</u> | | |
| Cortical bone Cancellous bone; QCT-based measurement techniques based on bone mineral density (BMD)). | $E_x = 75 - 3475$ | |
| | $E_y = 75 - 3475$ | |
| | $E_z = 375 - 3475$ | $\nu_{xy} = 0.12 - 0.3$ |
| | $G_{xy} = 6 - 3280$ | $\nu_{yz} = 0.12 - 0.3$ |
| | $G_{yz} = 8 - 3280$ | $\nu_{xz} = 0.12 - 0.3$ |
| | $G_{xz} = 8 - 3280$ | |
| <u>Intervertebral disc:</u> | | |
| • Annulus fibers | $E = 550$ | $\nu = 0.3$ |
| • Nucleus | $E = 8$ | $\nu = 0.45$ |
| • Annulus | $E = 2$ | $\nu = 0.499$ |
| <u>Cartilaginous plates:</u> | | |
| • Higher | $E = 0.48$ | $\nu = 0.3$ |
| • Medium | $E = 0.96$ | $\nu = 0.3$ |
| • lower | $E = 0.384$ | $\nu = 0.3$ |
| <u>Ligaments :</u> | | |
| • Anterior longitudinal | $E = 20$ | $\nu = 0.3$ |
| • Posterior longitudinal | $E = 70$ | $\nu = 0.3$ |
| • transverse | $E = 50$ | $\nu = 0.3$ |



Validación bajo compresión : a) Modelo CAD , b) Propiedades materiales, c) Condiciones de frontera

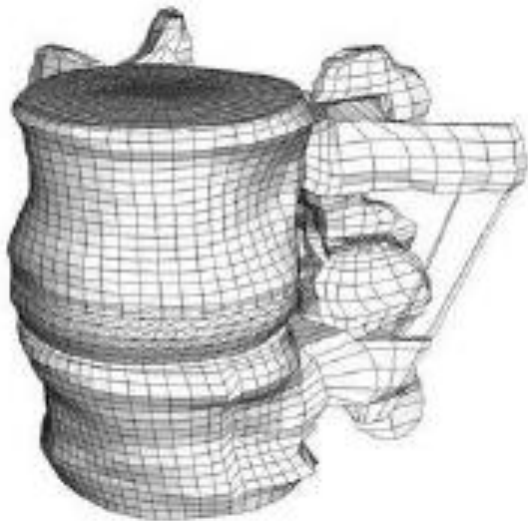
| Location | σ_{mises} Mean values = (MPa) ± standard deviation (MPa) |
|---------------------|--|
| First vertebrae L1 | 0.11879 MPa ± 0.12104 MPa |
| Second vertebrae L2 | 2.7702 MPa ± 2.6934 MPa |
| Third vertebrae L3 | 4.6638 MPa ± 1.3305 MPa |
| Fourth vertebrae L4 | 2.8737 MPa ± 2.337 MPa |
| Fifth vertebrae L5 | 7.201 MPa ± 5.1097 MPa |



Resultados: a) Resultado Autor, b) Validación proyecto

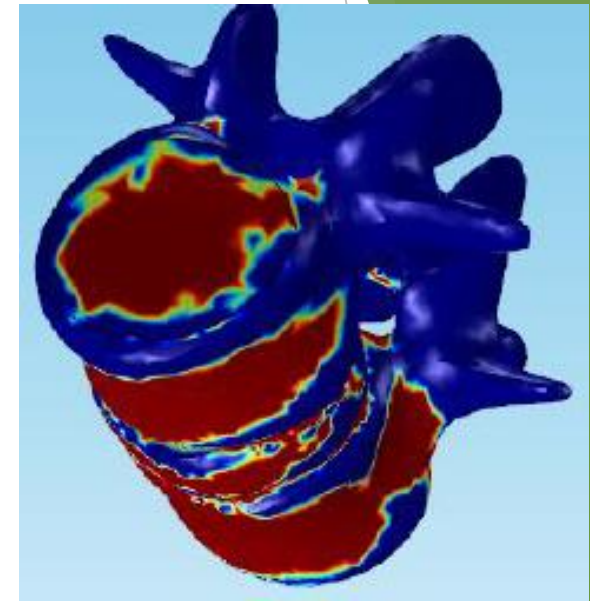
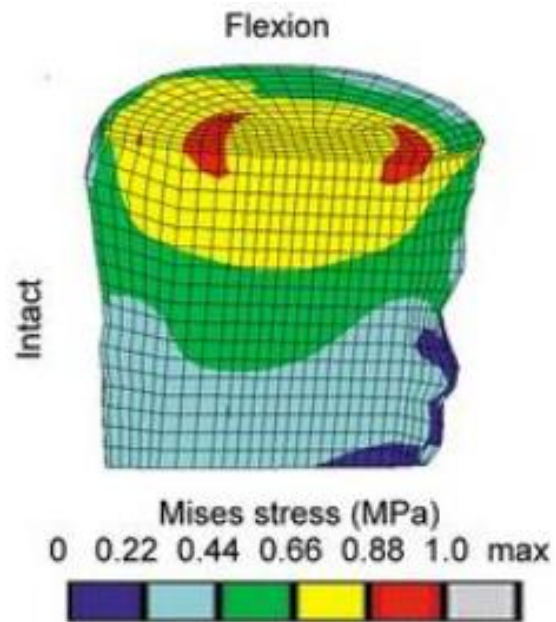
La media y más o menos desviación estándar del esfuerzo de von Mises en la vértebra la cual es sometida a compresión, es decir L1, en el caso del proyecto del autor es de 0.11879 Mpa ±0.12104 Mpa. El valor de esfuerzo máximo de von Mises obtenido en el desarrollo de este proyecto corresponde a un valor mínimo de 3.21052E-6 Mpa y máximo de 0.284010 Mpa.

VALIDACIÓN BAJO FLEXIÓN



| Material | Element type | Elastic modulus (MPa) | Poisson ratio | No. of elements | |
|--------------------|-------------------------|---|---------------|-----------------|-------------|
| | | | | Total | L2/L3 |
| Cancellous | 8-node brick C3D8 | Varied: 30, 50, 100 ^a , 200, 500, 1000 | 0.2 | 20160 | 10,368/9792 |
| Corticalis | C3D8 | 12,000 | 0.3 | 1680 | 864/816 |
| Endplate | C3D8 | 1000 | 0.4 | 1872 | 624 each |
| Posterior elements | 6-node wedge C3D6 | 3500 | 0.25 | 4 | 1069/700 |
| | 4-node tetrahedral C3D4 | | | 5 | |
| | C3D8 | | | 1760 | |
| Cartilage | C3D8 | 10 | 0.4 | 96 | 2*24 each |

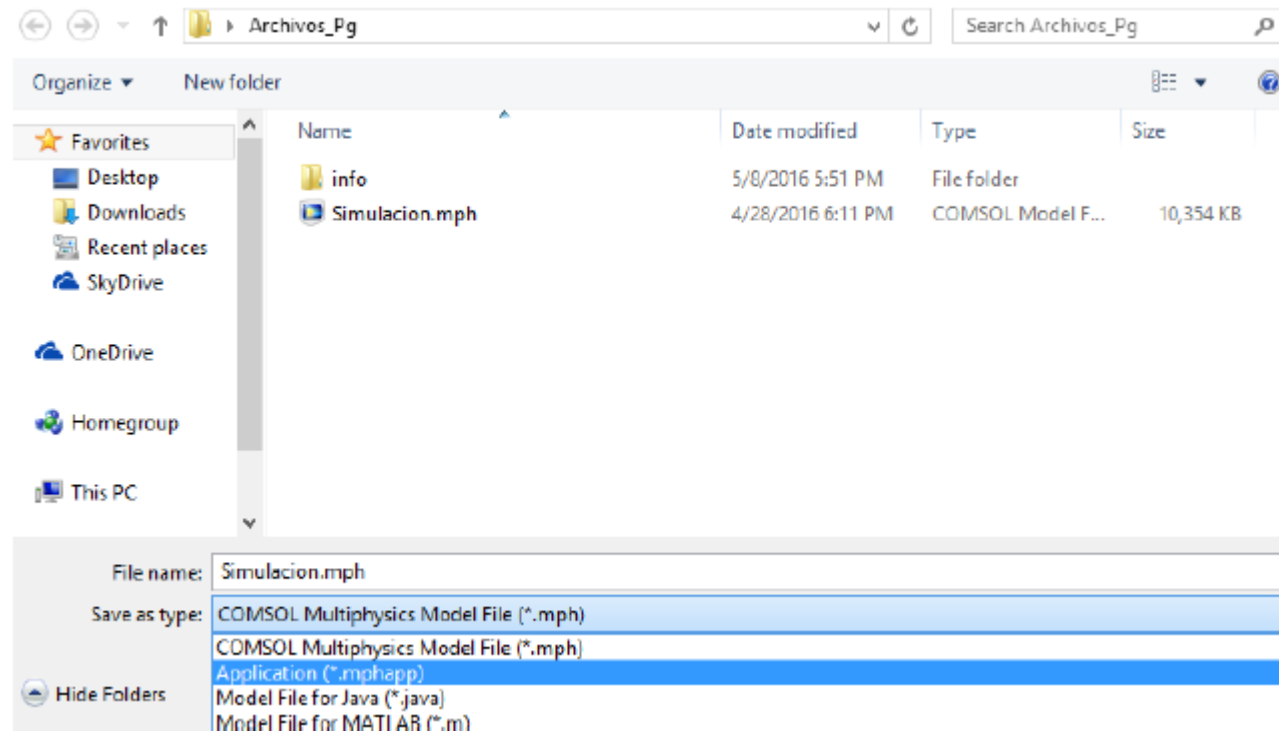
Validación bajo flexión: a) Modelo CAD, b) Propiedades de lo materiales



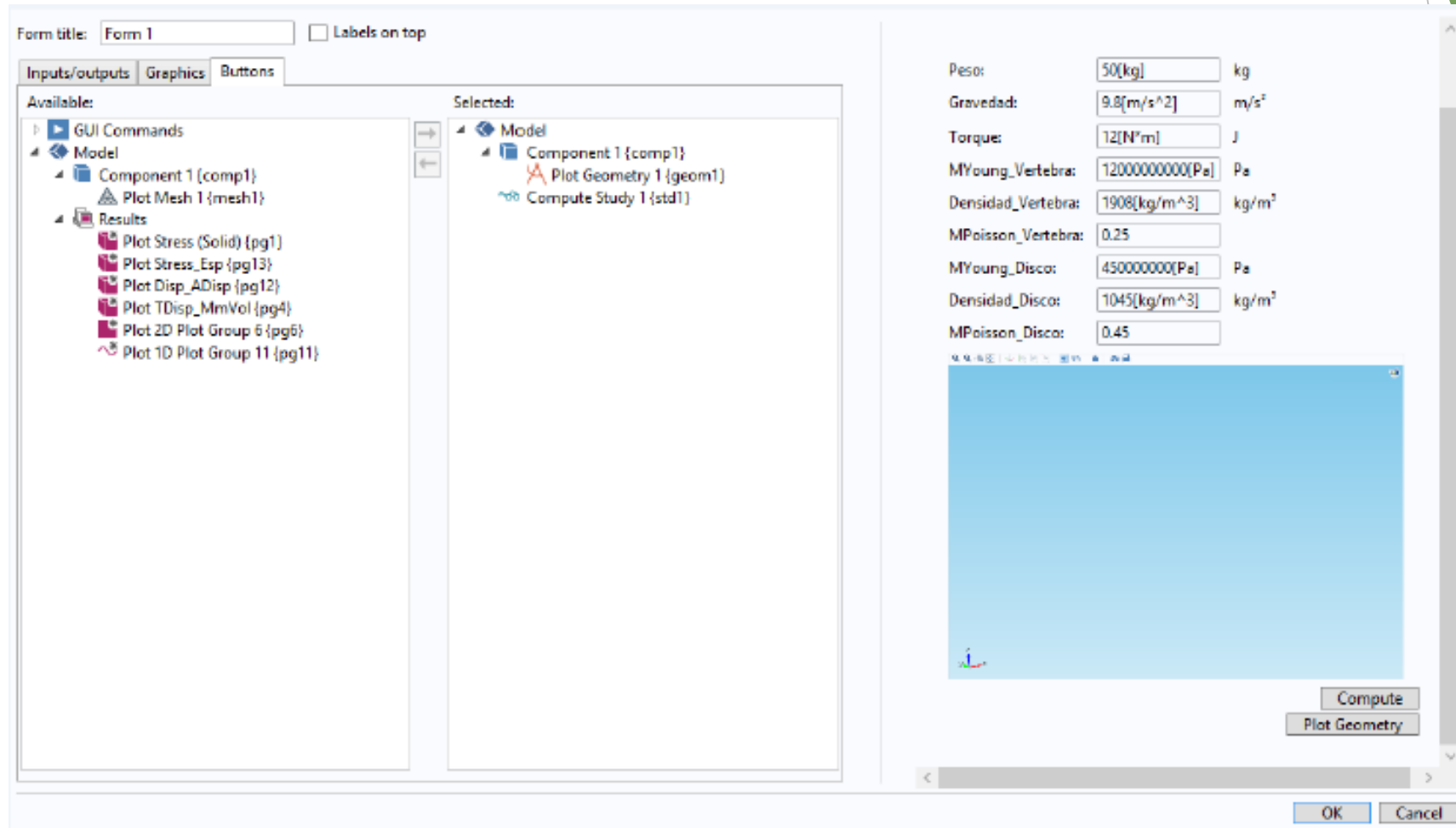
Resultados validación: a) Resultado autor , b-c) Validación proyecto

El valor del esfuerzo máximo de von Mises del proyecto del autor es aproximadamente de 0.88 Mpa a 1.22 Mpa. El de esfuerzo máximo de von Mises obtenido en el desarrollo de este proyecto corresponde a un valor de 0.9055 Mpa.

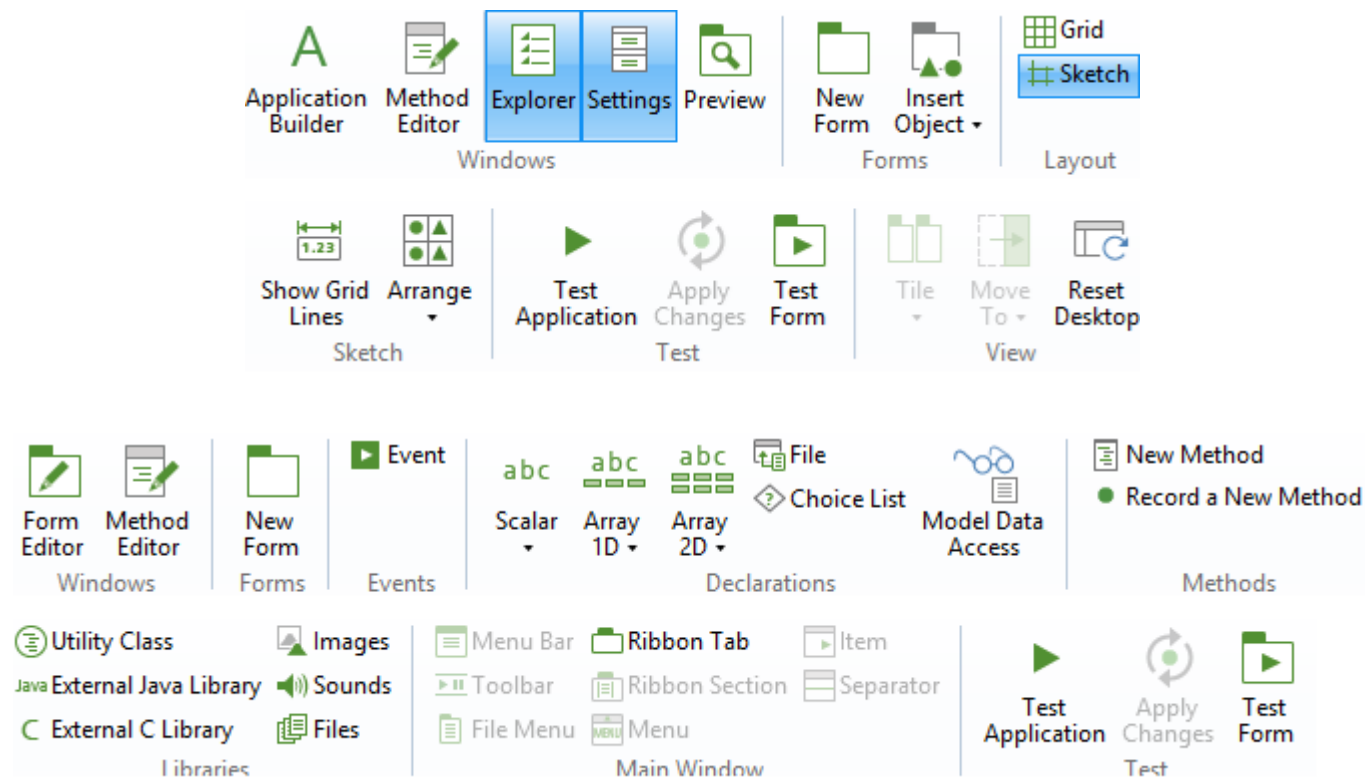
DESARROLLO DE LA INTERFAZ GRÁFICA



Formato aplicación .mphapp

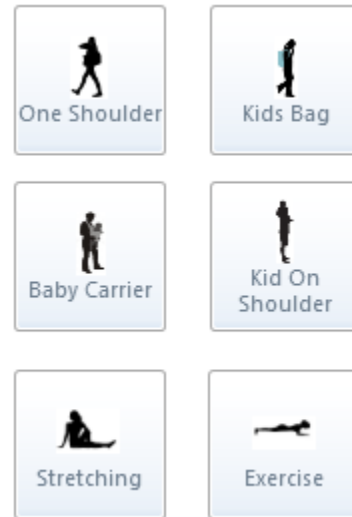


Escritorio base de la aplicación



Barra de herramientas Comsol app Builder

- ▲ app32.mphapp
 - ▲ Main Window
 - ▲ File Menu
 - ▶ Save Application {item1}
 - ▶ Save Application As {item2}
 - ▲ Ribbon
 - ▲ Home {ribbontab 1}
 - ▲ Reset {ribbonsection 1}
 - ▶ Reset To Default Values {item1}
 - ▲ Von Mises {ribbonsection8}
 - ▶ Stress {item1}
 - ▲ Flow {ribbonsection7}
 - ▶ Displacement {item1}
 - ▲ Player {Player}
 - ▶ Animation {Animation}
 - ▲ Document {ribbonsection3}
 - ▶ Report {item1}
 - ▲ Forms
 - Base
 - Properties
 - Daily_Loads



Patient Weight: kg

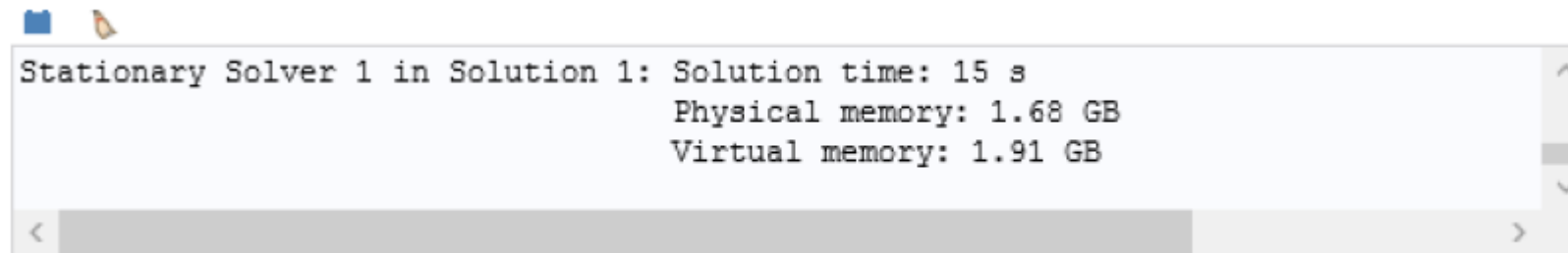
Additional Weight: kg

Configuración app: a) Ventana principal , b) Cargas cotidianas, c) Propiedades

| Command | Icon | Arguments |
|-------------------------------------|------|----------------|
| Set Peso2 of Parameters {param} | | 5 |
| Set Gravedad of Parameters {param} | | 9.8 |
| Set MYoung_Vertebra of Paramete... | | 12000000000 |
| Set Densidad_Vertebra of Paramet... | | 1908 |
| Set MPoisson_Vertebra of Paramet... | | 0.25 |
| Set MYoung_Disco of Parameters... | | 450000000 |
| Set Densidad_Disco of Parameters... | | 1045 |
| Set MPoisson_Disco of Parameters... | | 0.45 |
| Plot Geometry 1 {geom1} | | Base/graphics1 |
| Plot Geometry 1 {geom1} | | Base/graphics2 |
| Disable Fixed Constraint 3 {fix3} | | |

| Command | Icon | Arguments |
|---------------------------------|------|----------------|
| Enable C1 {bnd1} | | |
| Compute Study 1 {std1} | | |
| Plot Deformation1 {pg14} | | Base/graphics1 |
| Disable T1 {bnd2} | | |
| Disable E1 {bnd3} | | |
| Disable F1 {bnd4} | | |
| Disable FL1 {bnd5} | | |
| Disable CA1 {bnd6} | | |
| Disable CP1 {bnd7} | | |
| Set Peso2 of Parameters {param} | | 0 |

Configuración de herramientas: a) Reset , b) Kid on Shoulder

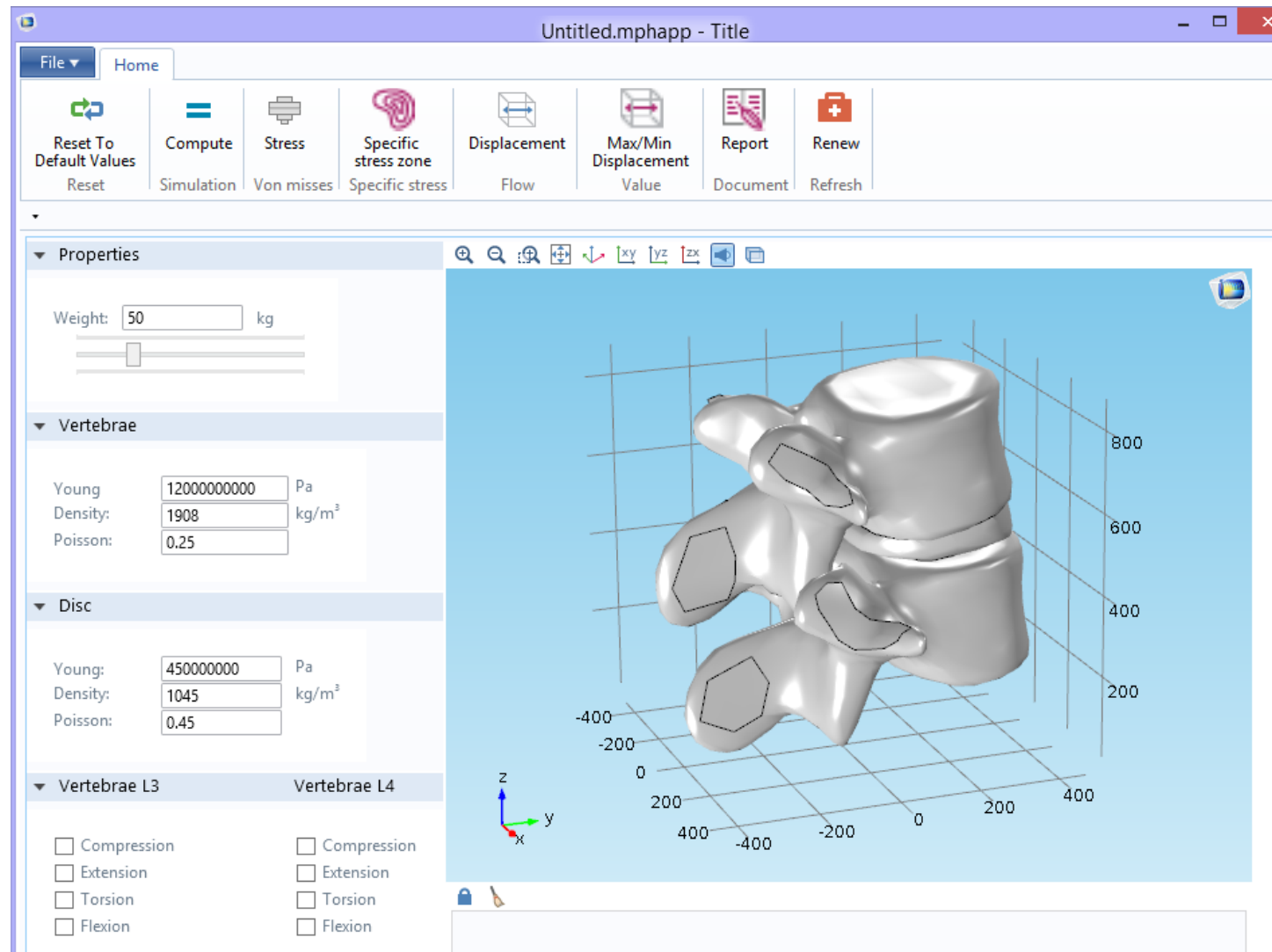


A screenshot of a software console window. The window has a title bar with a blue folder icon and a pencil icon. The text inside the window is as follows:

```
Stationary Solver 1 in Solution 1: Solution time: 15 s  
Physical memory: 1.68 GB  
Virtual memory: 1.91 GB
```

The window has a scroll bar on the right and a horizontal scroll bar at the bottom.

Registro de proceso



Aplicación v.1

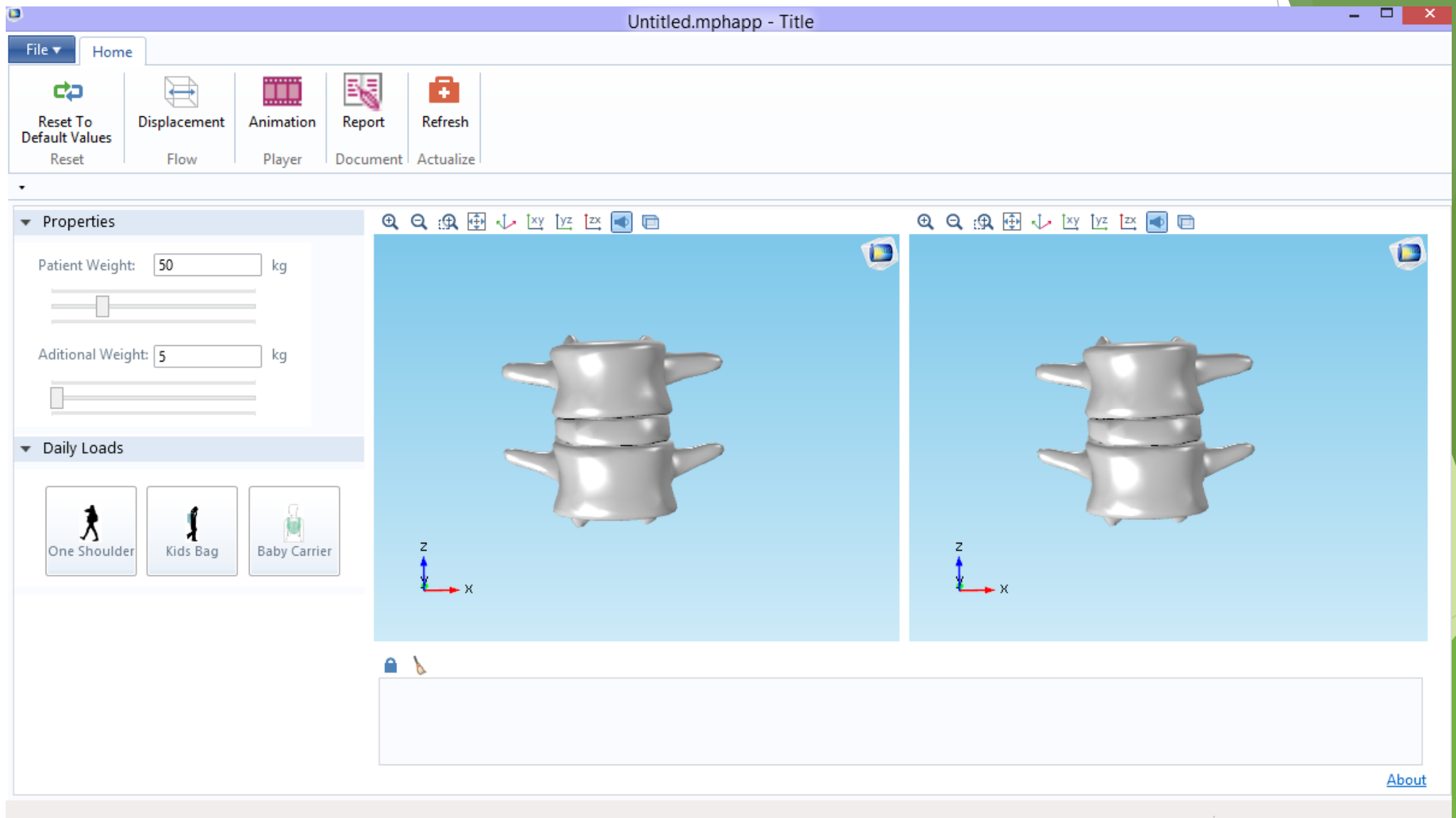
Untitled.mphapp - Title

File Home

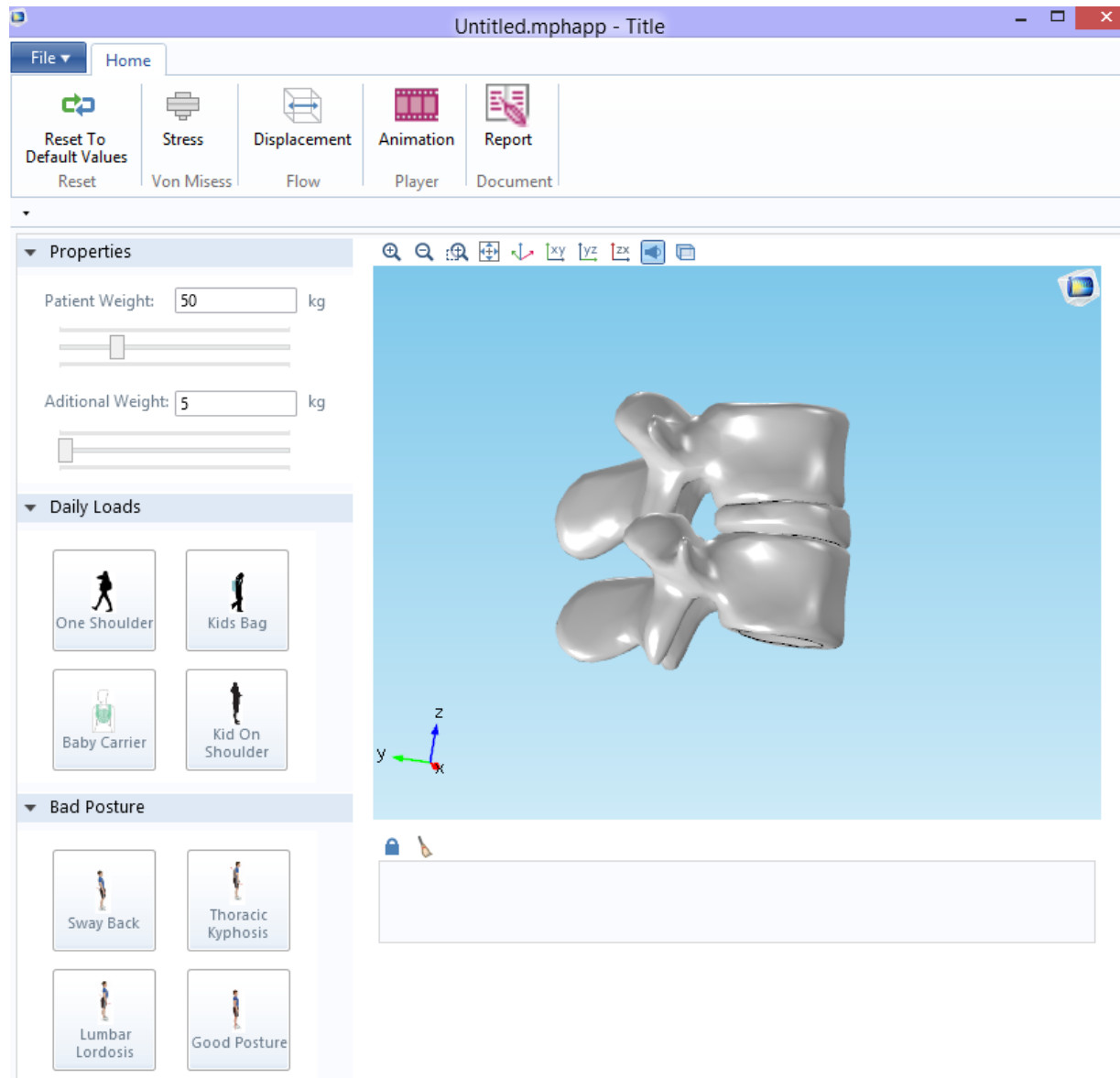
Reset To Default Values (Reset) Compute (Simulation) Stress (Von misses) Specific stress zone (Specific stress) Displacement (Flow) Max/Min Displacement (Value) Deformation (Specific) Animation (Player) Report (Document) Refresh (Actualize)

Properties
 Patient Weight: kg
 Additional Weight: kg
Vertebrae
 Young: Pa
 Density: kg/m³
 Poisson:
Disc
 Young: Pa
 Density: kg/m³
 Poisson:
Vertebrae L3
 Compression Torsion
 Extension Flexion
Daily Loads

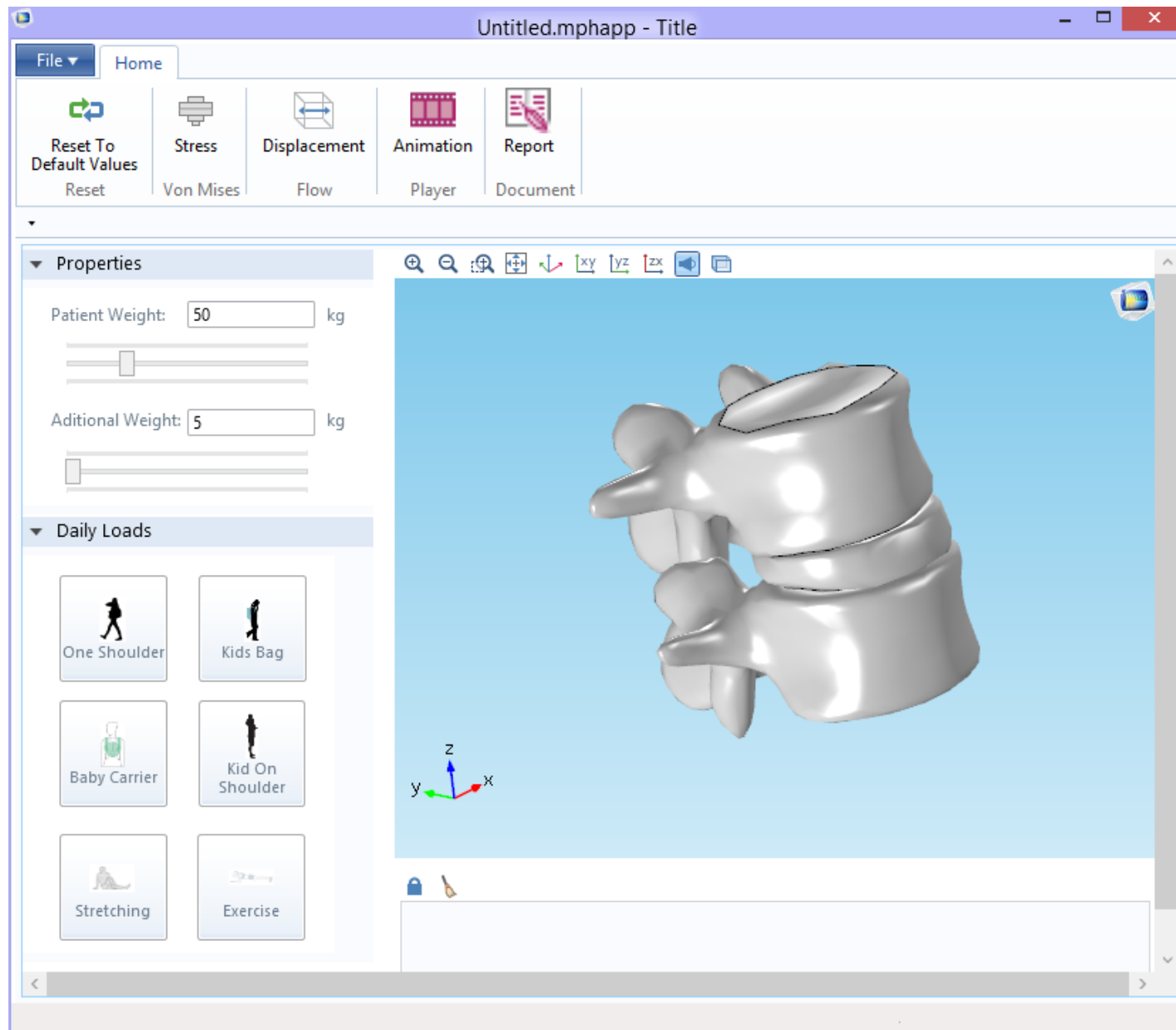
Aplicación v.2



Aplicación v.3



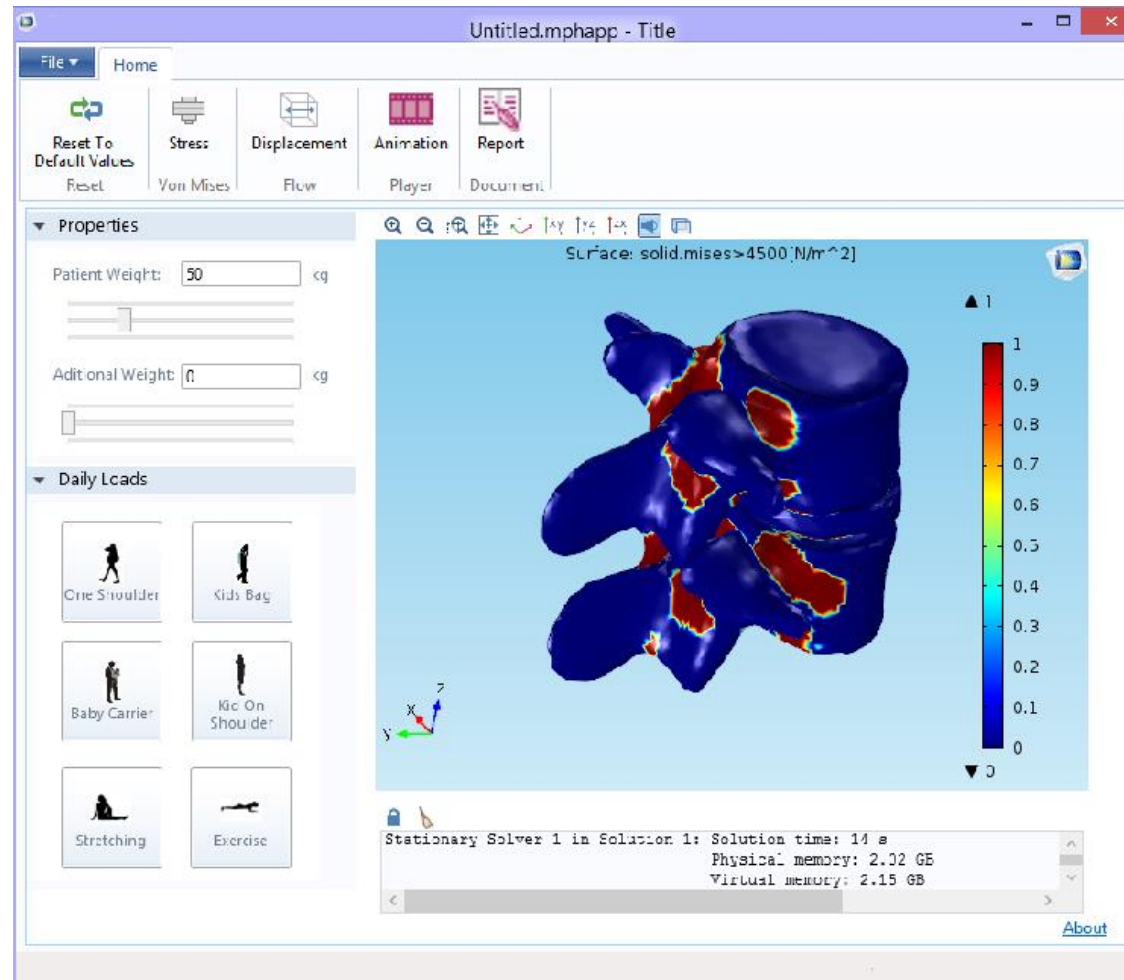
Aplicación v.4



Aplicación v.5



APLICACIÓN



Aplicación final

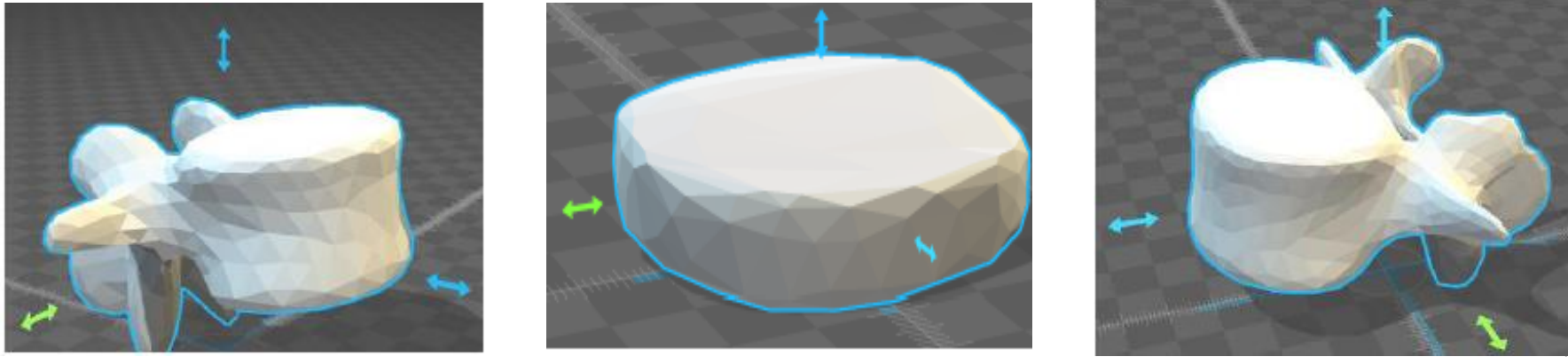
CONCLUSIONES

Modelo CAD →

Validación →

Aplicación →

Conclusión modelo CAD

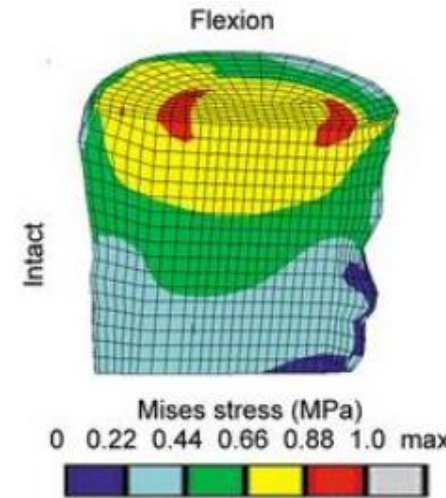
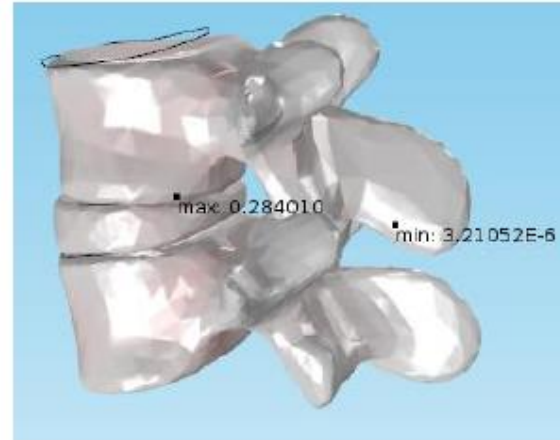
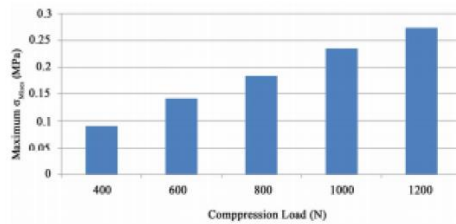


Los modelos CAD proporcionados por Numérica.ltda, fueron fundamentales en el desarrollo del proyecto. Debido a que son reconstruidos usando tomografía computarizada, lo que permite un acercamiento más real al modelo geométrico de las vértebras lumbares.



Conclusión Validación

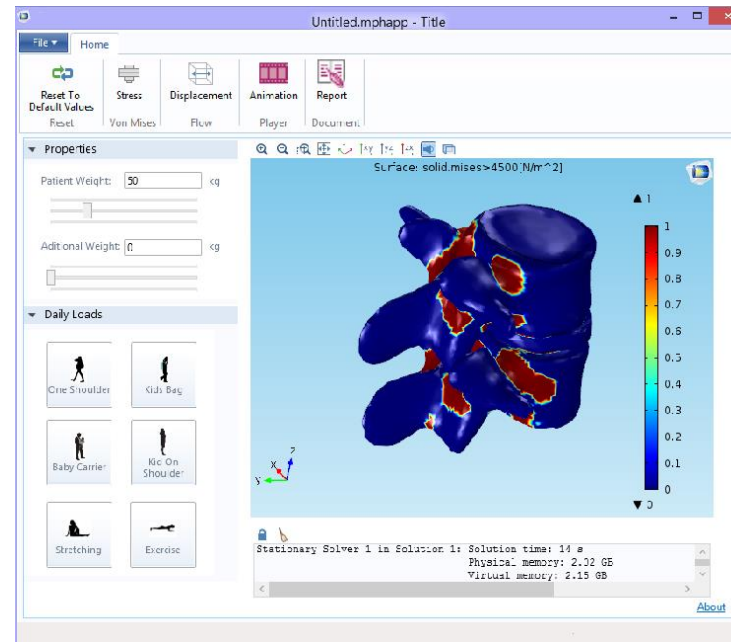
| Location | σ_{mises} Mean values = (MPa) ± standard deviation (MPa) |
|---------------------|--|
| First vertebrae L1 | 0.11879 MPa ± 0.12104 MPa |
| Second vertebrae L2 | 2.7702 MPa ± 2.6934 MPa |
| Third vertebrae L3 | 4.6638 MPa ± 1.3305 MPa |
| Fourth vertebrae L4 | 2.8737 MPa ± 2.337 MPa |
| Fifth vertebrae L5 | 7.201 MPa ± 5.1097 MPa |



Se realizaron dos validaciones basadas en la teoría, de las cuales se puede resaltar que la magnitud del esfuerzo de von Mises y las zonas de mayor esfuerzo no difieren del todo con los resultados del proyecto.

Por flexión, se obtuvieron respuestas aproximadas, de 0.8Mpa y 0.9 Mpa. Esta similitud se debe a que la geometría de las vértebras eran semejantes. A diferencia de la validación por compresión, donde los valores del esfuerzo resultante de von Mises fueron de 0.11Mpa y 0.28Mpa.

Conclusión Aplicación



La interfaz gráfica es totalmente funcional, permite simular diversas situaciones a las cuales podrían someterse el par de vertebras. Se desarrolló para uso de la medicina como una herramienta que proporcione una perspectiva diferente al médico y así determinar en qué situación se encuentra el paciente y poder dar su apreciación sobre el tratamiento a seguir.

GRACIAS