

# Adaptación del modelo de córnea de ANSYS a SOFA

Pablo Sola, Emilio Küstner, Elena Pulido

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>2</b>
<b>1. Introducción y contexto</b>	<b>3</b>
<b>2. Construcción de la escena SOFA</b>	<b>4</b>
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
<b>3. Modelado de las capas cornéales</b>	<b>6</b>
3.1. Estructura multicapa de la córnea . . . . .	6
3.2. Inserción de propiedades de material . . . . .	6
3.3. Consideraciones sobre adimensionalidad en SOFA . . . . .	7
<b>4. Diseño del palpador</b>	<b>8</b>
4.1. Especificación y modelado del palpador . . . . .	8
4.2. Integración en la escena SOFA . . . . .	8
<b>5. Escena SOFA resultante</b>	<b>9</b>
5.1. Estructura de la escena .scn . . . . .	9
5.2. Entregable para el equipo de Unity . . . . .	9
<b>6. Notas técnicas y consideraciones</b>	<b>10</b>
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.