

Adaptación del modelo de córnea de ANSYS a SOFA

Versión 1: Construcción de la escena y modelado

Parte del trabajo grupal: Simulación SOFA

17 de diciembre de 2025

Índice general

Resumen	2
1. Introducción y contexto	3
2. Construcción de la escena SOFA	4
2.1. Software SOFA: características y estructura	4
2.2. Problema 1: importación de mallas desde ANSYS	4
2.3. Solución 1: pipeline ANSYS → Gmsh → SOFA	4
3. Modelado de las capas cornéales	6
3.1. Estructura multicapa de la córnea	6
3.2. Inserción de propiedades de material	6
3.3. Consideraciones sobre adimensionalidad en SOFA	7
4. Diseño del palpador	8
4.1. Especificación y modelado del palpador	8
4.2. Integración en la escena SOFA	8
5. Escena SOFA resultante	9
5.1. Estructura de la escena .scn	9
5.2. Entregable para el equipo de Unity	9
6. Notas técnicas y consideraciones	10
6.1. Ventajas del pipeline implementado	10
6.2. Parámetros clave de la configuración	10

Resumen

Este documento recoge la **parte de simulación en SOFA** del proyecto de palpación corneal. Se describe la construcción de la escena, la adaptación de la geometría y el mallado desde ANSYS hacia un modelo volumétrico compatible con SOFA (incluyendo el pipeline con Gmsh), la definición de capas corneales y propiedades mecánicas, y el diseño e integración del palpador. El objetivo es disponer de una escena reproducible y documentada como base para la integración posterior del simulador.

Capítulo 1

Introducción y contexto

El objetivo de esta parte del proyecto consiste en adaptar el modelo biomecánico de la córnea previamente modelada y simulada en ANSYS, de manera que pueda ejecutarse en el motor de simulación **SOFA** y servir como base para una futura integración en una interfaz interactiva en tiempo real. SOFA (Simulation Open Framework Architecture) es un framework de simulación física orientado a aplicaciones biomédicas, ampliamente utilizado en investigación para simulación de tejidos blandos y sistemas interactivos.

La motivación principal de esta adaptación es que, mientras ANSYS permite simulaciones detalladas y precisas de elementos finitos, no está pensado para la ejecución en tiempo real ni para interacción continua. SOFA, en cambio, permite simular deformación, contacto y fuerzas de forma interactiva, con posibilidad de conexión a dispositivos hápticos o integración con entornos 3D como Unity.

Capítulo 2

Construcción de la escena SOFA

2.1. Software SOFA: características y estructura

SOFA utiliza un **grafo de escena** donde cada nodo contiene componentes que definen tanto geometría como modelos físicos. Para simular tejidos blandos, SOFA requiere una topología de volumen (p. ej., elementos tetraédricos) y un conjunto de componentes que definan:

- Grados de libertad (posición y velocidad de nodos).
- Modelo constitutivo (elasticidad, hiperelasticidad, etc.).
- Masa y fuerzas externas.
- Condiciones de contorno.
- Contacto y colisión.

2.2. Problema 1: importación de mallas desde ANSYS

En ANSYS se trabajó con una malla de elementos sólidos y/o capas, pero la exportación directa a SOFA presenta dificultades. ANSYS exporta normalmente en formatos de superficie (**.obj**, **.stl**) o de su propio entorno (**.cdb**). SOFA, sin embargo, requiere una malla volumétrica con conectividad explícita (tetraedros). Importar solo la superficie implica que no existe un volumen sobre el que calcular la elasticidad, y por tanto el modelo queda inconsistente, imposibilitando una simulación biomecánica realista.

2.3. Solución 1: pipeline ANSYS → Gmsh → SOFA

Se identificó que la solución era utilizar un software intermediario para reconstruir el volumen y generar la malla tetraédrica necesaria. Se utilizó **Gmsh**, herramienta de código abierto ampliamente utilizada en simulación numérica.

El pipeline implementado fue el siguiente:

1. **Exportar desde ANSYS:** Se exportó el modelo de córnea como archivo **.obj** (formato de superficie).

2. **Importar y procesar en Gmsh:** Se importó el archivo de superficie, se generó un volumen cerrado y se preparó el mallado.
3. **Generación de malla 3D:** En Gmsh se definieron los parámetros de discretización (tamaño de elemento) y se ejecutó la generación de malla 3D. Gmsh genera automáticamente una malla de tetrahedros que rellena el volumen interior.
4. **Exportar a formato .msh2:** Se exportó la malla generada en formato .msh2 (ASCII 2). Este formato incluye:
 - Coordenadas de todos los nodos.
 - Conectividad de elementos (tetraedros): cada elemento se define por sus 4 nodos.
 - Información de fronteras y etiquetado de regiones (grupos físicos).
5. **Importar en SOFA:** SOFA posee parsers nativos para .msh2, permitiendo cargar la topología tetraédrica y asignar automáticamente los grados de libertad y la conectividad del modelo.

De esta manera se obtiene una representación volumétrica con topología explícita que SOFA puede utilizar para resolver la mecánica.

Capítulo 3

Modelado de las capas cornéales

3.1. Estructura multicapa de la córnea

Se buscó representar la córnea con un modelo multicapa análogo al desarrollado en ANSYS. En SOFA esto implica definir múltiples mallas o submallas con propiedades distintas. Las capas consideradas fueron:

- **Estroma anterior**
- **Estroma posterior**
- **Capa de Bowman** (superficial)

Cada capa fue tratada como un objeto mecánico en SOFA, con su topología correspondiente y un modelo constitutivo asociado.

3.2. Inserción de propiedades de material

Para el estroma se usó un modelo de elasticidad lineal (FEM) con parámetros equivalentes a los usados en ANSYS, asignando:

- Módulo de Young E (según región anterior/posterior).
- Coeficiente de Poisson alto ($\nu \approx 0,49$) para aproximar incompresibilidad.
- Incorporar amortiguamiento viscoelástico mediante un parámetro de damping.

Para la **capa de Bowman** (membrana superficial):

- Cargar la malla triangular `.msh2` correspondiente en un nodo del grafo de escena.
- Asignar grados de libertad mediante `MechanicalObject`.
- Definir un componente de fuerzas elásticas basado en elementos de membrana, introduciendo los parámetros mecánicos correspondientes.
- Incorporar amortiguamiento.

3.3. Consideraciones sobre adimensionalidad en SOFA

SOFA trabaja internamente con unidades SI, pero requiere coherencia en la escala. Se realizó una verificación de:

- Unidades de longitud (m vs mm).
- Unidades de fuerza (N vs mN).
- Escalado de densidad y rigidez si procede.

Se decidió mantener la escala en metros para compatibilidad con el motor y evitar problemas numéricos, ajustando valores de geometría y parámetros en consecuencia.

Capítulo 4

Diseño del palpador

4.1. Especificación y modelado del palpador

El palpador se modeló como un objeto rígido (o altamente rígido) con geometría simple (p. ej., esfera o cilindro con punta redondeada). Este componente se define con:

- Malla de colisión (superficie).
- Estado mecánico (posición/orientación).
- Restricciones de movimiento (controlado por trayectoria o por input externo en futuras versiones).

4.2. Integración en la escena SOFA

La interacción palpador–córnea se implementa mediante:

- Detección de colisión entre superficies.
- Modelo de contacto (penalización o constraints).
- Aplicación de fuerzas de reacción en la córnea.

En esta fase se configuró el contacto básico, dejando la parametrización fina (rigidez de contacto, fricción) para ajuste posterior.

Capítulo 5

Escena SOFA resultante

5.1. Estructura de la escena .scn

La escena final se organiza en nodos principales:

- **Nodo Córnea:** contiene el modelo FEM y parámetros materiales.
- **Nodo Bowman:** capa superficial con propiedades de membrana.
- **Nodo Palpador:** objeto rígido con colisión.
- **Nodo Contacto:** configuración de detección y respuesta de contacto.

5.2. Entregable para el equipo de Unity

Como entregable se proporciona:

- Archivo de escena .scn listo para ejecutar en SOFA.
- Mallas .msh2 del volumen y de la capa de Bowman.
- Documentación del pipeline ANSYS → Gmsh → SOFA para reproducibilidad.

Capítulo 6

Notas técnicas y consideraciones

6.1. Ventajas del pipeline implementado

El pipeline permite:

- Convertir geometrías superficiales de ANSYS a volúmenes tetraédricos aptos para FEM.
- Mantener consistencia geométrica entre plataformas.
- Reproducibilidad para futuras iteraciones con refinamientos de malla.

6.2. Parámetros clave de la configuración

Los parámetros más relevantes a ajustar en futuras versiones incluyen:

- Tamaño de elemento en Gmsh (refinamiento local en el ápex corneal).
- Parámetros del solver en SOFA (time step, damping).
- Parámetros del modelo de contacto (rigidez de contacto, fricción, etc.).
- Validación con curvas fuerza–desplazamiento comparadas con ANSYS o bibliografía.

Se recomienda mantener un registro de cambios en la escena para facilitar la trazabilidad y futuras modificaciones.